



HAL
open science

Analyse spatiale et mise en place de système d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagnes face aux risques naturels

Yannick Manche

► **To cite this version:**

Yannick Manche. Analyse spatiale et mise en place de système d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagnes face aux risques naturels. Géographie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2000. Français. NNT: . tel-00077807

HAL Id: tel-00077807

<https://theses.hal.science/tel-00077807>

Submitted on 1 Jun 2006

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

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

**UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE I
U.F.R. DE GEOGRAPHIE**

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE I

Discipline : GEOGRAPHIE

Soutenue publiquement le 30 octobre 2000

Par

Yannick MANCHE

**Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour
l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux
risques naturels**

Directeurs : Pierre Dumolard (Professeur, UJF)
Yvan Bedard (Professeur, Université Laval, CRG)
Gérard Brugnot (IGREF, Cemagref)

JURY :

- M. Jean-Paul Donnay - Rapporteur (Professeur, université de Liège)
- M. Paul Arnould - Rapporteur (Professeur, Ecole Normale Supérieure)
- M. Claude Millier - Président (IGREF, ENGREF)

Thèse préparée au sein des laboratoires :

**Cemagref – Unité de Recherches Erosion Torrentielle, Neige et Avalanche – Grenoble
Centre de Recherche en Géomatique – Université Laval – Québec, Canada
SEIGAD – Université Joseph Fourier – Grenoble I**

Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels

Résumé :

Les conflits liés à l'utilisation de l'espace par la société sont nombreux ; les risques naturels et les catastrophes naturelles en font partie. Ce travail s'intéresse à une meilleure connaissance de la vulnérabilité pour la gestion des risques naturels, particulièrement ceux concernant les territoires montagnards.

Pour cela, nous nous appuyons sur l'analyse spatiale et les Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS). La démarche consiste à s'intéresser tout d'abord aux différents aléas gravitaires pour bien comprendre leurs relations avec la vulnérabilité et ensuite effectuer un modèle théorique des risques naturels prenant en compte la vulnérabilité pour l'évaluer. Puis pour améliorer cette évaluation dans la gestion des risques naturels, la mise en place de systèmes d'information, intégrant les différentes notions relatives au concept de risque sert de support méthodologique et technique . Ainsi, des systèmes reposant sur l'analyse spatiale sont développés afin de contribuer à la gestion de la vulnérabilité des régions de montagne.

Mots clés :

risque naturel gravitaire, vulnérabilité, aléa, analyse spatiale, aide à la gestion, modélisation, Système d'Information à Référence Spatiale

Spatial analysis and setting up of information systems designed for the evaluation of vulnerability regarding risks due to natural hazard in mountains regions

Abstract :

Many situations of conflict occur between the use of space by the society and natural hazards. This research aims at improving knowledge of vulnerability in the context of the natural hazards management ; the question is how to take into account vulnerability assessment, especially in the case of natural risks threatening mountainous areas.

In order to provide solutions to that question we had recourse to spatial analysis and Geographic Information Systems. The process first consists in watching out different gravity hazards and studying their relationship to vulnerability, then in performing a theoretical model of natural risks analysis. The methodological and technical support were provided by the creation of a Geographic Information System application, considering different concepts related to risks. Therefore we developed methodologies based on spatial analysis.

Keywords :

natural risks, vulnerability, hazards, spatial analysis, management assistance, modelling, Geographic Information Systems.

Remerciements

Mes remerciements vont à Gérard Brugnot, directeur de cette thèse au Cemagref, toujours présent pour apporter de nouvelles réflexions, même tard.

Que Pierre Dumolard de l'Institut de Géographie Alpine, directeur de ce travail soit remercié pour l'attention qu'il a portée à l'avancement du doctorat.

Yvan Bédard, co-directeur du lointain Québec, qui m'a accueilli et permis d'aborder une certaine vision de la géomatique.

Merci à Jean-Paul Donnay professeur à l'université de Liège ainsi qu'à Paul Arnould, professeur à l'Ecole Normale Supérieure d'avoir accepté la charge de juger ce travail en tant que rapporteurs, sans oublier Claude Millier directeur de la recherche de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, président du jury.

L'Unité de Recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanche du Cemagref de Grenoble qui m'a financé et accueilli. Merci à ses membres, dont Gilles Borrel pour l'aide de tous les jours et le français, François Rapin, Martine Girier qu'on oublie trop souvent, Roland pour l'informatique, SIRVA, les programmes DPPR et le reste, Vincent Bain courant derrière. Dominique aussi, sans qui la thèse n'aurait pas été ce qu'elle est, avec les discussions, les pauses et tout simplement sa présence, et Fred B., avec en outre sa maîtrise d'ArcInfo.

Il y a aussi les personnes parties telles que Montse, Bertrand, Samir maintenant sous le soleil du Sud, Didier avec nos activités nocturnes et montagnardes, Marie sur le glacier si on peut encore le considérer ainsi, et ceux que j'oublie forcément...

Je ne peux pas oublier Vincent C. maintenant dans l'administration, inénarrable collègue de bureau durant quelques temps, responsable de la technique et du café Dommage qu'il soit parti avant la fin.

Les personnes du Cemagref, fréquentées durant ces années, Fernande, Jacques et les autres.

Merci pour avoir contribué à l'aboutissement de ce travail.

Merci à Patricia pour la vulnérabilité indirecte et à Philippe pour l'endommagement

Le projet SIRVA, avec en premier lieu Marlène, Charles et son parapente, Seb G. avec son travail sur la fin, ainsi que les autres qui ont contribué de près et de loin à l'aboutissement de ce programme.

Le Centre de Recherche en Géomatique de l'Université Laval à Québec qui m'a hébergé durant quelques mois. En particulier, Annick pour son accueil chaleureux et sa présence dans le froid loin de la Suisse, le flou du doctorat de Tom, Fred et Geneviève sur leur galerie, les 5 à 7, Rodolphe qui aime trop les Québécoises, Sylvain, le nounours du labo, Pierre N., Suzie la dépanneuse qui fait tourner la machine, en attendant que tu viennes faire le tour du Mont Blanc, et Nathalie pour sa présence et les mails.

A Françoise, pour le temps perdu.

Ghali parti des stats pour arriver à l'assistance informatique. Quand il lui en faut une, il m'en faut au moins cinq.

Le changement de continent entraîne des rencontres des deux côtés de l'Atlantique : Cathou, Marion, Cécile, Alex, Virginie, Thierry pour les terrasses et la suite (bon courage à toi) ; merci à tous d'avoir été là.

Pour Véro, merci de m'avoir, entre autres choses, supporté durant une partie du temps.

Benoît, compagnon de jour et aussi de début de nuits pour refaire le monde autour de différents aliments, qui a brillamment terminé avant moi, même si ce n'est qu'une partie de l'aventure, ainsi que Karine qui l'a accepté, mon amie aussi, puis Thierry avec ses stagiaires.

Table des matières

<u>Introduction</u>	4
<u>1. Aléa et vulnérabilité pour la gestion des risques naturels en montagne</u>	9
<u>1.1 Définir le risque naturel</u>	10
1.1.1 <u>Agir sur l'aléa ou la vulnérabilité. Mesures structurelles ou non structurelles ?</u>	11
1.1.2 <u>Evaluer la vulnérabilité</u>	12
1.1.3 <u>Prévention ou gestion de la catastrophe</u>	13
<u>1.2 Evaluation des aléas</u>	14
1.2.1 <u>Les avalanches</u>	14
1.2.1.1 <u>Modélisation physique</u>	16
1.2.1.2 <u>Modélisation numérique</u>	17
1.2.1.3 <u>Modélisation statistique</u>	18
1.2.1.4 <u>Modélisation symbolique</u>	19
1.2.2 <u>Les mouvements de terrain</u>	19
1.2.2.1 <u>Définition des types de mouvements de terrain</u>	20
1.2.2.2 <u>Modélisation des mouvements de terrain</u>	21
1.2.2.3 <u>Les chutes de blocs</u>	21
1.2.3 <u>Les crues torrentielles</u>	24
1.2.3.1 <u>Définition des crues torrentielles</u>	24
1.2.3.2 <u>Modélisation des crues torrentielles</u>	26
<u>1.3 Evaluation de la vulnérabilité</u>	27
1.3.1 <u>Endommagement</u>	27
1.3.2 <u>Méthodes fonctionnelles</u>	29
1.3.3 <u>Modélisation théorique de la vulnérabilité spatiale</u>	30
1.3.3.1 <u>La vulnérabilité directe</u>	32
<u>Accroissement tendanciel de la vulnérabilité</u>	32
1.3.3.2 <u>La vulnérabilité indirecte</u>	37
<u>1.4 La mesure du risque naturel</u>	40
1.4.1 <u>L'évaluation « économique » des risques naturels</u>	40
1.4.2 <u>Les méthodes statistiques (d'évaluation du risque avalanche)</u>	43
<u>1.5 Premier prototype : ArsenRisk</u>	44
1.5.1 <u>ARSEN : un outil générique de représentation de l'espace</u>	45
1.5.2 <u>Cartographie de l'aléa et de la vulnérabilité</u>	45
1.5.3 <u>Cartographie du risque</u>	47
<u>1.6 Evolution de la prise en compte réglementaire des risques naturels</u>	51
1.6.1 <u>Des origines à une gestion réfléchie</u>	51

1.6.2	<u>Vers une mise en place de la gestion des risques</u>	53
1.6.3	<u>Le tournant de la politique de prévention en zone de montagne</u>	54
1.6.4	<u>Des PER aux PPR</u>	55
1.7	<u>Conclusion</u>	58
2.	<u>Une gestion plus globale des risques naturels : analyse spatiale et Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS)</u>	60
2.1	<u>Introduction : mise en œuvre de SIRS</u>	61
2.2	<u>Bases de données et SIRS pour les risques naturels</u>	62
2.2.1	<u>Aide à la décision en matière de risques naturels</u>	62
2.2.2	<u>SGBD, entre relationnel et orienté objets</u>	63
2.2.3	<u>Le raisonnement multi-échelle</u>	66
2.3	<u>Contraintes informationnelles</u>	69
2.3.1	<u>Contraintes liées aux données réellement disponibles</u>	70
2.3.2	<u>Impact des contraintes informationnelles sur la conception du système</u>	71
2.3.3	<u>Vers des systèmes opérationnels ?</u>	72
2.4	<u>Mise en commun des données concernant les risques</u>	73
2.4.1	<u>Système d'Information sur les Risques naturels de la haute Vallée de l'Arve</u>	73
2.4.1.1	<u>Gestion des données et modélisation du système</u>	74
2.4.1.2	<u>Mise en place du système</u>	76
2.4.2	<u>Base de données pour une meilleure gestion</u>	83
2.5	<u>Raisonnement reposant sur la logique floue</u>	85
2.7	<u>Conclusion</u>	87
3.	<u>Modélisation orientée objet pour les risques naturels</u>	88
3.1	<u>Modélisation des systèmes</u>	89
3.1.1	<u>Modèle de développement</u>	89
3.1.2	<u>Niveaux de modélisation</u>	90
3.2	<u>Cas d'utilisations</u>	92
3.3	<u>Diagrammes de séquences</u>	93
3.4	<u>Perceptory : un outil de modélisation conceptuel pour les SIRS</u>	97
3.5	<u>Diagramme de classes</u>	98
3.6	<u>Modèle logique</u>	101
3.7	<u>Conclusion</u>	103
4.	<u>Raisonnement spatial pour les risques naturels en montagne</u>	104
4.1	<u>Applications pour une gestion spatiale des risques</u>	104
4.1.1	<u>Zonage flou et risque flou</u>	105
4.1.2	<u>Evaluation d'un risque indirect</u>	111
4.1.2.1	<u>Risque indirect : une perte d'accessibilité</u>	112

4.1.2.2	<u>Définition de l'accessibilité</u>	112
4.1.2.3	<u>Modélisation du réseau routier</u>	113
4.1.2.4	<u>Représentation du risque indirect</u>	116
4.2	<u>Analyse spatiale pour les risques : outils méthodologiques</u>	121
4.2.1	<u>Modèle pragmatique des risques naturels</u>	121
4.2.2	<u>Endommagement des bâtiments</u>	123
4.2.3	<u>Risque par zone d'occupation humaine</u>	129
	<u>Conclusion générale</u>	137
	<u>Lexique des abréviations et des acronymes</u>	140
	<u>Bibliographie</u>	142
	<u>Annexe A : Dictionnaire de données</u>	156

Introduction

Les conflits liés à l'utilisation de l'espace par la société sont nombreux. Les risques naturels et les catastrophes naturelles en font partie. La géographie se distingue par son objet qui est l'étude de l'espace terrestre et son organisation. S'intéressant à cet espace et à son organisation dans ses composantes culturelles et naturelles (Gumuchian, Marois, 2000), elle ne peut que s'intéresser aux risques naturels. Ce sont des phénomènes fortement spatialisés. La prévisibilité temporelle (la date, le moment, l'heure) est quasi impossible à réaliser avec précision, en revanche la prévisibilité spatiale, c'est à dire le lieu, peut être plus facile à établir (Lambert, 1995).

En géographie, nous nous intéressons aux caractéristiques qui structurent l'espace. Espace vu en tant qu'étendue terrestre utilisée et aménagée par les sociétés. Il comprend l'ensemble des lieux et de leurs relations (Brunet *et al.*, 1992). Cette espace est une représentation nécessaire, *a priori*, qui sert de fondement à toutes les intuitions externes. Il est impossible de ne pas se représenter d'espace, quoiqu'on puisse bien concevoir qu'il n'y ait pas d'objets en lui. Il est donc considéré comme la condition de la possibilité des phénomènes, c'est à dire qu'il s'agit d'une représentation *a priori* servant nécessairement de fondement aux phénomènes extérieurs (Kant, 1987).

La recherche concernant les risques n'est pas purement théorique ; il s'agit d'améliorer, dans la mesure du possible, des décisions impliquant des vies humaines et marquant l'espace par des choix d'aménagement, donc aussi d'orienter le développement économique et social des secteurs concernés. En conséquence, il s'agit aussi d'expertise scientifique.

L'expertise scientifique exige une approche pluridisciplinaire. Il s'agit de répondre à des questions concrètes, concret qui est toujours analysable selon une multiplicité de points de vue, dont beaucoup donnent naissance à des disciplines spécifiques (comme la cindynique dans notre cas). Il est donc impératif, pour appréhender la gestion des risques naturels, de faire appel à plusieurs disciplines. Le cadre de ce travail se situe essentiellement en géographie et, pour les outils, en informatique, mais aborde aussi des domaines relatifs à la science politique, la sociologie, la physique... Cette pluridisciplinarité est aussi indispensable pour aborder les problématiques de l'environnement.

Le choix d'une recherche en géographie sur les risques naturels s'explique par le fait qu'ils sont appréhendés grâce à des modèles spatiaux. Un modèle compréhensible des risques naturels est généralement une composition de modèles (donc des représentations de la réalité), c'est à dire un modèle des enjeux, des aléas, de la vulnérabilité, et enfin de la mesure du risque (Taylor *et al.*, 1998), chacun s'inscrivant à l'intérieur du même espace. A partir de là, l'analyse spatiale permet

de contribuer à l'amélioration des connaissances. De la même façon, nous plongeons aussi dans les sciences géomatiques qui concernent l'ensemble des méthodes et procédures de traitement des données géographiques.

De plus, s'intéresser aux risques naturels nous amène à nous préoccuper de la société puisque l'importance d'une catastrophe ne traduit pas uniquement l'intensité du phénomène qui en est à l'origine, mais aussi, et même surtout, la vulnérabilité de la société qui la subit (Ledoux, 1995). La société est fragile : elle manque de souplesse dans ses structures qui ne sont pas adaptées à l'imprévu, elle n'a pas de solutions techniques pour se protéger de tous les effets dommageables, et elle ne sait pas vraiment maîtriser l'occupation et l'exploitation de son espace. Toute analyse des risques naturels doit être menée avec cette idée. La prévention des risques permet d'éviter des catastrophes mais il y aura toujours des catastrophes puisque le risque nul n'existe pas et la connaissance est incertaine.

Positionné en géographie, nous nous situons aussi dans le domaine de la cindynique qui désigne les divers aspects des recherches sur le danger au sens le plus large. La cindynique se propose de répondre au besoin d'une représentation la plus complète possible de la scène du danger, afin de regrouper dans une méthodologie cohérente les formalismes et méthodes de compréhension et de gestion du danger. En ce sens, une approche géographique des risques portant sur la vulnérabilité des territoires s'y intègre parfaitement.

Un des autres aspects d'une recherche sur les risques est l'aide à la décision. Tout incite à penser que les décisions en matière de risques impliquent de ne pas attendre de disposer de tous les éléments pour prendre des décisions dont l'avenir dépend ; de cesser d'entretenir cette fausse conception selon laquelle une décision ne serait légitime que rationnellement fondée sur une connaissance rigoureuse. Si une telle connaissance rigoureuse n'existe pas, il faut en prendre acte et confronter l'un à l'autre le champ des décisions (nécessaires, souhaitables, ou simplement envisageables) et celui des connaissances (certaines, incertaines, discutables ou simplement « absentes »). Pour résumer : *« il ne faut ni laisser l'exigence de rationalité paralyser le processus de décision, ni laisser ce processus renoncer à toute rationalité »* (Roqueplo, 1993). Donc pour réellement parvenir à des décisions effectives concernant les risques, il faut passer de l'impossible prévision à ce que Roqueplo désigne sous le terme de « diagnostic ». Du prétendument rationnel issu des sciences, il s'agit de passer au raisonnable. Passer au raisonnable veut dire s'intéresser à la société, donc à la vulnérabilité des territoires face aux risques naturels.

Et pour cela, accéder à l'information devient une fonction vitale des acteurs d'analyse des risques qui sont souvent placés en dehors du terrain du risque et doivent avoir une information complète et à jour de la situation. Plusieurs systèmes d'aide à la gestion proposent d'assister les acteurs dans leur tâche d'analyse. Il s'agit des systèmes de gestion de l'information, comme les bases de données ou les systèmes d'information géographique (Wybo, 1998).

Ainsi, l'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure connaissance de la vulnérabilité pour la gestion des risques naturels. Pour cela, nous nous appuyons sur la géographie pour aborder la vulnérabilité au travers de la notion d'espace. Il s'agit donc de répondre à la question de la prise en compte de la vulnérabilité pour la gestion d'un type de risques naturels, puisque nous nous intéressons à un territoire précis, celui de la montagne. Pour cela, les risques en montagne (avec une prédominance pour les avalanches) sont le sujet et le support de cette étude,

sachant qu'ils sont moins étudiés que d'autres risques (comme les inondations de plaine), ce qui répond à une forte demande sociale suite aux différentes catastrophes que nous connaissons.

Mais ce premier objectif qui est de définir la vulnérabilité, nous oblige à redéfinir cette dernière vis à vis des territoires, tout en nous intéressant à la définition des aléas pour arriver à la notion de risque naturel. La définition des aléas de montagnes est une étape indispensable puisqu'elle nous permet de connaître les limites de nos connaissances dans ces différents domaines (relativement éloignés de notre spécialité), pour ainsi adapter notre approche de la vulnérabilité.

Cela pose trois types de questions : celle de la définition de la vulnérabilité, des aléas, et des risques et celles relatives à la gestion des risques, du côté de l'expertise, et du côté des décideurs.

Ainsi, la démarche a été de s'intéresser aux différents aléas gravitaires pour bien comprendre leurs relations avec la vulnérabilité, comme cela est illustré dans la première partie. Ceci étant insuffisant pour améliorer la prise en compte de la vulnérabilité dans la gestion des risques naturels, le support méthodologique et technique a été la mise en place de systèmes d'information pour la gestion, intégrant les différentes notions relatives au concept de risque. Le choix des systèmes d'information se fait naturellement puisqu'il s'agit de phénomènes spatiaux, et le territoire sert de référentiel commun aux différents paramètres. De plus, il s'agit d'un outil de communication et de diffusion des connaissances du domaine, aspect essentiel de la gestion des risques.

Par contre, des choix ont été effectués pour limiter ce sujet de recherche. Nous nous intéressons à un type de phénomène naturel (les phénomènes gravitaires rapides) dans les zones montagneuses et à la vulnérabilité de l'existant en terme de constructions et de territoires utilisés par la société. Par contre, la vulnérabilité des personnes et des constructions futures n'est que peu abordée.

Ceci montre bien que cette recherche est basée sur deux axes : l'analyse de la vulnérabilité spatiale et la mise en place de systèmes d'information pour la gestion des risques naturels, afin d'améliorer la connaissance scientifique et contribuer à l'expertise. Cela peut paraître manquer de logique, mais l'explication en est simple : l'analyse de la vulnérabilité aboutit à un besoin d'outils auquel les systèmes d'information apportent des éléments de réponse. Ainsi la démarche s'est s'orientée sur plusieurs axes, comme cela est illustré par la figure suivante :

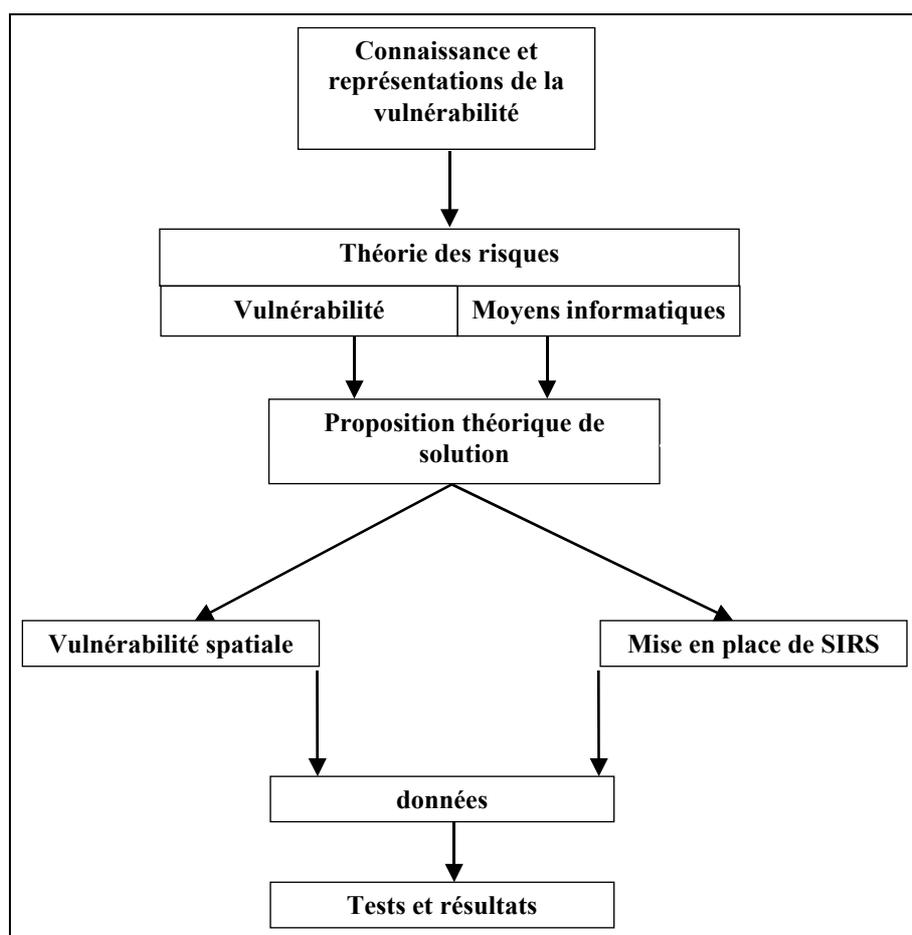


Figure 1 : démarche de recherche

Ainsi, cette thèse s'organise en quatre parties :

La première partie présente le domaine des risques naturels au travers de la définition et de la critique des concepts d'aléa et de vulnérabilité, tout en expliquant les raisons de la situation actuelle en matière de gestion des risques. Cela permet de faire un bilan des connaissances actuelles et nous permet de développer la définition de la vulnérabilité spatiale ainsi qu'un premier prototype.

La deuxième partie s'intéresse à la mise en place des systèmes d'information liés à l'analyse des risques naturels. Cela implique de s'éloigner quelque peu des risques naturels pour s'intéresser à l'informatique. Mais cette mise en place de systèmes est liée aux risques naturels en montagne, donc des réalisations et réflexions sont présentées. Ce travail nous permet d'expliquer l'intérêt de la mise en place de systèmes d'information pour les risques naturels et de définir de nouvelles orientations pour l'organisation des données spatiales.

Constatant les difficultés de mise en place de systèmes d'information, la troisième partie revient sur le développement des systèmes et traite d'une nouvelle approche conceptuelle pour que la modélisation soit plus adaptée. Il s'agit du développement de méthodes s'intégrant dans les systèmes d'information à références spatiales.

La quatrième partie présente les différents résultats issus de ce travail de recherche et d'expertise en matière de risques naturels, privilégiant l'approche par l'espace. Elle permet de développer des méthodologies et des outils prototypes à partir des aspects théoriques abordés dans les parties précédentes. L'aspect méthodologique est prédominant puisque la mise en place d'outils opérationnels nécessite au préalable des choix qui sont d'ordre sociaux.

1. Aléa et vulnérabilité pour la gestion des risques naturels en montagne

On parle de risque naturel quand il existe une possibilité de déclenchement d'un phénomène naturel destructeur, susceptible d'atteindre des biens, des personnes et des activités. Le risque décrit le niveau de dommages attendu. Ainsi, une petite chute de pierres sur une route fréquentée peut être un risque important, alors qu'une avalanche au fond d'une vallée non fréquentée en hiver représente un risque quasi nul.

Les risques sont traduits sous la forme d'une modélisation, c'est à dire une représentation schématique de la réalité présentant les relations entre les composantes du phénomène modélisé. Elle permet la formalisation d'une partie de la réalité concrète pour mieux la comprendre (Gumuchian, Marois, 2000).

Cette modélisation nous permet d'expliquer la réalité, même si dans la mesure où l'explication du monde fait partie du monde, il ne saurait exister d'explication complète. De la sorte, le modèle ne rend pas complètement compte de la complexité de la réalité (Jarrosson, 1992), et une partie de notre rôle est de l'améliorer, comme nous le verrons par la suite.

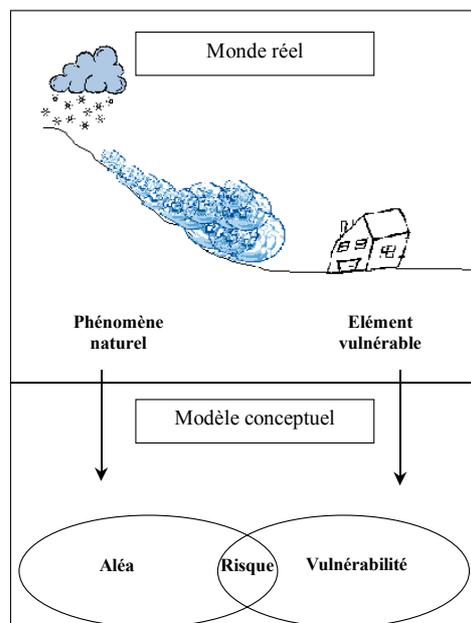


Figure 1.1 : modèle théorique des risques naturels

Cette vision théorique des risques permet une meilleure appréhension du monde réel et d'en faciliter les études.

1.1 Définir le risque naturel

Le concept de **risque** repose sur un modèle théorique. Il est la résultante de deux autres concepts : celui d'**aléa** et celui de **vulnérabilité**.

- L'aléa représente le phénomène naturel au moyen de sa fréquence et de ses descripteurs physiques ;
- la vulnérabilité exprime le niveau d'effet prévisible d'un phénomène naturel sur les enjeux.
- Les enjeux, quant à eux, représentent les personnes, biens, activités, moyens, patrimoines, etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel (MATE, 1997).

Le rapport d'évaluation des politiques publiques retient les définitions suivantes (Commissariat Général du Plan, 1997) :

- L'aléa naturel représente un événement qui a pour origine un phénomène « naturel » par opposition à un événement provoqué par une action humaine. C'est donc un événement possible qui a sa source et se développe initialement dans un milieu naturel (air, eau, sol ...).
- Le risque est un concept généré par un événement dommageable, doté d'une certaine probabilité, conséquence d'un aléa naturel survenant dans un milieu vulnérable. Le risque résulte donc de la conjonction d'un aléa et d'un enjeu ; la vulnérabilité étant la mesure des dommages de toutes sortes rapportée à l'intensité de l'aléa. A cette définition technique du risque, doit être associée la notion d'acceptabilité, pour y intégrer sa composante sociale.

Cette définition est quelque peu restrictive puisqu'elle ne définit pas vraiment les enjeux et néglige l'explication de la « conjonction » d'un aléa et d'enjeu.

Malgré ces conflits de définitions, la gestion des risques fonctionne par des mesures dites structurelles ou plus récemment, non structurelles.

1.1.1 Agir sur l'aléa ou la vulnérabilité. Mesures structurelles ou non structurelles ?

Dans la pratique courante d'analyse des risques naturels, les aléas ont été, jusqu'à une date récente, pris en compte en priorité selon une logique de suppression du phénomène (défense active) ou de ses conséquences néfastes (défense passive) faisant appel dans tous les cas à la construction d'ouvrages de protection. C'est ce que l'on nomme les mesures structurelles. Pour dimensionner des ouvrages de protection, il suffit théoriquement de bien caractériser le phénomène : on peut en quelque sorte « ignorer » les enjeux protégés par cet ouvrage.

Et pourtant la lutte contre les risques naturels s'oriente de plus en plus vers les mesures dites non structurelles pour compenser les défauts des mesures structurelles. Le terme de « mesures non structurelles » est utilisé par opposition aux mesures structurelles pour désigner tous les types d'actions qui ne relèvent pas du génie civil à usage collectif. Ces mesures visent en particulier, à modifier les pratiques d'usage et d'utilisation du sol et à réduire les enjeux (Pottier, 1998). Il s'agit essentiellement de la réglementation de l'occupation et de l'usage du sol, de la mise en œuvre de normes de construction, de la prévision des phénomènes d'une intensité anormale et en second lieu, de l'organisation des secours, de l'assurance, de l'indemnisation et de l'information du public.

Les mesures structurelles ont été longtemps la technique la plus utilisée en matière de protection. Mais dans une logique de développement durable, elles sont de plus en plus contestées. Les ouvrages de génie civil posent plusieurs problèmes : d'une part, les coûts de construction sont très élevés et d'autre part, l'entretien des ouvrages collectifs est également coûteux et souvent mal assuré car ils n'ont plus, une fois terminés, de maître d'ouvrage solvable. Par ailleurs, ce type d'approche n'est pas durable car la construction d'ouvrages de protection est une incitation à la densification des constructions en aval, d'où un accroissement de la vulnérabilité. Etant donné que la fiabilité des ouvrages n'est jamais assurée, on conçoit que cette logique, associant la construction de nouveaux ouvrages et leur « rentabilisation » par un accroissement de l'occupation du sol, mène inéluctablement à des accidents.

Dans certaines régions de montagne, le développement touristique a conduit à une forte demande de terrains constructibles nouveaux et à une densification de l'existant. Dans les zones exposées aux risques naturels, on n'a pas toujours échappé à l'engrenage décrit ci-dessus.

C'est pour cela que les approches dites non structurelles, avec en premier lieu la gestion de l'occupation et de l'usage du sol, sont considérées avec de plus en plus d'intérêt. La mise en œuvre de ces mesures implique d'être capable d'évaluer la vulnérabilité, en prenant en compte ses aspects physiques et socio-économiques.

1.1.2 Evaluer la vulnérabilité

On peut définir la vulnérabilité de façon purement physique, en évaluant les risques d'endommagement matériel de constructions données. On peut aussi dire que la vulnérabilité doit mesurer la capacité de systèmes interdépendants à fonctionner pour résister à des perturbations extérieures, même les plus imprévisibles (Theys, Fabiani, 1988), c'est à dire sa capacité à résister à un phénomène destructeur. Dans ce cas, la vulnérabilité est définie de façon beaucoup plus complète. Elle peut intégrer les risques de dommages physiques directs, mais elle comprend beaucoup d'autres éléments, comme les dommages indirects, les coûts indirects, les coûts non marchands et, d'une façon générale, tout élément d'endommagement social lié à une catastrophe éventuelle.

S'il se confirme que le principal objectif de la politique publique dans les années à venir est une réduction de la vulnérabilité (MISE, 1999), on peut en déduire que le succès de cette politique sera lié à notre capacité à construire des indicateurs permettant d'évaluer cette vulnérabilité ou, au moins, de comparer deux partis d'aménagement en étant capable de décider quel est celui qui correspond à la plus grande vulnérabilité, c'est à dire le plus sensible à un phénomène naturel. C'est ce qui nous conduit à entreprendre l'étude de la vulnérabilité dans le cadre de l'évaluation des risques naturels en montagne.

La gestion des risques naturels permet d'éviter les catastrophes, puisqu'il s'agit d'un cycle, celui de la crise :

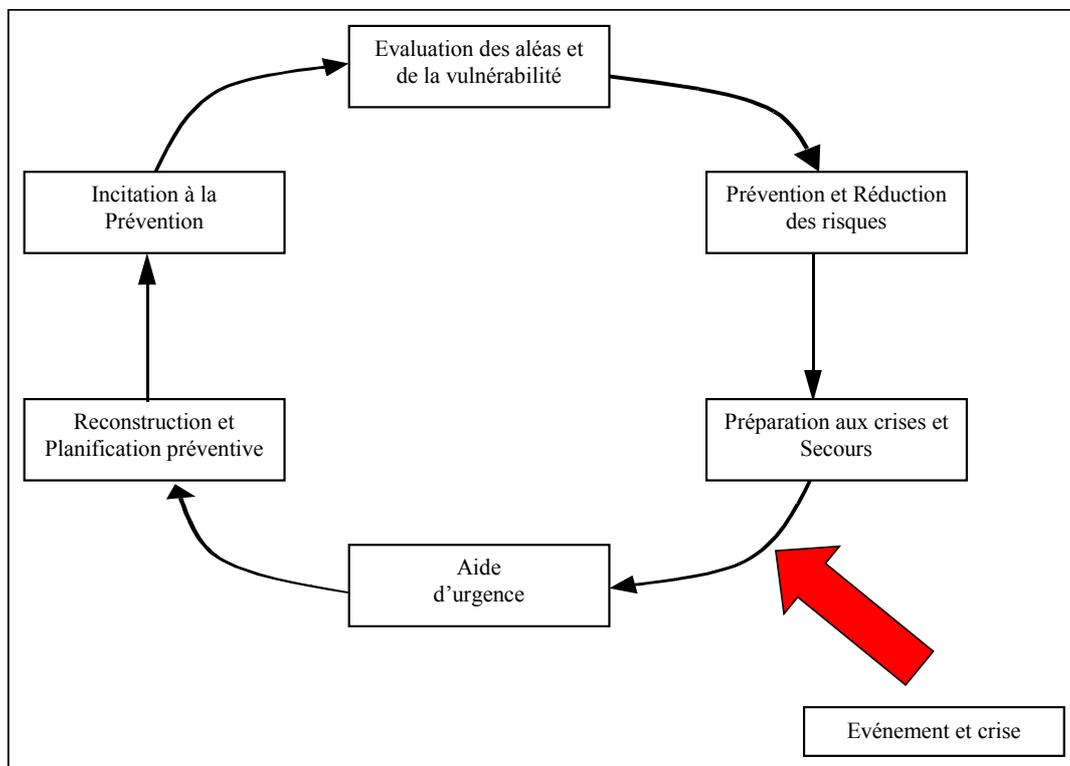


Figure 1.2 : analyse et gestion des risques (d'après Commissariat Général du Plan, 1997)

Ainsi, la connaissance des risques quels qu'ils soient, constitue un préalable fondamental à la prévention. En effet, pour mettre au point des mécanismes de prévention, il faut avant tout disposer d'une information la plus complète possible sur les données du risque considéré (Sanseverino-Godfrin, 1996).

1.1.3 Prévention ou gestion de la catastrophe

La gestion préventive des risques se situe en amont de la gestion des catastrophes. Elle cherche à éviter les catastrophes ou, à en réduire les conséquences (fig. 1.2).

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons uniquement à la gestion préventive des risques. Le domaine de la gestion de catastrophes ne sera que très peu abordé.

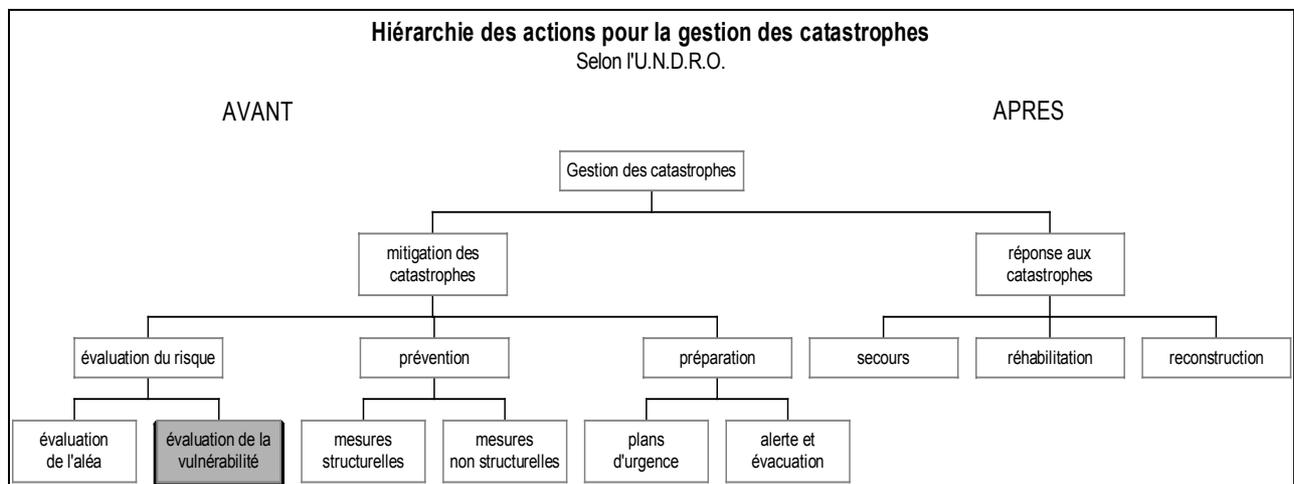


Figure 1.3 : gestion des risques et des catastrophes

Dans la suite de ce chapitre, nous allons passer en revue l'évaluation des aléas de la montagne et montrer les très grandes difficultés des approches d'évaluation de la vulnérabilité aux « risques naturels », au travers de la réglementation française et de quelques recherches prospectives.

Ensuite, nous proposerons notre réflexion sur la modélisation de la vulnérabilité faisant appel aux ressources de l'analyse spatiale. Cela nous permet d'aboutir à une méthodologie de mise en place de prototypes de Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS) descripteur de la vulnérabilité et, bien entendu, des risques.

1.2 Evaluation des aléas

Les phénomènes naturels considérés sont classés parmi ce que la communauté scientifique convient d'appeler « aléas gravitaires » ou « mouvements gravitaires rapides ». Ils affectent toutes les régions de montagne. Il s'agit des avalanches, des mouvements de terrains et des crues torrentielles.

Quelle que soit la stratégie retenue pour la lutte contre les catastrophes naturelles, il faut d'abord évaluer les aléas. Cela consiste à recenser les occurrences passées d'un phénomène inscrit dans une zone donnée, à les représenter dans l'espace, à évaluer leur fréquence à un niveau d'intensité donnée et, si possible, à utiliser ces données pour valider et ajuster des modèles à but plus ou moins prédictif. De nombreux travaux ont été menés dans ce sens. Pour les avalanches, depuis le début des années soixante-dix, il existe, sur une partie des Alpes françaises et des Pyrénées, la Carte de Localisation Probable des Avalanches (CLPA), ensemble de cartes à vocation informative. La CLPA consiste en un simple inventaire des avalanches d'une région donnée, représentées par l'enveloppe de leurs limites extrêmes connues (Borrel, 1994). Sur le même principe ont été réalisées les cartes ZERMOS (Zones Exposées aux Risques de Mouvements du Sol et du sous-sol) ; il s'agit également de documents techniques à vocation informative. En ce qui concerne les érosions torrentielles, il n'existe pas de document de ce type.

Toujours pour améliorer la connaissance des phénomènes, des approches techniques sont développées avec différentes perspectives pour chaque type de phénomène. Nous allons maintenant faire un rapide inventaire de ces travaux, de modélisation pour la plupart, qui constituent une aide non négligeable dans le but de connaître plus globalement les risques et de les représenter.

1.2.1 Les avalanches

Physiquement, il s'agit d'un mouvement rapide du manteau neigeux, à ne pas confondre avec le phénomène de reptation qui désigne des mouvements lents. En effet, dans le premier cas, la vitesse de déplacement du centre de gravité de la masse en mouvement est de l'ordre du m/s et dans le second, du mm/j. Le critère de masse déplacée est plus difficile à fixer dans la mesure où si l'on se place sur le plan des effets du phénomène, quelques mètres cubes de neige peuvent tuer une personne. On propose donc de retenir la définition de la Norme Française 95-310 : « déplacement gravitaire rapide, supérieur à 1 m/s, d'une masse de neige sur un sol en pente ».

On peut distinguer deux types d'avalanches du point de vue de la physique de l'écoulement :

- l'avalanche de neige dense : c'est un écoulement de neige qui suit le relief, présente une vitesse relativement faible (inférieure à 30 m/s) et une densité importante, de l'ordre de celle du manteau neigeux en place ;
- l'avalanche aérosol : c'est un écoulement formé par de la neige fraîche, légère et peu cohérente, accumulée sur de fortes pentes. L'écoulement est rapide (jusqu'à 100 m/s),

sous la forme d'un nuage qui résulte du mélange de l'air avec les particules de neige. Ce type d'avalanche est composé de bouffées turbulentes dont la trajectoire n'est pas entièrement déterminée par le relief. Il se forme à partir d'une avalanche de neige coulante, par incorporation d'air ambiant.

La plupart des avalanches sont dites de type mixte, ce qui signifie qu'elles ont une partie dense, surmontée d'un nuage de particule de neige. L'avalanche de neige dense est possible avec de la neige très humide et des pentes/dénivelées modérées. L'avalanche aérosol se présente sous une forme typique quand un accident de relief provoque la séparation du nuage de particules qui surmonte la partie dense. C'est un phénomène très dangereux car sa trajectoire n'est pas toujours facile à prévoir.

Cette classification du type d'avalanche fait pratiquement l'unanimité, ce qui n'a pas toujours été le cas. Par ailleurs, le phénomène se déroule sur un site géographique décomposé en trois zones (puisque faisant intervenir des stades successifs). Il s'agit de :

- la zone d'accumulation ou de départ, où se forme le manteau neigeux, en fonction des conditions météorologiques et topographiques (les deux interfèrent du fait du transport de neige par le vent). L'évolution du manteau neigeux va éventuellement permettre le déclenchement de l'avalanche (dans ce que l'on peut appeler la zone de rupture) ;
- la zone d'écoulement, lieu où le mouvement de la neige peut déposer ou reprendre de la neige ;
- la zone d'arrêt ou de dépôt, dans laquelle l'avalanche décélère d'une manière plus ou moins uniforme pour finalement s'arrêter.

Il ne faut pas confondre avec l'avalanche les phénomènes suivants :

- la reptation : déplacement lent de l'ensemble du manteau neigeux qui peut avoir une action destructrice sur les obstacles (arbres, pylônes,...) ;
- La chute de séracs : blocs de glace détachés d'un glacier surplombant qui peuvent déclencher une avalanche en zone d'arrivée.

Pour connaître cet aléa, on peut bien sûr faire des observations et des mesures sur le terrain mais, outre les risques entraînés, puisque les sites d'avalanche sont des lieux dangereux, cela ne nous renseigne que sur l'événement présent. Sur les avalanches passées et futures, cela ne sera que de peu d'utilité quant aux conditions de déclenchement, aux caractéristiques, etc. Ce travail existe, il ne vise pas à la protection mais à une meilleure connaissance du phénomène avalanche (Marco, 1994). Il existe en revanche un réseau d'observations sommaires, appelé Enquête Permanente sur les Avalanches, (EPA), qui consiste, en pratique, à relever la cote du point extrême atteint par l'avalanche¹ (Strazzeri, Manche, 1997).

Cela permet aussi de valider les différentes approches par modélisation que nous allons voir maintenant.

¹ Ce réseau est constitué d'observateurs de l'Office National des Forêts

1.2.1.1 Modélisation physique

Il s'agit d'une simulation sur des modèles réduits. Cette approche expérimentale permet d'essayer de comprendre les lois des écoulements naturels étudiés. On simule ainsi les avalanches poudreuses, mais aussi le transport de la neige par le vent qui est à l'origine d'un double phénomène de redistribution et de transformation de la neige, lequel est la principale cause d'avalanches catastrophiques. Dans les deux cas, un dispositif expérimental important est nécessaire. Dans le premier cas, il s'agit d'une soufflerie (Naaïm-Bouvet, 1997), et dans l'autre d'une cuve d'eau (l'eau remplaçant l'air en tant que milieu). Des résultats ont été obtenus sur les vitesses et les trajectoires des avalanches poudreuses, mais cela reste toujours du domaine de la recherche (Béghin, 1980).

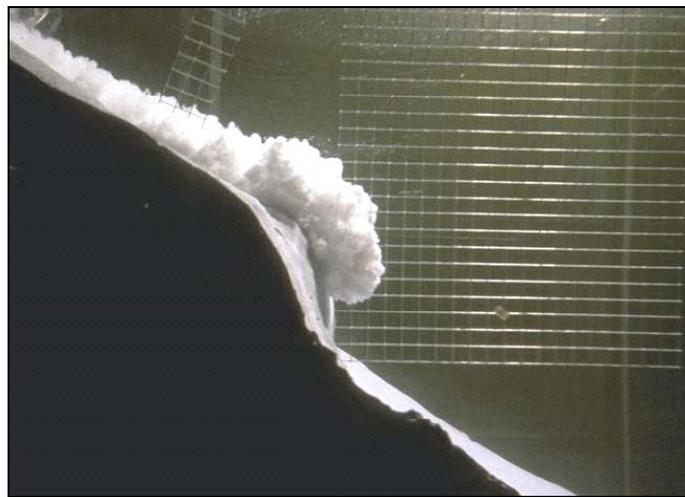


Figure 1.4 : simulation d'avalanche aérosol en canal noyé – Cemagref – P. Béghin

Les difficultés viennent souvent des conditions de similitudes entre l'avalanche et son modèle qui ne peuvent pas être respectées, car on ne peut satisfaire que deux conditions (la gravité étant imposée) alors qu'il faudrait prendre en compte beaucoup plus de critères de similitude. Ainsi, les résultats obtenus par ce type de méthode doivent être utilisés avec circonspection.

Les avalanches denses sont très difficilement reproductibles à une échelle réduite à cause d'une connaissance physique trop incomplète (Marco, 1994), ce qui reste une limite importante à ce type d'approche lorsque l'on veut s'intéresser à une mesure du risque d'avalanche.

1.2.1.2 Modélisation numérique

La modélisation numérique repose sur trois étapes. Tout d'abord, la première étape est la mise en équation du phénomène. Ces équations peuvent être conservatives ou empiriques, elles peuvent aussi être très simplifiées (Buisson, 1990). La deuxième étape consiste à mettre en place le schéma numérique capable de rendre compte du comportement des variables et des fonctions des équations. Enfin, la troisième étape consiste à résoudre les équations et à représenter les résultats.

Chaque type d'écoulement d'avalanche (dense ou poudreuse) conduit à des modélisations très différentes (Naaim, 1998).

Pour les avalanches denses, la première modélisation est celle de Vøellmy (Vøellmy, 1955). Ce modèle dynamique décrit une avalanche comme un écoulement stationnaire à surface libre en canal. La faiblesse de ce modèle est de considérer qu'une avalanche peut se réduire à son centre de masse alors que la vitesse, la densité, etc. varient au cours de l'écoulement.

Une autre difficulté provient de la rhéologie de l'écoulement qui est mal connue et qui ne peut pas être appréhendée directement. On distingue deux types de rhéologie : les écoulements de neige humide et les écoulements de neige sèche.

Dans le cas des écoulements de neige humide, un modèle rhéologique de type Bingham est utilisé. Ce dernier prend en compte l'existence d'une hauteur critique en dessous de laquelle, pour des conditions données, l'écoulement s'arrête (Martinet, 1992).

Les écoulements denses de neige sèche sont, quant à eux, considérés comme un matériau granulaire à forte concentration volumique de neige, qui peut être relativement bien décrit par un modèle de type Mohr-Coulomb.

Les avalanches aérosols, qui sont caractérisées par une forte turbulence, sont assimilées à un écoulement diphasique d'un fluide lourd, composé d'air et de particules de neige en suspension dans un fluide léger, composé par l'air seul. La modélisation est alors basée sur les équations de Navier-Stokes sous les hypothèses suivantes : l'air se comporte comme un gaz parfait à caractère newtonien, les particules en suspension ne modifient pas sa loi de comportement et elles suivent le mouvement du gaz avec un glissement vertical engendré par leur chute libre dans l'air (Lang *et al.*, 1979).



Figure 1.5 : exemple d'un résultat d'une simulation numérique – Cemagref – M. Naaim

Toutes ces améliorations apportées au modèle de Vøellmy représentent bien sûr un progrès mais plus les modèles sont complexes, plus leur « calage » nécessite la connaissance d'un grand nombre de paramètres qu'il est très difficile de mesurer, ce qui fait que leur validation reste difficile.

1.2.1.3 Modélisation statistique

Ce type de modélisation a été développé pour calculer la distance d'arrêt maximale des avalanches du fait de la difficulté d'estimer cette distance à l'aide de modèles déterministes.

Ces méthodes sont, par nature, empiriques. Le but n'est pas de comprendre en détail le fonctionnement de l'avalanche mais de déceler quelques paramètres explicatifs grâce à l'exploitation de données issues de nombreux sites d'observation. Le modèle explicatif obtenu à partir d'un échantillon de quelques centaines d'avalanches peut être appliqué aux autres avalanches d'une région donnée (Bolmont, 1992).

Deux méthodes peuvent être recensées :

- la première est basée sur une régression qui permet d'expliquer l'étendue "maximale" de l'avalanche au moyen d'un certain nombre de paramètres topographiques. Elle est communément appelée « méthode norvégienne » du fait de la nationalité de ses créateurs qui appartenaient au Norwegian Geotechnical Institute (Bakkehoi, 1980).
- la seconde est une amélioration de la première permettant une meilleure estimation de l'étendue maximale de l'avalanche : « méthode du rapport d'arrêt » (Mc Clung, Lied, 1987).

Ces deux méthodes nécessitent le calcul du profil en long du phénomène et le choix d'un point de décélération. Le point de décélération correspond généralement à un angle de pente équivalant à

10 degrés, ce qui est arbitraire mais apparemment assez efficace pour les couloirs norvégiens. Par nature, les ajustements obtenus ne valent que pour une région donnée où les paramètres nivométéorologiques et morphologiques varient dans des intervalles « raisonnables ». Ce sont donc des méthodes locales (Adjel, 1996). La méthode norvégienne s'applique à la majorité des couloirs norvégiens mais seuls 111 couloirs furent utilisés pour la mettre au point. Ceci est rendu possible par la grande homogénéité morphologique des couloirs (géologie primaire et forte érosion glaciaire).

1.2.1.4 Modélisation symbolique

Ce type de modélisation est radicalement différent des précédents. Il consiste en la formalisation des connaissances expertes acquises au cours du temps par les « experts ». L'hypothèse de départ est que cette connaissance peut être modélisée par le calcul symbolique (Buisson, 1990) pour être reproduite comme outil d'appui à l'expertise humaine. L'objectif est ici, de reproduire le raisonnement effectué par un expert face à un risque. Grâce à l'utilisation de systèmes à base de connaissances dans lesquels les règles et les connaissances recueillies auprès des experts sont insérées, une telle démarche est possible.

Cette approche a été développée dans le cadre de la mise en place d'un Environnement de Résolution de Problème : le projet ELSA (Etudes des Limites de Sites Avalancheux). ELSA s'appuie sur une structuration de la zone de départ, sous forme de panneaux, ainsi que sur un modèle empirique de transport de neige par le vent (Mases, 1997).

Cette méthode permet d'apporter des réponses pour la compréhension du fonctionnement d'un site avalancheux mais sa mise en place reste difficile du fait des lourds développements informatiques liés à la mise en place des environnements de résolution de problème. Ce type d'approche est plus ou moins abandonné pour l'instant, sauf pour les feux de forêts.

1.2.2 Les mouvements de terrain

Les mouvements de terrain sont l'un des phénomènes géodynamiques les plus répandus dans le monde. Ce sont des phénomènes naturels très complexes, qui se manifestent de façon variée en raison de la multitude de mécanismes de déformations qui sont à leur origine (érosion, dissolution, déformation et rupture sous charge statique ou dynamique).

Sous la dénomination générique de « mouvements de terrain », on regroupe des phénomènes extrêmement divers et complexes qui impliquent toujours une rupture et un déplacement simultanés de matériaux (Flageollet, 1989).

Il s'agit soit de phénomènes fréquents développant des énergies réduites ou au contraire, de phénomènes rares se traduisant par des déplacements en masse. Ils sont peu meurtriers dans les pays européens sauf pour quelques accidents historiques (comme celui du Mont Granier proche de Chambéry en Savoie ...). Ils peuvent être très dévastateurs en termes matériels et humains

dans certains pays, au même titre que les inondations auxquelles ils peuvent être associés lors de pluies très intenses (comme beaucoup de glissements de terrain en Amérique Latine).

1.2.2.1 Définition des types de mouvements de terrain

Compte tenu de la grande diversité des phénomènes de mouvements de terrain, de nombreuses classifications existent à ce jour. Celle que nous retenons ici, à titre indicatif, est basée sur le mode de déplacement dissociant deux groupes principaux : les mouvements lents et continus d'une part, les mouvements rapides et discontinus d'autre part.

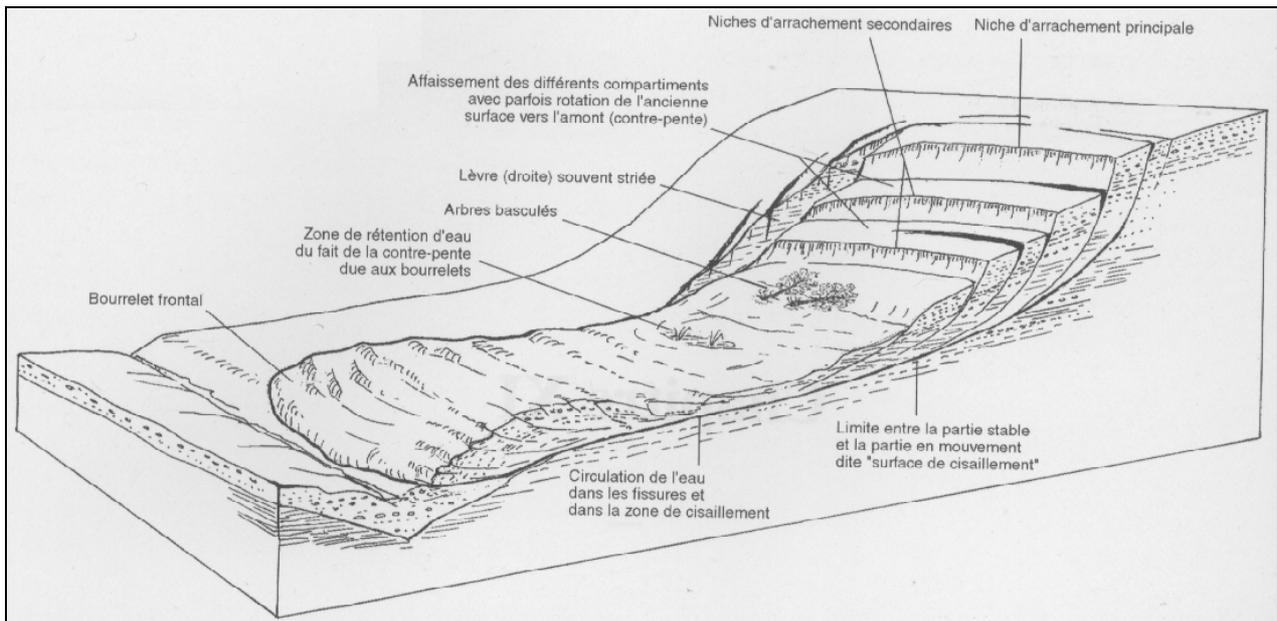


Figure 1.6 : Bloc diagramme montrant les différentes parties d'un glissement de terrain (Besson, 1996)

Selon le mode de déplacement, on distingue plusieurs ensembles de mouvements (Ministère de l'environnement, 1990) :

- Les mouvements lents et continus où la déformation n'est pas accompagnée de rupture et où aucune accélération brutale ne doit être redoutée. On retiendra particulièrement :
 - Les affaissements consécutifs à l'évolution de cavités souterraines naturelles ou artificielles (carrières ou mines), évolution amortie par le comportement souple des terrains superficiels ;
 - Les tassements par consolidation de certains terrains très compressibles (vases, tourbes) ;
 - Le fluage de matériaux plastiques sur faible pente ;
 - Le gonflement ou le retrait de certains matériaux argileux en fonction de leur teneur en eau.

- Les mouvements rapides et discontinus qui peuvent être scindés en plusieurs groupes, selon le mode de propagation des matériaux, en masse ou à l'état remanié ;
 - Les effondrements, qui résultent de la rupture brutale de cavités souterraines naturelles ou artificielles, sans atténuation par les terrains de surface ;
 - Les chutes de pierres ou de blocs, provenant de l'évolution mécanique de falaises ou d'escarpements rocheux très fracturés ;
 - Les éboulements de pans de falaise ou d'escarpements rocheux, selon des plans de discontinuité préexistants. Les éboulements peuvent atteindre des volumes considérables (plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers de m³) ;
 - Les glissements, qui correspondent au déplacement en masse le long d'une surface de rupture plane, cylindrique ou complexe, de sols peu cohérents (marnes et argiles).

En zone de montagne, les phénomènes qui nous intéressent principalement sont les chutes de pierres ou de blocs, les éboulements de falaises ainsi que les glissements. Pour ces derniers cas, plusieurs approches existent.

1.2.2.2 Modélisation des mouvements de terrain

Malgré la complexité des mécanismes de déplacement et la difficulté de modéliser les glissements de façon fidèle, il existe néanmoins plusieurs modèles mécaniques représentant des mécanismes de glissement qui sont le plus souvent applicables à des cas de figure plus ou moins simples. Cette modélisation sert alors de support à la mise en œuvre de méthodes analytiques pour un calcul de stabilité de pentes (Rezig, 1998).

Dans la même logique que le système ELSA pour les avalanches, le système XPENT (Faure, 1994) essaie de déterminer le caractère de stabilité ou d'instabilité d'un versant, à partir des données telles que : la géologie, la climatologie, les indices observables sur le terrain, dans le but de fournir une aide à la cartographie.

1.2.2.3 Les chutes de blocs

Généralement, les chutes de blocs sont considérées comme des mouvements de terrain. On distingue les chutes de blocs isolés et les écroulements en masse. Il existe une typologie des chutes de blocs (pierre, petit bloc, gros bloc, ...).

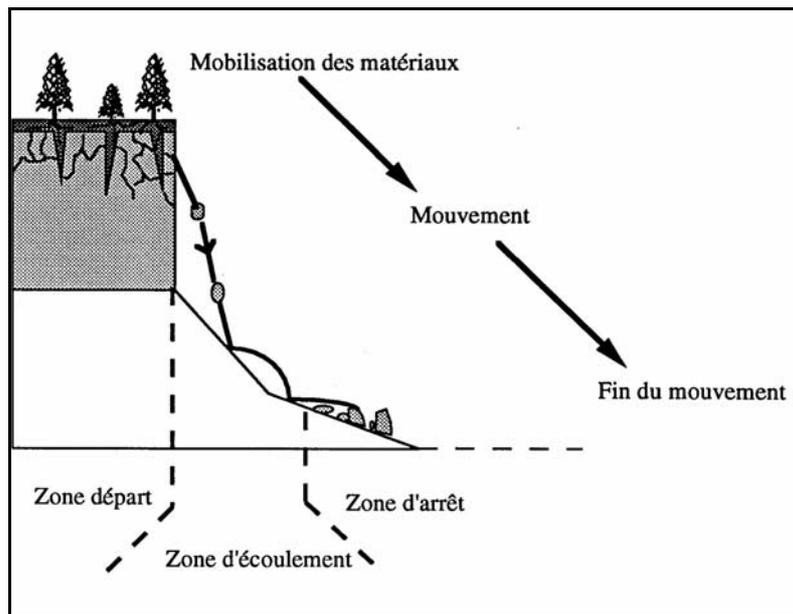


Figure 1.7 : L'aléa chute de blocs

La probabilité d'occurrence est quasiment impossible à estimer en l'état actuel des connaissances, exception faite pour quelques sites à phénomènes répétitifs pouvant donner lieu à des analyses fréquentielles. Tout au plus est-il possible d'évaluer la prédisposition d'un site à l'égard du phénomène considéré et sur une période donnée, par une approche naturaliste combinant les études historiques, géologiques, hydrologiques, pluviométriques...

Certains modèles applicables aux chutes de blocs, décrits ci-après, se présentent, néanmoins, comme probabilistes. Ils reposent, en fait, sur une approche pseudo-probabiliste qui consiste à remplacer certains paramètres mal connus par des variables aléatoires, ce qui permet de faire appel à des méthodes de type Monte Carlo et de fournir des résultats assortis d'intervalles de confiance.

L'intensité du phénomène est représentée par le volume ou la masse des blocs en mouvement auquel on peut adjoindre l'estimation de leur trajectoire ainsi que l'énergie développée par la chute. Il s'agit en premier lieu d'une approche qualitative à « dire d'expert ». L'extension spatiale du phénomène résulte aussi de l'observation mais on peut faire appel à des études de trajectographie basées sur des modèles numériques.

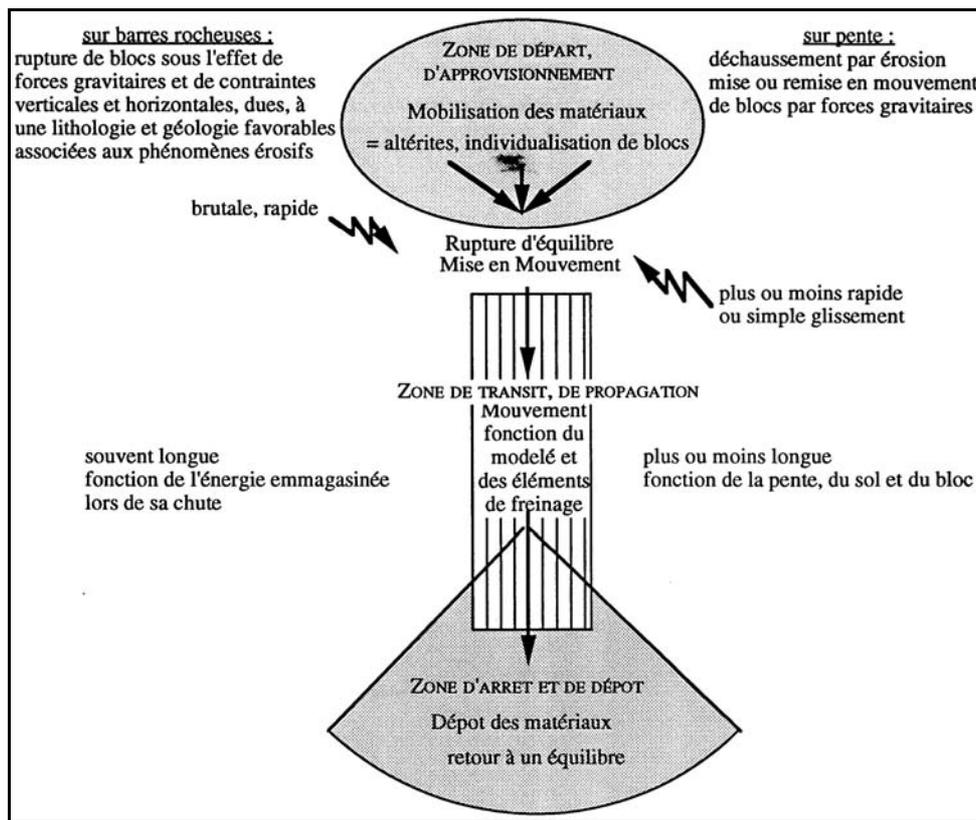


Figure 1.8 : Schéma synthétique de l'aléa chute de blocs (Cattiau, 1994)

De nombreux modèles de simulation de trajectoire de blocs ont été développés, par exemple :

- Modèle développé par le LCPC. Ce modèle demande quelques paramètres pour fixer la forme des blocs et effectue un calcul énergétique au niveau de l'impact par trois fonctions de transfert, selon la nature du sol et de la topographie. Il en résulte une seule trajectoire enveloppe ;
- Modèle de l'ADRGT. Comme le modèle précédent, il exige de caractériser les blocs pour ensuite effectuer un calcul énergétique à chaque impact, en tenant compte de la végétation et du sol rencontrés entre l'impact précédent et le présent. Entre les impacts le mouvement est considéré comme une chute libre. Il fonctionne en réalisant de nombreuses simulations pour effectuer des statistiques ; c'est un modèle à deux dimensions ;
- PIR3D de l'ENTPE². Ce dernier propose des simulations de chutes de blocs sur un terrain en trois dimensions, ce qui apporte une nouveauté par rapport aux modèles classiques qui réalisent les chutes le long d'un profil. Le modèle s'appuie sur le rebond d'une masse ponctuelle sur un triangle, le caractère aléatoire de forme du

² LCPC : Laboratoire Central des ponts et Chaussées ; ADRGT : Association pour le Développement de Recherche sur les Glissements de Terrain ; ENTPE : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (lexique des abréviations et acronymes en fin de document).

rocher et du terrain étant simulé par un cône de rebond donné pour un type de terrain (Cligniez, 1998).

De nombreux autres modèles ont été développés, comme ceux du BRGM et de l'EPFL³, qui sont des modèles tridimensionnels.

Les méthodes de calcul, toujours simplificatrices par rapport à une réalité très complexe, conduisent à être prudent dans l'interprétation des résultats. Etant donné que la plupart des modèles sont assez récents, trop peu d'éboulements se sont produits sur des sites préalablement modélisés pour permettre une validation correcte des résultats (Besson, 1996).

1.2.3 Les crues torrentielles

Les torrents⁴ sont le lieu de crues soudaines et violentes. Elles sont souvent provoquées par des précipitations elles-mêmes intense. Ce sont des crues dynamiques et rapides.

Les crues se distinguent des inondations dans la mesure où elles restent confinées dans le lit principal du cours d'eau. Suivant la nature et la morphologie du terrain, elles peuvent « s'étaler » et occuper des zones spatialement plus vastes, on parlera alors d'inondations.

1.2.3.1 Définition des crues torrentielles

La principale particularité des écoulements torrentiels, par rapport aux écoulements de rivières à faible pente, consiste en un transport de sédiments (ou transport solide) beaucoup plus important, au moins en période de crue. La pente figure au premier rang des causes de ce transport solide accru. Les écoulements, accélérés du fait de la pente, exercent des forces d'arrachements et d'entraînement des particules sédimentaires composant les lits torrentiels. A ces forces, s'ajoute la composante motrice de la force gravitaire, également augmentée par la pente. Par conséquent, même des éléments solides de grandes dimensions, jusqu'à des blocs rocheux de plusieurs tonnes, peuvent être mises en mouvement et transportés par les écoulements. Ces crues se produisent soudainement et pendant une courte durée. Elles déplacent des quantités de matériaux considérables, de l'ordre de la dizaine de milliers de mètres cubes, qui sont arrachés au lit du torrent puis déposés dès que la pente devient trop faible. Ce dépôt provoque souvent un changement de lit et finalement, de crue en crue, le balayage d'un cône de déjection torrentielle (MATE, 1999).

Les laves torrentielles ne s'étalent pas dans un champ d'inondation comme les écoulements liquides (comme les inondations de plaines). Leur soudaineté, leur charge solide considérable, le balayage de leur zone de dépôt sont des facteurs d'aléa très importants auxquels s'ajoute parfois la rareté du phénomène qui confère au torrent un aspect faussement débonnaire.

³ BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière ; EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

⁴ Un torrent est un cours d'eau de montagne, rapide et irrégulier, de faible longueur, plus ou moins à sec entre des crues violentes et brusques (Le petit Larousse Illustré - édition 1996).

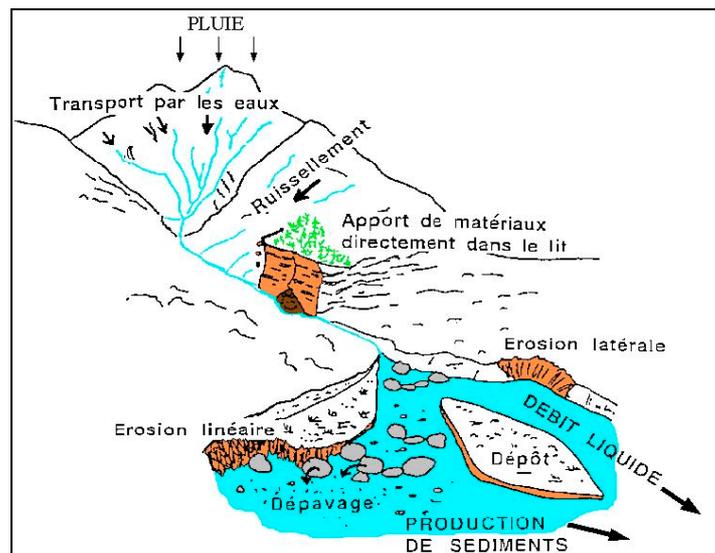


Figure 1.9 : Schéma synthétique de l'aléa crue torrentielle

Les laves torrentielles se distinguent des autres écoulements naturels à surface libre par les quatre caractéristiques suivantes (Meunier, 1994) :

- la nature du fluide en écoulement, qui est constitué d'un mélange d'eau, d'argile et de matériaux granulaires de taille variable ;
- les caractéristiques de l'écoulement lui-même, qui est rapide, transitoire et présente un front raide le plus souvent constitué de blocs ;
- d'un point de vue macroscopique, le matériau constituant une lave torrentielle se comporte le plus souvent comme un fluide homogène (pas de ségrégation entre l'eau et les matériaux solides) ce qui permet de l'étudier dans le cadre de la mécanique des milieux continus ;
- ce matériau s'écoulant généralement en régime laminaire, l'étude de ses propriétés rhéologiques revêt toute son importance.

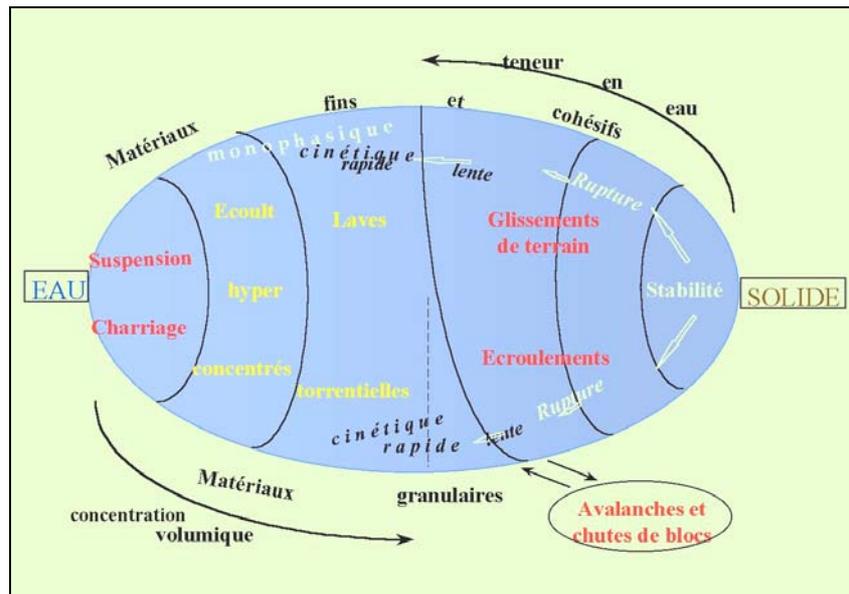


Figure 1.10 : schéma définissant les différentes laves torrentielles (Meunier, 1994)

Restent à distinguer les crues lentes de rivières ou de fleuves, des crues rapides de rivières torrentielles ou de torrents. Parmi les crues rapides, on distingue encore les crues torrentielles, les laves torrentielles et les coulées de boue :

- les crues torrentielles comprennent soit des matériaux en suspension, soit des matériaux charriés par le courant mais dont le comportement est indépendant d'un objet à l'autre ;
- les laves torrentielles sont particulières dans la mesure où chaque bloc charrié ne se déplace pas indépendamment mais fait partie d'un ensemble dont le comportement d'écoulement fluide est alors particulier ;
- la coulée de boue ressemble plus à la lave torrentielle mais est constituée de matériaux meubles, formant un amalgame assez dense dont le comportement est aussi celui d'un fluide.

1.2.3.2 Modélisation des crues torrentielles

Les conditions d'initiation des crues, des laves ou des coulées, sont les mêmes que celles des inondations. Cependant, il faut rajouter aux facteurs hydrogéologiques cités, les caractéristiques géomorphologiques et mécaniques du terrain (pente, stabilité, géologie, pédologie,...) qui favoriseront la formation ou non des phénomènes d'érosion en question.

Les coulées boueuses proviennent généralement de l'évolution des fronts de glissements sur des pentes instables. Leur mode de propagation est intermédiaire entre le déplacement en masse et le transport fluide ou visqueux.

Certains travaux menés sur la rhéologie des laves torrentielles ont permis d'établir une distinction entre des laves torrentielles granulaires à faible teneur en argile et des laves torrentielles à matrice boueuse pour lesquelles les dissipations visqueuses restent prédominantes (Coussot, 1996).

Les laves torrentielles étant des phénomènes rapides et très transitoires, seuls des modèles numériques sont en mesure de représenter les écoulements de façon suffisamment fine. Les lois d'écoulement des laves ont été introduites dans deux modèles numériques monodimensionnels et bidimensionnels, fondés sur les équations de type Saint-Venant et dont la finalité est de représenter respectivement les écoulements canalisés dans le chenal torrentiel et les étalements sur une surface quelconque telle qu'un cône de déjection. Compte tenu du peu de données disponibles sur des événements réels, les deux modèles numériques ont été validés en laboratoire par comparaison à des écoulements transitoires de fluide modèle. Il reste quelques points limitant ces approches notamment dus à une connaissance partielle des processus de débordement et des phénomènes d'initiation des laves (Laigle, 1998).

1.3 Evaluation de la vulnérabilité

Comme nous l'avons déjà vu, les travaux concernant l'évaluation de la vulnérabilité restent de très loin les parents pauvres des recherches sur les risques et la sécurité. Il n'existe pour ainsi dire aucun corpus théorique et aucun modèle de son évaluation. La plupart du temps, il s'agit d'études de cas qui ne sont pas généralisables. Mais la prévention passe par le contrôle de l'occupation du sol, donc de la vulnérabilité.

Deux approches ont abouti. La première concerne l'endommagement, qui sera repris dans le cadre de notre travail, et la deuxième est une méthode développée pour les inondations, expliquée ici à titre d'exemple de méthode fonctionnelle, puisqu'elle n'est pas applicable en l'état à un autre type de risque naturel.

Par la suite, nous exposerons de manière théorique notre approche de la vulnérabilité.

1.3.1 Endommagement

Ces méthodes quantitatives sont, pour la plupart, issues du génie parasismique. Elles se fondent sur l'élément vulnérable pour lequel il s'agit de mesurer les conséquences de la survenance d'un aléa donné (D'Ercole, 1994).

A partir de l'étude précise d'un aléa, on recense les éléments de construction présents sur l'espace pouvant être touchés. Ensuite, on évalue leur réponse à un aléa donné, ce qui constitue la phase la plus délicate de cette méthode (Chatelain *et al.*, 1994). L'endommagement traduit à la fois, en effet, les dommages physiques et fonctionnels. Un bâtiment ou un ouvrage d'art peuvent apparaître comme physiquement « intacts » et, en terme fonctionnel, être extrêmement altérés ; on peut même, dans certains cas de ce type, constater qu'il est plus coûteux de réparer que de

démolir l'existant et de reconstruire. A partir de cet exemple, on voit que l'endommagement a des aspects physiques, fonctionnels et économiques. La meilleure façon de synthétiser ces différentes approches est d'évaluer l'endommagement d'une structure comme le coût de réhabilitation, autrement dit : la dépense qu'il faut engager pour restituer à la structure ses fonctionnalités initiales, i.e. antérieures à l'accident.

Les matrices d'endommagement permettent de représenter le niveau d'endommagement, tel que défini ci-après, en fonction de l'aléa et de l'enjeu, en l'occurrence le bien considéré. Ce niveau sera mesuré par un taux d'endommagement compris entre 0 et 1, la valeur 0 étant affectée à un dommage nul et la valeur 1 à un dommage total (Leone, 1996).

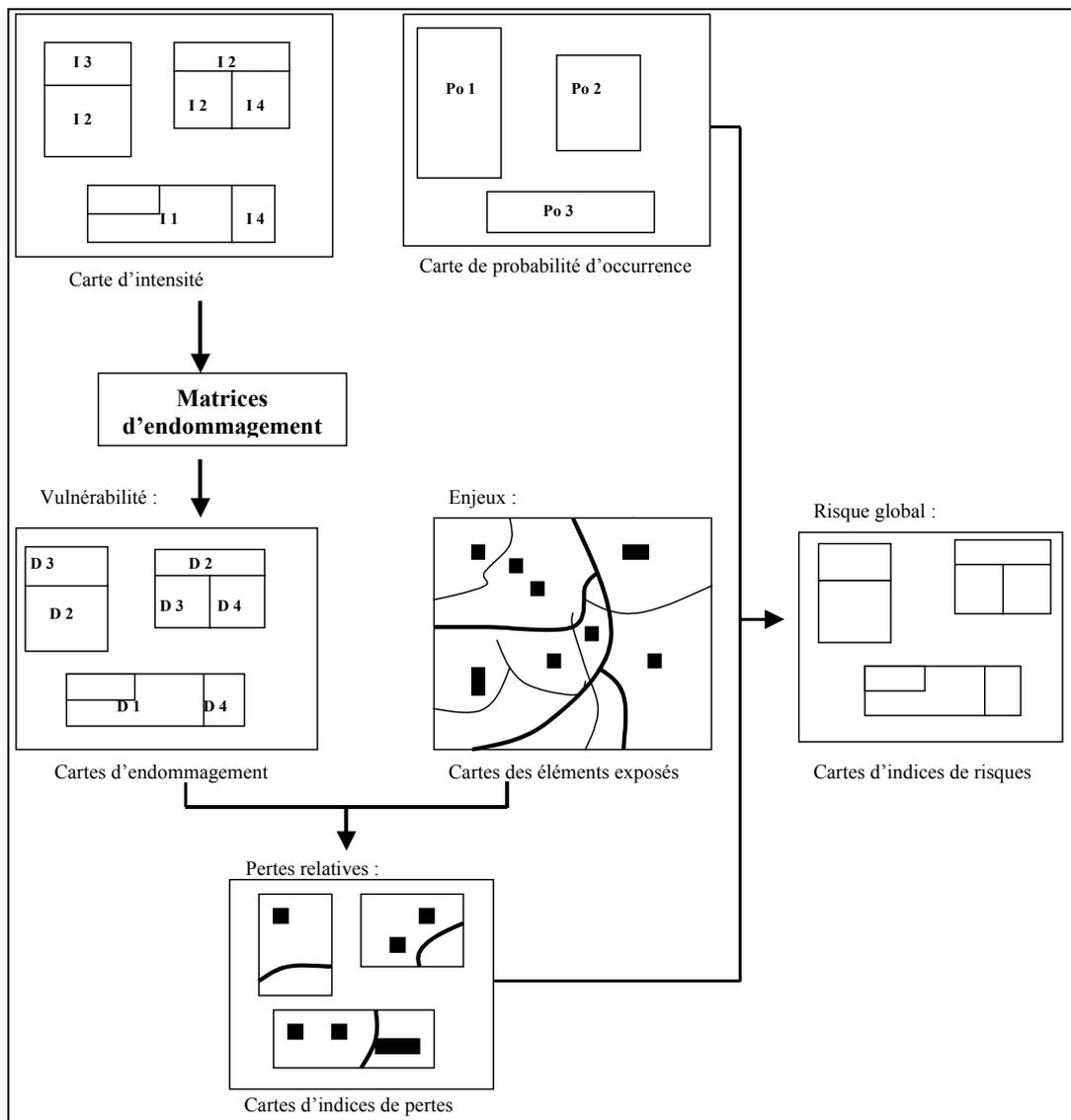


Figure 1.11 : Méthodologie d'évaluation du risque de mouvement de terrain (d'après Leone, 1992)

Les scénarios d'endommagement peuvent être affinés par des études approfondies de l'aléa et surtout par des enquêtes post-catastrophes. Ces dernières permettent aussi de mettre en valeur les

dommages indirects entraînés par un aléa. C'est la seule technique qui permet de constater la vulnérabilité indirecte *a posteriori*. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour élaborer des valeurs de référence sur des secteurs voisins (d'un point de vue spatial comme pour des similitudes internes).

L'aspect spatial est abordé de façon très fine dans cette approche puisque les matrices d'endommagement se situent au niveau de chaque élément. La généralisation de l'approche à un ensemble de constructions « réelles » (de conceptions et de fonctions hétérogènes) d'une part, disposées de façon différente par rapport à l'aléa, d'autre part, est une piste de recherche ouverte.

1.3.2 Méthodes fonctionnelles

Il existe des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité plus ou moins fonctionnelles, mais qui concernent surtout la recherche (Manche, 1997). En revanche, concernant les risques gravitaires, il n'existe pas vraiment de méthode éprouvée sinon récemment en Suisse, mais encore à l'état de prototype (BUWAL, 1999a). La seule méthode véritablement opérationnelle en France concerne l'évaluation du risque d'inondation, il s'agit de la méthode «Inondabilité».

Parallèlement à la mise en place des Plans d'Exposition aux Risques (PER), le Cemagref de Lyon a développé un modèle de gestion intégrée du risque d'inondation. La méthode dite «Inondabilité» permet de gérer le risque d'inondation à l'échelle d'un bassin versant, puisque cet aléa ne peut être combattu qu'en tenant compte de l'ensemble de l'espace concerné. Les PER ne le permettant pas, cette méthode se propose de mieux répondre aux attentes des populations.

La méthode consiste, pour un niveau d'aléa donné, à améliorer la situation collective des populations concernées.

Dans son principe, la méthode permet une meilleure distribution de la vulnérabilité, au sens où elle ne réduit le niveau de satisfaction d'aucun acteur, tout en augmentant le niveau de satisfaction de certains d'entre eux (c'est à dire la recherche d'un optimum de Pareto). Pour pouvoir comprendre et modéliser le risque d'inondation, il a été considéré que la vulnérabilité devait être défini en utilisant les mêmes paramètres que l'aléa (Oberlin *et al.*, 1993). Les caractéristiques de cet aléa sont :

- la fréquence temporelle et/ou spatiale ;
- la durée d'immersion ;
- la hauteur d'eau ;
- la vitesse du courant.

Pour chaque parcelle, on calcule une variable baptisée TAL (pour période de retour équivalente à l'aléa), qui traduit le niveau d'aléa auquel cette parcelle est soumise.

En utilisant le même principe que pour le remembrement qui consiste en l'attribution de points à chaque parcelle, cette dernière se voit dotée de la valeur maximale acceptable pour chaque paramètre. Cela s'effectue par enquêtes. Ce sont les propriétaires qui choisissent les valeurs pour l'ensemble de leur propriété (aussi bien pour les terrains agricoles que pour les immeubles). Le risque nul n'existant pas, c'est avec les populations que l'on trouve le niveau maximal de risque qu'elles acceptent (Desbos, 1995). Ainsi, la vulnérabilité, c'est à dire la somme des informations d'ordre socio-économique, est traduite en termes hydrologiques pour être confrontée à l'aléa inondation.

Pour chaque parcelle, on calcule ensuite le TOP (Taux d'Objectif minimal de Protection), c'est-à-dire le risque maximal acceptable pour chaque paramètre (fréquence, hauteur,...) qui correspond à l'utilisation de la parcelle concernée.

La comparaison du TAL et du TOP (Gilard, Gendreau, 1998) permet de définir les parcelles « sous-protégées » et les parcelles « sur-protégées ». Pour les premières, il faut réussir à faire baisser le niveau de risque et pour les autres, on peut accepter une hausse relative du risque. Les aménagements proposés peuvent ainsi consister, soit à modifier l'hydrologie et l'hydraulique (mesures structurelles classiques) ce qui a pour conséquence de modifier l'aléa, donc la répartition de la variable TAL, soit à modifier l'occupation des sols ou les demandes de protection qui y sont associées (mesures non structurelles), ce qui a pour conséquence de modifier la vulnérabilité, donc la répartition de la variable TOP (Chastan *et al.*, 1995).

Cette méthode démontre la pertinence d'un raisonnement reposant sur la notion de risque accepté, puisque le risque nul n'existe pas. L'indépendance de la variable de vulnérabilité permet de définir un seuil d'acceptabilité du risque. C'est une approche relativement nouvelle dans l'histoire de la lutte contre les risques. Pourtant, elle ne semble pouvoir fonctionner que pour le risque d'inondation, du fait des caractéristiques retenues pour la définition de la vulnérabilité. Les éléments constitutifs de la vulnérabilité, en général, peuvent difficilement être réduits à quelques paramètres pour les phénomènes brutaux qui menacent fortement des vies humaines (aléas gravitaires), ce qui complique beaucoup la mise en œuvre de la notion de risque acceptable. De plus, cette méthode ne peut fonctionner que pour les crues de plaine, puisque la méthode raisonne en volume et non pas en débit de pointe (ce qui est la seule mesure significative des crues éclair).

1.3.3 Modélisation théorique de la vulnérabilité spatiale

Comme nous l'avons vu, il n'existe pas de définition opérationnelle de la vulnérabilité.

Etant donné que la majeure partie de notre travail s'intéresse à la formalisation de la vulnérabilité au niveau spatial, nous avons dû adapter le modèle théorique expliqué dans la première partie. C'est un modèle, c'est-à-dire une représentation de la réalité élaborée en vue de la comprendre et de l'expliquer (Guarnieri, 1995). Ce modèle repose sur plusieurs concepts :

- le phénomène, c'est-à-dire la manifestation d'un agent naturel ;

- l'aléa : représente le phénomène naturel physique par, le plus souvent, sa période de retour, et ses descripteurs physiques (son amplitude, son intensité...);
- les enjeux étant les personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel (MATE, 1997);
- la vulnérabilité, qui exprime le niveau de conséquence prévisible d'un phénomène naturel sur les enjeux (Manche, 1997).

Selon le cadre théorique de définition des risques naturels, les méthodes d'évaluation de ces derniers doivent dissocier les études d'aléas d'une part, et de vulnérabilité d'autre part, comme l'illustre la figure suivante :

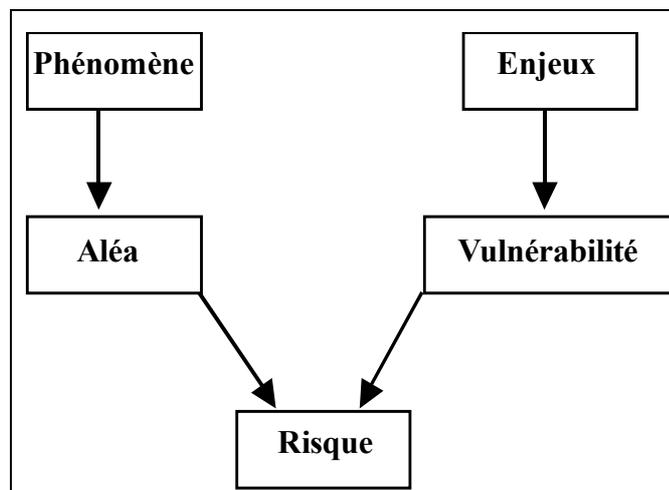


Figure 1.12 : Modèle intégré des risques naturels

Le phénomène naturel représente un événement qui s'est produit, alors que l'aléa est une construction intellectuelle censée définir un phénomène de référence (mais qui ne s'est pas forcément produit).

La vulnérabilité, notion vaste et mal définie, n'a pas encore véritablement trouvé sa place dans les différents travaux concernant les risques. Bien qu'elle soit inscrite dans les textes réglementaires, sa formalisation dans la gestion opérationnelle des risques naturels, y compris à travers les outils cartographiques, reste faible.

Comme cela a déjà été tenté pour les mouvements de terrain (Leone, 1996), il s'agit de contribuer à une meilleure évaluation de la vulnérabilité, notamment dans le cadre spécifique des risques naturels en montagne et plus particulièrement des avalanches de neige. **La vulnérabilité est ainsi considérée comme une grandeur pouvant être évaluée par le niveau constaté ou potentiel d'endommagement d'un élément exposé donné, soumis à l'action d'un phénomène déclaré ou pressenti d'intensité donnée** (Manche, 1999).

Comme on ne peut réaffecter les vulnérabilités pour les aléas de montagnes (le plus souvent des aléas rapides) comme pour les phénomènes de plaines (où l'on peut « déplacer » le risque), une évaluation de la vulnérabilité est essentielle.

Or il existe d'autres éléments de description de la vulnérabilité, à savoir la distinction entre les personnes (vulnérabilité corporelle) et les activités ou fonctions (vulnérabilité fonctionnelle). Cependant, les recherches à faire sont là d'ordre économique (voire culturel), domaines que nous n'aborderons pas. La vulnérabilité fonctionnelle est malgré tout abordée au travers de ce que nous définissons comme la vulnérabilité indirecte (marchande ou non marchande).

1.3.3.1 La vulnérabilité directe

La vulnérabilité directe est au cœur des préoccupations de la prévention. Elle est définie à partir des constructions occupant un territoire donné, décrites en termes spatial (position) et fonctionnel (à usage d'habitation, Etablissements Recevant du Public etc.). Pour les phénomènes mettant en jeu des vies humaines, la vulnérabilité doit aussi être décrite en termes de densité et de type d'occupation (COS, occupation saisonnière, annuelle etc.).

L'évaluation de la vulnérabilité directe, dans notre problématique de gestion des risques naturels en montagne, doit être améliorée au vu des catastrophes des années 1990 qui traduisent le manque de connaissance que nous avons sur les zones soumises à des risques.

Accroissement tendanciel de la vulnérabilité

La vulnérabilité a évolué très rapidement. Dans la mesure où la société est directement concernée, les changements rapides sont logiques (comme l'illustre le tableau suivant). Il est vrai que depuis une vingtaine d'années, les zones urbanisées se sont développées de manière spectaculaire et souvent anarchique, en zones de montagnes notamment. Du fait de l'essor du tourisme alpin, d'abord pour les périodes d'hiver et depuis quelque temps durant les périodes d'été, les équipements se sont multipliés. Que ce soit pour des bâtiments à usage d'habitation, des remontées mécaniques, ou encore des routes, tout a été fait pour rendre accessibles des espaces jusque-là peu recherchés en sous-estimant les risques naturels.

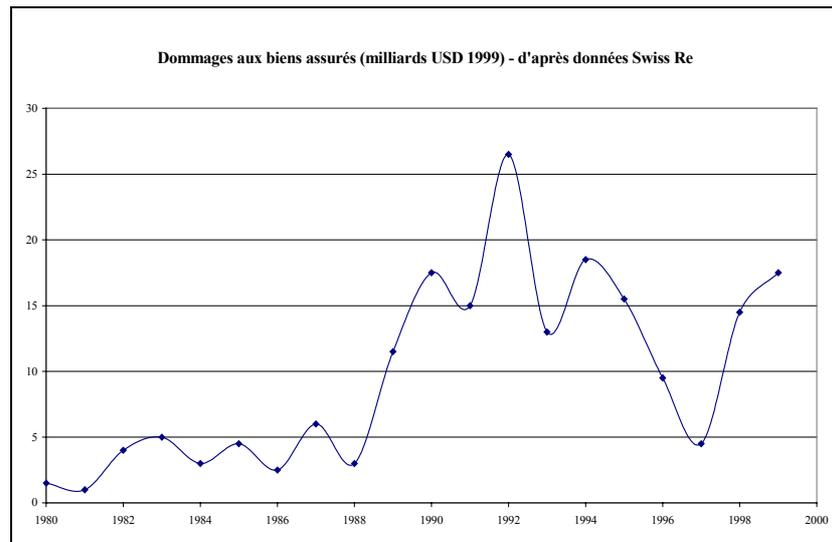


Figure 1.13 : Evolution des dommmages aux biens à l'échelle mondiale (selon la Compagnie Suisse de Réassurances)

Ainsi, les risques se sont multipliés sans que la société ne s'en rende vraiment compte. Comme il est souvent plus facile de secourir et d'indemniser que de prévenir (Ledoux, 1995), les décideurs ainsi que les habitants et/ou les acheteurs ne sont pas intervenus. L'occupation humaine de l'espace augmentant, la vulnérabilité a eu, et a encore, une croissance forte, ce qui a abouti à des catastrophes comme l'avalanche qui a traversé un bâtiment en faisant 39 morts à Val d'Isère le 10 février 1970, ainsi que le débordement torrentiel du Grand Bornand ou encore la crue rapide touchant Vaison la Romaine en 1992. Nous ne sommes pas à l'abri d'une nouvelle catastrophe de cette ampleur.

Au premier abord, s'intéresser aux bâtiments semble tout à fait naturel. En effet, ces lieux de vie sont non seulement des références sociales mais aussi apparaissent comme notre rempart le plus proche vis-à-vis de «l'extérieur». A ce titre, chacun les conçoit comme des éléments de protection, notamment contre les manifestations naturelles de notre environnement.

S'intéresser aux bâtiments pose la question de la protection de la population qui les occupe. En effet, si un bâtiment a un emplacement bien défini, il n'en est pas de même de ses occupants, qui par nature, sont avant tout mobiles. Un immeuble en zone exposée peut être dimensionné de façon à résister à des phénomènes extrêmes. Cela ne doit pas faire perdre de vue qu'il va induire un flux de circulation, piétonne et automobile, et donc une vulnérabilité humaine qu'il n'est pas question d'ignorer.

Cependant, cet aspect, c'est-à-dire une vulnérabilité prenant en compte les mouvements des populations, reste parfaitement inquantifiable sauf en imposant des consignes très strictes mais pas forcément satisfaisantes. De plus, les problèmes temporels liés aux mouvements des populations restent très difficiles à prendre en compte et sont ainsi une limite qu'il s'agit au moins de garder à l'esprit. Déplacer toutes les zones habitées potentiellement soumises à un risque est inimaginable : nous devons donc raisonner selon une notion de risque acceptable puisque, rappelons-le, le risque nul n'existe pas.

Ici, et pour permettre de faire progresser l'analyse spatiale de la vulnérabilité, nous nous sommes donc plutôt concentrés sur les aspects spatiaux entrant dans la prévision et surtout la gestion spatiale des risques naturels. **Il s'agit donc d'examiner un territoire défini par son occupation face à un phénomène donné.** A ce stade, il faut souligner que le problème n'est plus de considérer un événement réel mais de **choisir un aléa de référence.** Ceci permet de s'affranchir du facteur temporel, car l'aléa de référence n'est pas obligatoirement un événement qui s'est produit, mais un phénomène « enveloppe » construit à partir des événements connus, éventuellement avec l'aide de modèles destinés à produire de la cohérence physique. Par ailleurs, cet aléa de référence est en général un « vecteur » dont chaque composante correspond à une fréquence convenue.

Il s'agit donc de contribuer à une meilleure prise en compte de la vulnérabilité dans le cadre de la gestion des risques naturels en montagne. La connaissance de cette vulnérabilité passe par l'évaluation de l'endommagement potentiel total, composé des aspects structurel, corporel, fonctionnel et indirect, et ceci pour les différentes fréquences de l'aléa de référence.

Cela peut paraître délicat de classer les bâtiments, notamment si on se réfère au large éventail de types de constructions, en montagne comme ailleurs. La difficulté est déjà de devoir tout simplement classer ceux-ci d'un point de vue structurel ou fonctionnel. Pourtant, pour une évaluation qualitative de la vulnérabilité, une catégorisation est indispensable.

Ensuite, le niveau de découpage spatial est dépendant de la finesse de l'information disponible, et constitue un facteur déterminant pour la qualité de l'évaluation de la vulnérabilité, avec les enjeux. Le choix du découpage permet une meilleure prise en compte des hétérogénéités d'utilisation de l'espace. Donc la sélection doit se faire sur des unités spatiales les plus homogènes possible en fonction de l'échelle (Torterotot, 1993).

Nous devons donc raisonner à plusieurs niveaux de précision, en fonction de la précision des informations disponibles ainsi que du temps dont nous disposons pour réaliser l'étude. Le choix se fixe sur trois niveaux d'analyse comme cela est préconisé en Suisse (BUWAL, 1999a) tout en respectant les différents niveaux de décision de la France :

- le premier niveau s'intéresse à un niveau de précision de l'ordre du 1/25.000, recensant les objets spatiaux selon des catégories larges définissant des secteurs urbains, des périphéries, des zones d'occupation humaine dispersées, et des zones rurales ;
- le deuxième niveau est intermédiaire. Il précise les enjeux en définissant des types d'objets précis, comme le type de bâtiment (quartier à majorité d'immeubles, de maisons individuelles, etc.) ;
- enfin, le troisième niveau s'intéresse au bâtiment individuellement, en travaillant objet par objet, c'est-à-dire à un niveau de précision de l'ordre du 1/5.000.

Cela permet de travailler au premier niveau sur des fonctions de densité et, au troisième niveau, sur l'endommagement de chaque bâtiment pour ainsi construire des matrices d'endommagement

afin d'obtenir un degré de risque soit par zone, soit par bâtiment comme cela est illustré par la figure suivant :

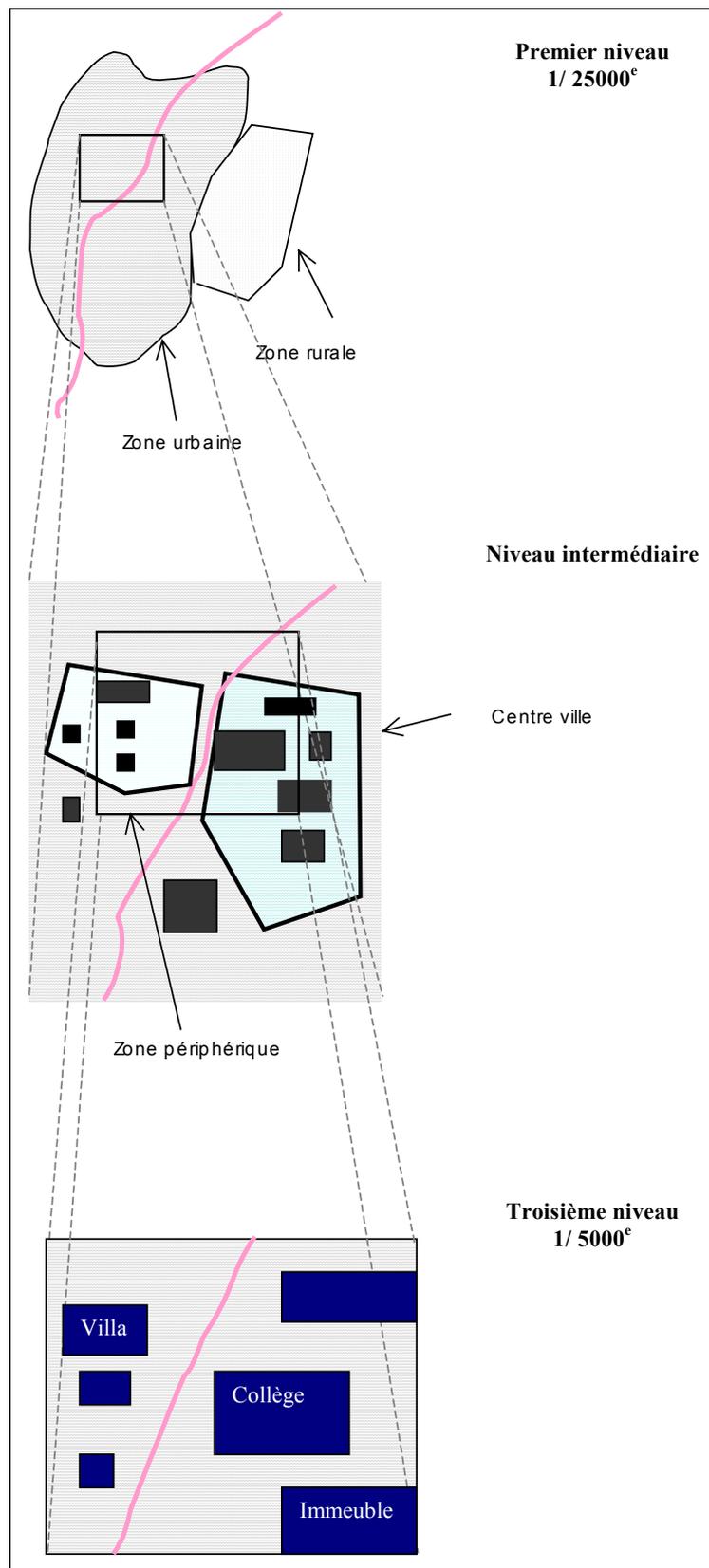


Figure 1.14 : Différents niveaux d'analyse

Ainsi, nous abordons une vulnérabilité selon trois niveaux, sachant que chaque niveau peut être défini de manière indépendante. Le choix des niveaux d'analyse dépendra alors du temps, des moyens et des ressources disponibles. Les niveaux ont des précisions spatiales très différentes et, dans l'absolu, la meilleure solution serait de pouvoir tous les parcourir, ce qui se révèle souvent impossible du fait de l'indisponibilité des données et des moyens à mettre en œuvre⁵.

Cette démarche doit être précédée de quelques étapes :

- délimiter le secteur d'analyse, géographiquement et du point de vue du contenu, en tenant compte du type de dégâts et des phénomènes dangereux ;
- définir les conditions naturelles et humaines exerçant une influence sur le secteur ;
- fixer des objectifs de l'analyse de protection. Cette phase est très importante, et ne dépend pas de l'analyse « scientifique » mais des choix des décideurs ;
- rassembler les données.

Dans un second temps, il faut analyser les dangers :

- analyser les événements, c'est à dire identifier et localiser les phénomènes ;
- analyser les effets, c'est à dire déterminer le type, l'extension et le degré de chaque phénomène, bâtir des scénarios et en faire des cartes d'intensités ou d'événements.

Cette approche sera développée dans la quatrième partie.

1.3.3.2 La vulnérabilité indirecte

Ce type de vulnérabilité est de plus loin la plus difficile à « mesurer ». Jusqu'à maintenant, elle n'a été que rarement prise en compte dans les études concernant les risques naturels. Tout comme la vulnérabilité directe, la quantification se heurte au manque de données, donc elle ne peut qu'être approchée (Manche, 1996). Tout ce qui concerne les communications est un facteur important de vulnérabilité indirecte.

Les réseaux de communication sont prépondérants dans le fonctionnement d'un territoire. La géographie d'un espace est faite de lieux, d'aires et de réseaux. Un réseau géographique comprend des lieux et des chemins qui les relie. Lieux et chemins sont en fait indissociables (Brunet *et al.*, 1992). En topologie, un réseau est formé de nœuds et de segments, de sommets et d'arcs qui représentent un graphe, ce qui permet de réaliser des traitements informatiques.

On s'intéresse ici aux perturbations fonctionnelles des réseaux qui structurent le territoire : ce sont les réseaux de transport, de distribution. Ces dysfonctionnements, ces impacts liés

⁵ Outre que le niveau le plus précis est le plus coûteux, il n'est pas nécessairement le plus intéressant pour certains acteurs de la protection qui ont besoin d'une information semi-quantitative et comparative sur un vaste territoire. A l'inverse, d'autres acteurs (les assurances) peuvent être intéressés par le niveau le plus fin.

aux difficultés de fonctionnement (échanges et communications), sont qualifiés d'impacts indirects. Ces perturbations correspondraient à des arrêts d'activités et à des ruptures de circuits économiques.

La justification du choix de notre approche par la perte d'accessibilité est renforcée par le fait que l'activité économique en zone de montagne est fortement dépendante du fonctionnement des réseaux. Ceux-ci peuvent être assimilés à des «artères», conduits des flux économiques et sont donc d'un intérêt prépondérant. Sur les versants de vallées, la vulnérabilité est dans un certain nombre de cas liée au problème de *cul-de-sac*, celle-ci s'aggravant en saison touristique avec une concentration de la population dans quelques villages pas forcément bien desservis. En Haute-Savoie⁶, par exemple, les accès à la station du Praz-de-Lys, par les routes départementales n°902, n°307 et n°328 (les seuls itinéraires possibles en hiver) ont été coupés par des coulées de neige. En conséquence de ces ruptures sur le réseau, 150 personnes furent bloquées dans une vallée voisine.

La vulnérabilité d'une zone concerne donc, non seulement la présence d'une population, de bâtiments, de terrains à valeur foncière, de réseaux exposés directement au phénomène naturel, mais aussi la manière dont tous ces éléments sont utilisés par les hommes. **L'utilisation des réseaux étant primordiale, il devient possible, grâce à une approche fondée sur l'étude des dysfonctionnements des réseaux, de faire apparaître des enjeux distants, éléments de forte vulnérabilité.**

Ainsi, l'hypothèse avancée est que l'on peut approcher le concept de vulnérabilité indirecte par la notion de perte d'accessibilité, fondée sur l'importance des réseaux de communication dans le fonctionnement du territoire et plus particulièrement en zone de montagne où de nombreux réseaux sont peu connexes, contraints par le relief (il s'agit de corridors montagneux pour certaines vallées). En conséquence, **nous pouvons nous baser sur la théorie des graphes.** Cette théorie relève du domaine de la théorie des ensembles qui concerne les relations binaires d'un ensemble avec lui-même, l'ensemble étant dénombrable (Kaufmann, 1968). La circulation routière se présente sous la forme de réseaux orientés où se déplacent des véhicules en grand nombre. Ces réseaux sont justement des graphes, donc ils peuvent être étudiés à partir de la notion de graphe. Dans notre cas, la notion de connexité est la plus importante (c'est-à-dire le niveau de relation entre les différents sommets du graphe).

Les éléments qualifiés de vulnérables sont figurés par des enjeux, c'est à dire des objets susceptibles de subir des pertes du fait d'un défaut d'accessibilité. Les impacts indirects sont aussi et surtout localisés à l'extérieur du périmètre atteint par le phénomène naturel donné. Quelle que soit la cause de la rupture sur le réseau, la perte d'accessibilité s'évalue entre plusieurs points que l'on peut considérer comme «stratégiques» (villes, gares, hôpitaux, passages de cols...) desservis par le réseau :

⁶ Événements du 19 au 21 février 1999.

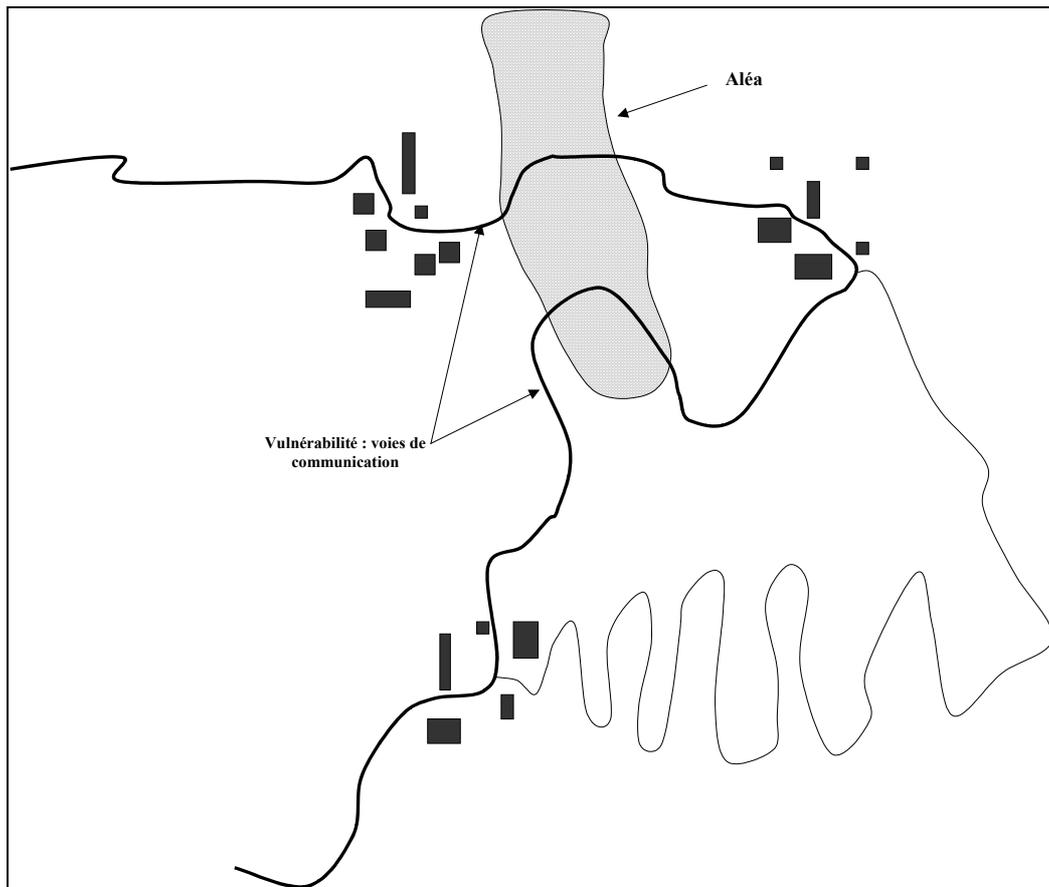


Figure 1.15 : Vulnérabilité indirecte et réseaux

Cette approche, quelque peu simplificatrice de l'étude des réseaux nous permet d'aborder le terme de risque spécifique, c'est à dire propre à une approche par les réseaux de communication (Bouleux, 1999).

Cette modélisation spatiale de la vulnérabilité a pour but, il ne faut pas l'oublier, de mesurer l'importance des risques et doit servir de base pour définir des actions à engager et donc, planifier les mesures visant à réduire le risque. Il s'agit d'assurer le meilleur rapport coût-efficacité (ou plutôt d'optimiser dans l'état des connaissances actuelles) aussi bien de la vulnérabilité que des aléas. Cela permettra d'évaluer, par secteur, le «degré» d'exposition à un risque et ainsi, de déterminer les secteurs ayant un déficit de protection (secteurs sur lesquels la vulnérabilité devra en priorité être réduite).

1.4 La mesure du risque naturel

Puisque nous avons considéré l'évaluation de l'aléa, puis de la vulnérabilité, nous pouvons maintenant aborder l'évaluation du risque.

La prévention des risques, on le rappelle, combine deux approches : les mesures non structurelles et les mesures dont il convient dans tous les cas d'évaluer l'efficacité. Nous présentons deux approches significatives : l'approche économique et une approche plus générale, l'évaluation statistique.

1.4.1 L'évaluation « économique » des risques naturels

L'évaluation globale minimale de la dépense publique en 1994 est, pour la prévention des risques naturels, de l'ordre de 2 milliards de francs (Commissariat Général du Plan, 1997). Or, l'Etat et les collectivités territoriales manquent d'outils d'évaluation économique des risques naturels. Ainsi, cette approche dite « économique » s'est développée. Par ailleurs, le montant des sinistres dus aux catastrophes naturelles dans le monde est en croissance quasi exponentielle. La France a la chance de ne pas être soumise à des catastrophes naturelles fréquentes et importantes, ce qui explique, peut-être, une partie de son retard par rapport aux pays anglo-saxons en ce qui concerne l'évaluation économique des avantages apportés par la prévention mais aucune des réflexions en cours n'a permis d'aboutir à un outil opérationnel, ni même à une procédure expérimentale.

Evaluer c'est porter un jugement sur la valeur des choses. Ainsi, l'évaluation économique des risques naturels ne se limite pas à une sommation des divers coûts et avantages dont la valeur serait objectivement connue mais, dans certains cas, il s'agit d'apprécier ces avantages ou ces coûts et déduire leur valeur par différentes méthodes (Placer *in* Munier *et al.*, 1997).

Par ailleurs, la plupart des décisions d'investissement public en matière de sécurité sont prises, entres autres, en fonction de facteurs économiques et obéissent de plus en plus aux contraintes qui s'exercent dans un système de libre échange. Si le paradigme du libre échange porte en lui ses propres limites et ses propres défauts, il serait utopique de l'ignorer et de fonder les efforts de gestion des risques naturels sur des valeurs entièrement différentes. Il est donc important d'intégrer l'évaluation économique dans les décisions ou actions de prévention des risques collectifs pour procéder aux meilleurs arbitrages, même si, au final, cette approche n'est pas suffisante puisque les décisions sont plus d'ordre politique et social qu'économique (Duclos, 1999). L'objet de l'évaluation économique est, comme beaucoup d'autres méthodes en matière de risques naturels, une aide à la décision publique (entre autres).

On peut dissocier l'approche économique en deux catégories : l'évaluation comptable d'une part, et les méthodes d'optimisation d'autre part.

L'évaluation comptable est un premier niveau indispensable, répondant à la question : « combien nous coûte vraiment la protection contre tel ou tel aléa ». On a travaillé, par exemple, sur ce que « coûtent » les accidents routiers et maintenant sur ce que coûte la pollution atmosphérique. Ces

estimations comptables, même si les résultats sont contestables, sont indispensables pour faire prendre conscience à la collectivité de ce que lui coûte telle ou telle source de risque qu'elle « préfère » ignorer. Inversement, les intérêts qui pourraient être remis en cause par une telle estimation « comptable » font tout pour s'opposer à sa mise en œuvre. Les risques naturels en sont un bon exemple.

Les méthodes d'optimisation viennent dans un second temps. Une fois que les enjeux sont posés et que l'on a fait en quelque sorte un état zéro, on doit mettre en place un cadre d'évaluation des projets d'amélioration de la situation de départ. Cette entreprise se heurte à de nombreux obstacles, dont le plus résistant est celui de la définition du critère à maximiser : peut-on définir un bien-être collectif, somme de bien-être individuels dans la mesure où cela va conduire à pondérer les intérêts des divers acteurs. Même en restant dans le domaine « technique » de l'évaluation économique, on rencontre de grandes difficultés pour affecter un coût à certains dommages quand ils sont indirects et, de surcroît, non marchands.

Cependant, l'extrême tension des budgets publics et la réticence croissante des contribuables à accepter des taux de prélèvement fiscaux de plus en plus élevés expliquent que des pays mettent en œuvre des procédures d'évaluation à base économique des investissements de protection contre les risques naturels

La science économique dispose de plusieurs méthodes d'évaluation des projets pour l'aide à la décision publique. Nous décrivons ici quelques méthodes possibles. Le choix de l'une d'elles est souvent un sujet de controverse. Cependant, elles ne sont pas forcément concurrentes et peuvent être appliquées à des stades différents de l'analyse économique (Bouzit, 1999) :

- La méthode coût - avantage

C'est la méthode la plus utilisée en évaluation économique de projet d'investissement. Elle consiste, pour chaque source de risque et chaque méthode de prévention disponible, à évaluer respectivement le coût de l'effort de prévention et de le comparer au bénéfice attendu. Trivialement, si le bénéfice l'emporte sur le coût, l'effort de prévention du risque est efficace et doit être réalisé.

- La méthode d'optimisation des fonctions de dommages

Le résultat d'une analyse coût - bénéfice (et coût - risque) est souvent exprimé en termes binaires : accepter ou refuser le projet étudié. Dans certains cas, d'autres informations sont nécessaires et souvent exigées. En effet, il peut y avoir un nombre infini de choix (variable continue) et les décideurs ont besoin de choisir un niveau de risque avant de faire un choix. Dans ce cas, c'est la détermination de la fonction de dommages qui est plus appropriée. Cette méthode a notamment été appliquée aux risques d'inondation. Les fonctions de dommages sont modélisées en relation avec les caractéristiques de l'aléa. A chaque fonction est associée une fonction de coût marginal de contrôle du risque. On cherche alors à trouver quel est le coût optimal pour la

réduction du risque. De même manière que pour la méthode précédente, l'hypothèse implicite derrière cette approche est qu'il existe un seuil optimal de risque (risque acceptable).

- Les méthodes multicritère

Les méthodes d'analyse multicritère ont été développées suite aux besoins qui se sont fait sentir dans le domaine de l'aide à la décision. En effet, les projets de grande envergure nécessitent des choix qui font bien souvent intervenir des critères peu compatibles entre eux (coût et respect de l'environnement par exemple). Les premiers développements de l'analyse multicritère étaient liés au domaine de la prise de décision environnementale (gestion des déchets, traitement des eaux, installation de décharges...).

A notre connaissance, il n'y a pas d'application des méthodes multicritères pour l'évaluation des risques naturels. Ces méthodes sont plus adaptées au cas où le nombre d'actions possibles est élevé. C'est rarement ce qui se passe pour les aménagements de protection contre les risques naturels où l'on ne dispose généralement que de deux à trois actions possibles. De plus, la mise en place d'une méthode d'évaluation multicritère est extrêmement longue et difficile.

Nous pouvons faire les remarques suivantes à propos des méthodes d'évaluations économiques pour les risques naturels :

- Il n'existe pas d'approche standard utilisée par les décideurs publics pour la France. De ce fait, les données sont très diverses et spécifiques aux cas d'études. Il y a donc très peu de possibilités de comparer les études entre elles (quand elles existent).
- Les évaluations sont généralement fondées sur une approche « d'unité de dommage », où les dommages totaux sont calculés à partir d'un niveau de dommage standard ou moyen. Les doubles comptes sont très fréquents dans une évaluation *ad hoc* et l'approche peut ne pas être extrapolable pour les événements importants. De plus, un niveau de dommage « moyen » ne correspond pas à la réalité économique.
- La collecte des données de dommages est souvent réalisée par enquête, lesquelles ne respectent pas la procédure standard des sciences sociales qu'est l'échantillonnage. Ceci conduit à des données peu fiables. Quant à savoir ce qu'est un dommage et l'évaluer, les conclusions diffèrent à chaque fois.
- Les études se focalisent sur ce qui est le plus facile à évaluer. Il est clair que les impacts le plus souvent considérés comme étant les plus importants sont surestimés par une sous-estimation des impacts différés dans le temps et l'espace (difficilement évaluables).

Chaque méthode comporte des avantages et des inconvénients. En ce qui concerne les risques naturels, la méthode coûts-bénéfices plus connue sous la dénomination de coûts-avantages, est la plus utilisée. Dans certains pays, comme le Royaume Uni et les Etats-Unis (avec la FEMA, Federal Emergency Management Agency), cette méthode est rendue obligatoire par la loi.

Comme elle permet de résumer l'approche selon un seul indicateur, de surcroît monétaire, il s'agit d'une méthode séduisante qui se généralise pour les risques naturels.

En conclusion, la méthode coût – bénéfice ne pose pas de problèmes spécifiques, mais ce n'est pas le cas en ce qui concerne l'évaluation du coût et des bénéfices de la prévention. Les raisons en sont simples :

- Premièrement, les bénéfices prennent la forme d'une réduction du risque encouru par la société. Il faut donc résoudre le problème de l'évaluation d'une réduction de risque.
- Deuxièmement, le coût et les bénéfices ne sont pas, en général, instantanés. Dans la majeure partie des cas, le coût est payé aujourd'hui, mais les bénéfices sont distribués dans le temps. Il faut donc résoudre le problème de l'évaluation des bénéfices futurs en termes actuels (Gollier, 1998).

Pour finir, la tendance actuelle du « tout économique » n'est pas forcément une solution viable. L'évaluation des impacts socio-économiques ne peut s'enfermer dans une logique coût-avantage mais doit relever plutôt d'une analyse multicritère. Les décisions de gestion du risque doivent plutôt reposer à la fois sur des calculs économiques (pertes ou bénéfices) mais aussi sur des appréciations plus qualitatives (Hubert, Ledoux, 1999). Cela peut être le recours à l'expertise, l'implication des acteurs locaux pour caractériser des désordres et des impacts, les enquêtes de terrain, la mobilisations des différentes informations disponibles, l'analyse spatiale, etc.

1.4.2 Les méthodes statistiques (d'évaluation du risque avalanche)

Une méthode fondée sur la statistique a été mise en place. Elle est issue d'anciens travaux concernant la méthode du « rapport d'arrêt » (Mc Clung, Lied, 1987). Nous la citons parce qu'elle a été expérimenté au Canada et en Islande pour contribuer au zonage du risque d'avalanche. Et les résultats, en termes de zonage, ont été intégrés à la politique de prévention.

La méthode a pour but de caractériser les pertes probables entraînées par une avalanche. Le risque est alors considéré comme une probabilité de perte matérielle ou de mort humaine et est calculé par le produit de trois composantes en prenant des valeurs comprises entre 0 et 1 (Keylock, Choquet, 1997). Les trois composantes sont :

- la fréquence définie par une probabilité temporelle et spatiale qu'une avalanche atteigne un point ;
- l'exposition, qui représente la durée durant laquelle les objets ou personnes sont potentiellement soumis au phénomène considéré ;
- la vulnérabilité, qui est alors une évaluation des dommages sur les éléments concernés.

Les avalanches sont définies selon cinq catégories (Mc Clung, Shaerer, 1993) :

- inoffensive pour les personnes ;
- pouvant ensevelir ou tuer des personnes ;
- pouvant ensevelir des véhicules et détruire de petits bâtiments ainsi que des arbres ;
- pouvant détruire des routes, de gros véhicules, de plus gros bâtiments ainsi qu'emporter une forêt sur une surface de plus de quatre hectares ;
- vaste avalanche pouvant détruire un village ou une surface forestière de plus de quarante hectares.

Nous le voyons, la définition de l'aléa avalanche est déjà largement dépendante de la vulnérabilité, donc le modèle des risques naturels n'est pas vraiment respecté puisque il n'y a pas de définition purement physique de l'aléa.

La mise en place du modèle de simulation issu de cette méthode donne pour résultat un contour de probabilité d'une avalanche selon la classification citée ci-dessus (Keylock *et al*, 1999).

Ainsi, l'évaluation du risque se fait par l'intermédiaire de la définition d'un aléa de référence déterminé, quant à lui, selon une approche statistique expliquée au paragraphe 1.2.1.3, avec les restrictions que nous avons indiquées.

1.5 Premier prototype : ArsenRisk

Lors du déroulement de ce travail de recherche, différents prototypes théoriques et fonctionnels ont été réalisés pour participer à la démarche de construction de notre connaissance sur le domaine et illustrer les notions théoriques de manière pratique.

L'exemple le plus significatif est une application nommée ArsenRisk, mettant en avant la logique du modèle théorique des risques naturels dissociant d'une part la vulnérabilité, et d'autre part les aléas.

Cet exemple est le fruit d'une collaboration entre une recherche en informatique et notre recherche, ainsi un outil complet a pu être développé. Il est basé sur une certaine idée du raisonnement spatial, et de la gestion des risques naturels.

Un système réalise un raisonnement spatial lorsqu'il contient des connaissances spatiales relatives à différents objets constituant une décomposition de l'espace, aux relations qu'ils entretiennent entre eux, et qu'il réalise des inférences à partir de ces connaissances ou en les enrichissant (Buisson, 1990). C'est à dire que nous créons de nouvelles connaissances associées aux objets spatiaux étudiés.

Les connaissances spatiales relatives à un objet consistent à donner des propriétés à cet objet qui n'ont de sens que parce que cet objet est plongé dans une structure spatiale. Ces connaissances

consistent à décrire les composants et les liaisons entre ces composants, dans un ensemble doté d'une structure et nommé, dès lors, espace.

Raisonnement sur un objet spatial n'est pas raisonner sur l'espace. En effet, pour pouvoir raisonner sur l'espace, ce dernier et sa structure doivent être présents sous la forme de plusieurs objets de cet espace. Les descriptions spatiales constituent alors un modèle spatial, sur lequel le système doit réaliser son raisonnement.

1.5.1 ARSEN : un outil générique de représentation de l'espace

L'application de modèles de simulation et de représentation de risques naturels se heurte souvent au problème de représentation du terrain. En effet, chaque programme de simulation nécessite une représentation spatiale avec des caractéristiques particulières, notamment sur l'organisation et la forme des entités géométriques utilisées. Les données généralement disponibles, comme les cartes digitalisées ou les modèles numériques de terrain, ne se révèlent souvent utilisables qu'avec un traitement de l'information spatiale pour satisfaire les besoins des modèles de simulation.

S'appuyant sur ces besoins rencontrés dans divers outils de modélisation et de simulation de risques naturels, une structure générique de données spatiales a été développée dans le but de résoudre ce problème de représentation spatiale lors de la construction d'une nouvelle application. Cette structure informatique met en œuvre les techniques compatibles des outils couramment employés pour représenter un terrain, comme les Systèmes d'Information Géographique ou les logiciels de maillage. Elle est principalement composée d'un noyau d'objets, accompagné de méthodes permettant d'engendrer la connaissance spatiale nécessaire à l'application des modèles d'analyse des risques naturels (Buisson, 1994).

Un prototype, appelé Aide à la Représentation Spatiale pour l'Environnement (ARSEN), a été développé sous forme de librairie C++ et appliqué à deux phénomènes particuliers : les chutes de blocs et les avalanches, ainsi qu'à la représentation de risque et à la perturbation de modèles de terrain (Cligniez, 1998).

1.5.2 Cartographie de l'aléa et de la vulnérabilité

A partir de la cartographie réalisée grâce aux travaux précédents (Choquet, 1995 ; Manche, 1996), nous avons mis en place le couplage aléa-vulnérabilité sous l'environnement ARSEN.

Nous définissons trois niveaux pour les aléas comme cela a été fait durant les recherches précédemment citées (avec la période d'occurrence). La combinaison des différents aléas (sur le secteur, il s'agit d'avalanches, de mouvements de terrain et de chutes de blocs) est définie en prenant la valeur maximale rencontrée par zone. Il s'agit d'une période de retour annuelle pour un aléa fort, de dix ans pour un aléa moyen et de cent ans pour un aléa faible. Cela en sachant que

la définition de périodes de retour reste très difficile puisque les informations sont la plupart du temps inexistantes. Il faut donc souvent se baser sur des modèles.

Une fois cette information collectée, nous créons une carte d'aléas comme ci-après :

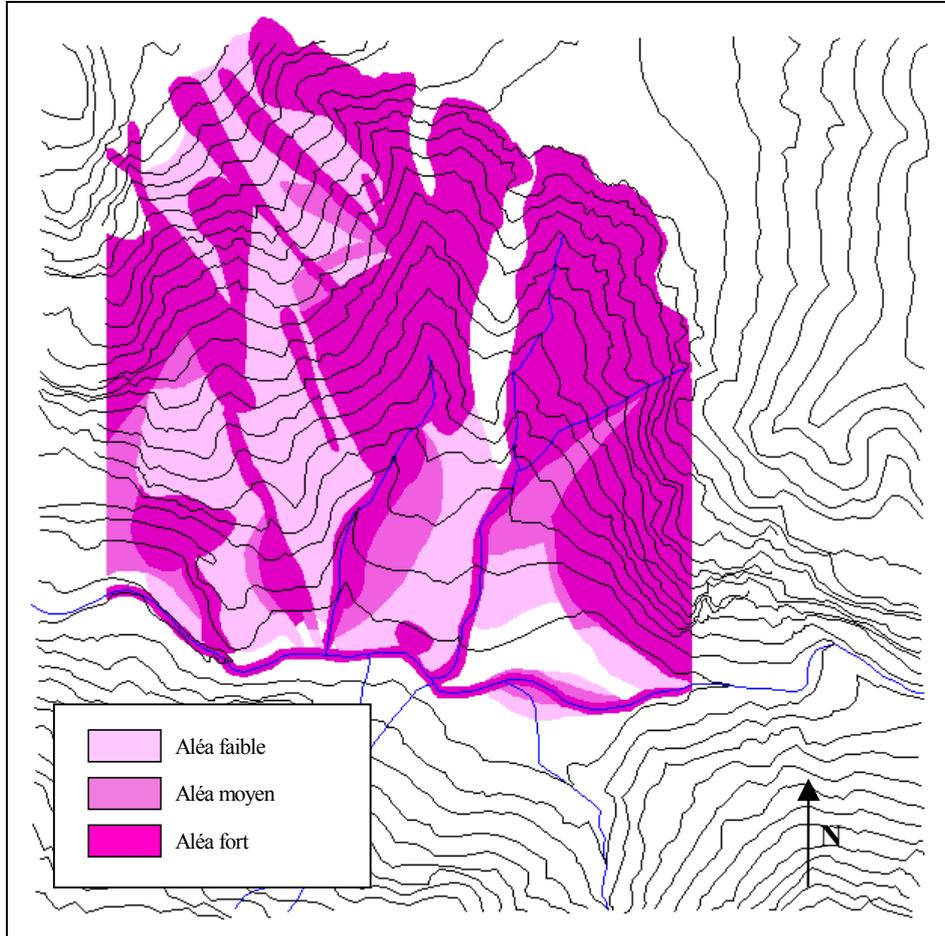


Figure 1.16 : carte d'aléa touchant la commune de Venosc (Isère)

Cette carte ne peut être considérée en soi comme une carte de risque, une étude de la vulnérabilité est indispensable.

La carte de vulnérabilité de la commune de Venosc (dans le département de l'Isère) quant à elle est reprise dans le système ARSEN en utilisant trois niveaux (fort, moyen, faible) pour pouvoir les coupler avec la carte d'aléa. L'échelle est basée sur la densité de l'occupation humaine de l'espace. Les réseaux sont seulement pris comme des objets pouvant subir des dommages, non comme des moyens de communication, c'est-à-dire que ce que l'on peut définir comme la vulnérabilité indirecte (Manche, 1996) a été négligée pour ce travail. Mais cela ne veut pas dire que cette vulnérabilité n'est pas importante. Elle n'a pas été abordée pour des raisons techniques liées au niveau de développement d'ARSEN.

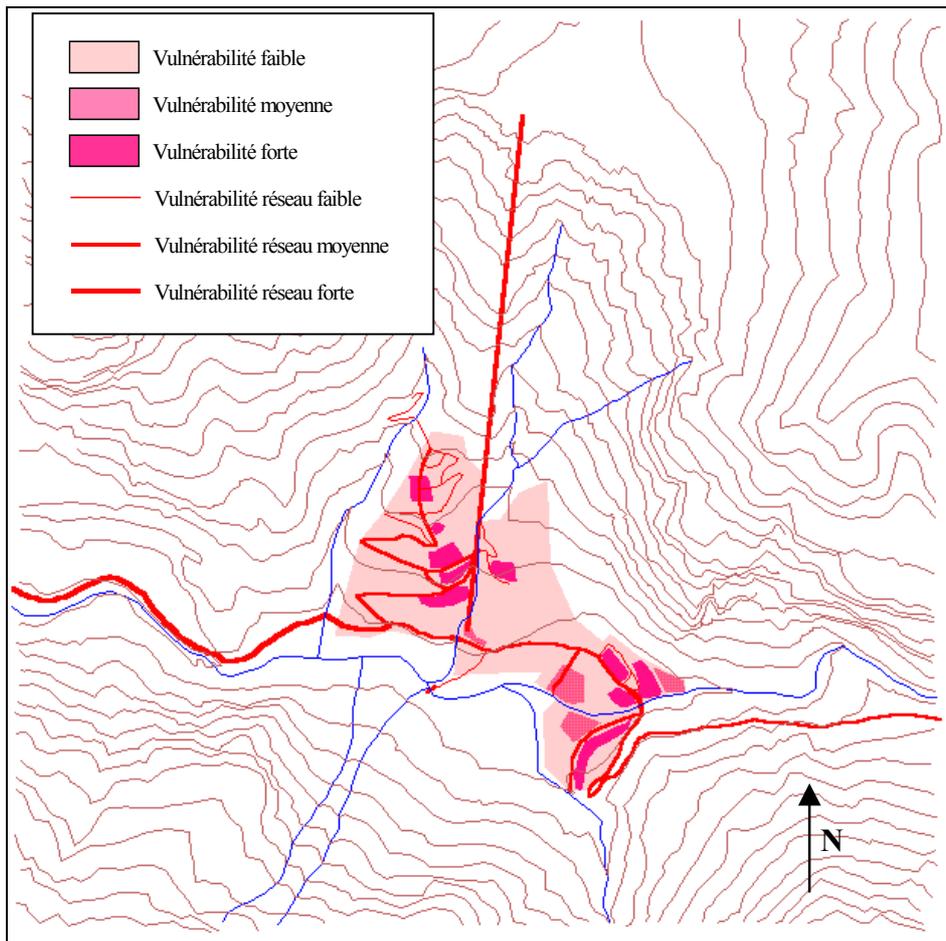


Figure 1.17 : carte de vulnérabilité

Il s'agit d'une évaluation sommaire de la vulnérabilité. Cela n'est pas gênant puisqu'il s'agit, avant tout, de tester la méthodologie et d'aller jusqu'au produit final se présentant sous la forme d'un prototype.

1.5.3 Cartographie du risque

Pour la combinaison des deux paramètres (aléa et vulnérabilité) nous utilisons une matrice intégrée à la programmation d'ARSEN. La figure 1.18 montre la matrice de combinaison qui définit le niveau de risque afin le représenter d'une façon relativement simple pour l'aide à la décision.

	Vulnérabilité forte	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité très faible
Aléa fort	Fort	Fort	Moyen	Faible
Aléa moyen	Fort	Moyen	Moyen	Faible
Aléa faible	Moyen	Moyen	Faible	Très faible
Aléa très faible	Faible	Faible	Très faible	Très faible

Figure 1.18 : définition du risque en fonction de l'aléa et de la vulnérabilité

Dans ce cas, il faut effectuer un traitement spatial de l'information afin de créer les entités (zones et lignes) qui se situent dans un secteur soumis à l'aléa et vulnérable. La figure suivante nous donne le résultat de cette combinaison spatiale.

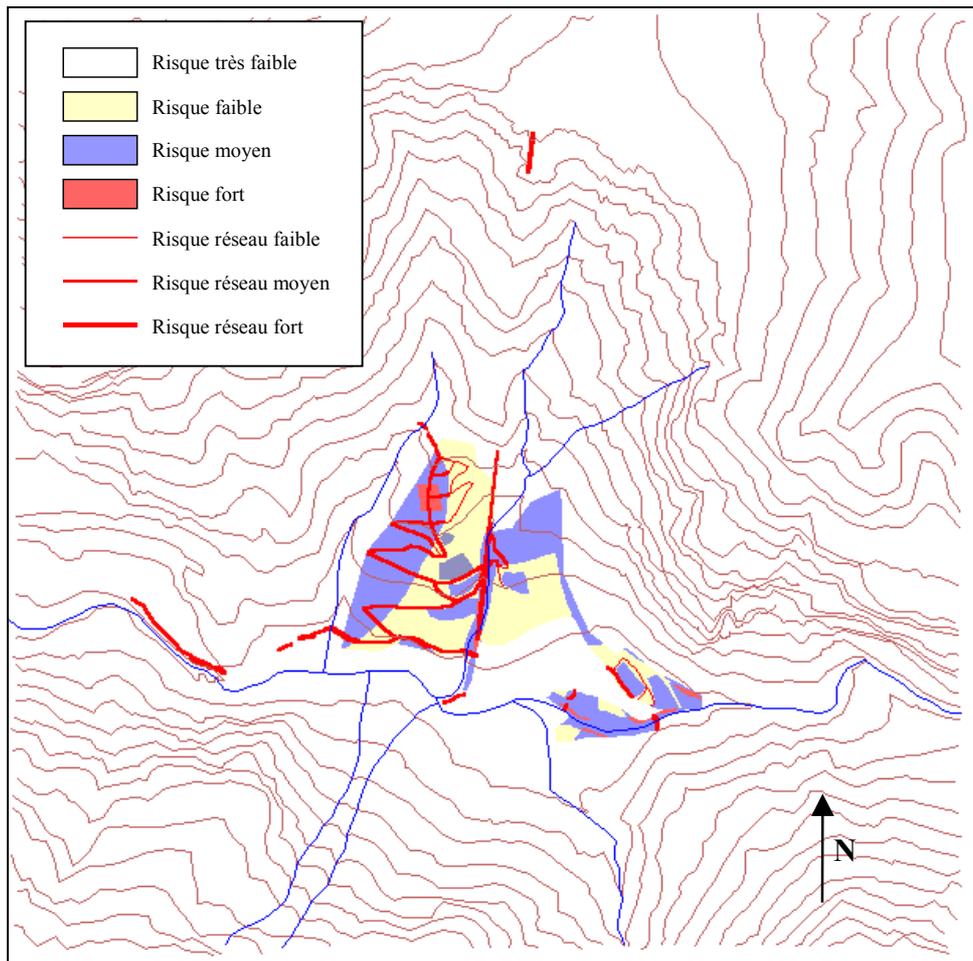


Figure 1.19 : carte partielle de risque pour la commune (en utilisant les légendes classiques en matière de définition des risques : blanc, bleu et rouge)⁷

L'automatisation du processus de croisement entre l'aléa et la vulnérabilité se présente sous la forme de trois fenêtres sous ARSEN, les deux premières étant destinées à la saisie des données sur les aléas et la vulnérabilité, et la dernière affichant le résultat du croisement entre ces deux informations :

⁷ La plupart des cartes de ce document ont été réalisées dans le cadre de développements informatiques ainsi, les représentations cartographiques présentées ne reprennent pas toujours les règles de sémiologie graphique puisqu'il s'agit avant tout de « représentations écran ».

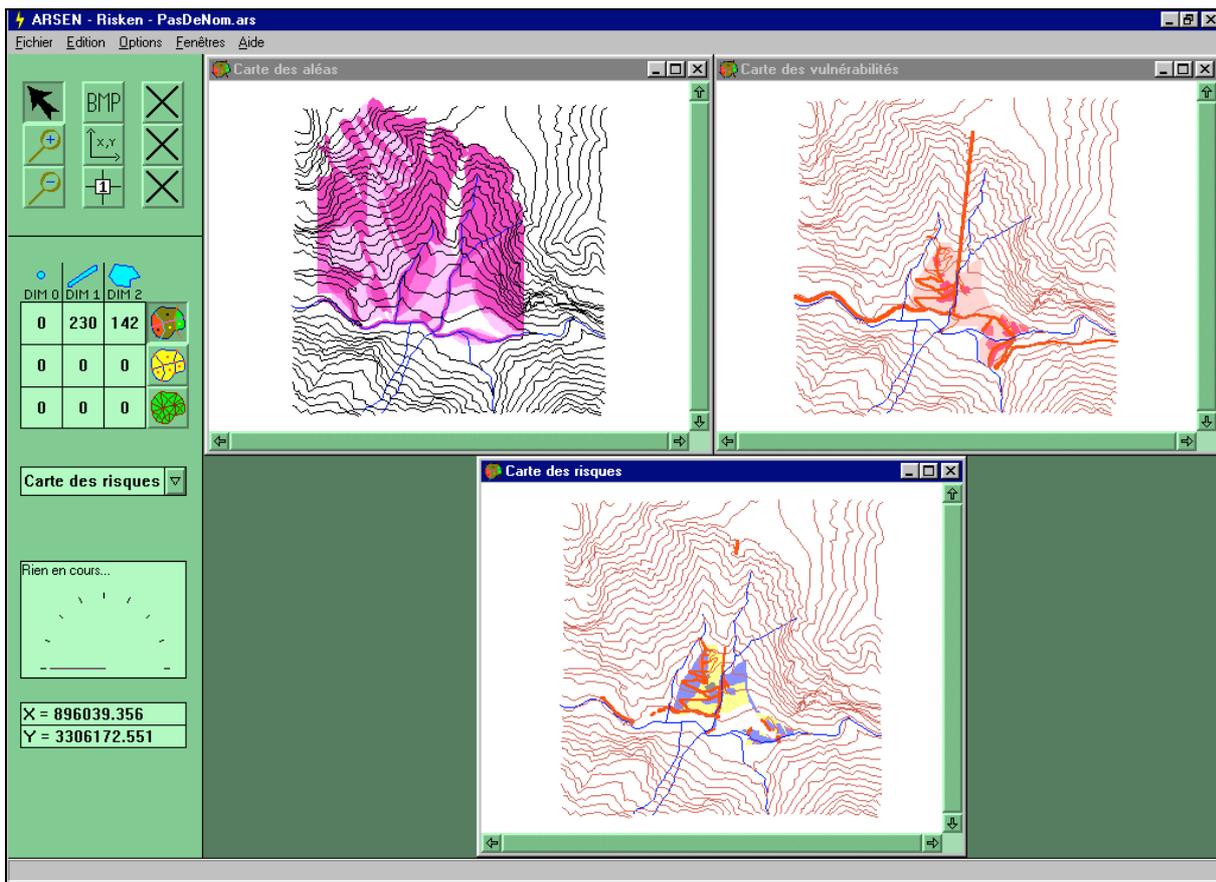


Figure 1.20 : interface graphique ARSEN

Avec ce type d'interface, qui sert surtout comme outil de travail (les cartes ne sont pas destinées à l'impression, ni à la publication), nous pouvons entrer à volonté des modifications soit des aléas, soit de la vulnérabilité et, automatiquement, le zonage du risque évoluera pour des simulations ou les mises à jour. Ainsi, cela permet une gestion rapide des risques à l'échelle d'un territoire.

Ainsi ce prototype, simplifiant les démarches en amont (pour la définition et la représentation de l'aléa et de la vulnérabilité), mais intégrant chacun des paramètres, permet de fournir une première vision de l'objectif à approcher. Son intérêt réside dans sa simplicité et dans sa lisibilité. De plus, sa construction simple permet de voir rapidement les modifications sur un des paramètres (à l'instar d'un modèle mathématique) qui seront automatiquement intégrées dans la représentation du risque. Ainsi, l'ajout, par exemple, d'un ouvrage de protection modifiant l'aléa pourra être étudié au travers de nouvelles représentations du risque.

Ainsi, la modification de la vulnérabilité ou de l'aléa (par la construction d'ouvrages de protection par exemple) est lisible et cela nous permet de définir des objectifs de protection.

Cette première implantation informatique du modèle théorique des risques naturels est théoriquement satisfaisante, puisqu'elle répond aux questions de départ, c'est à dire représenter les risques naturels en tenant compte des aléas et de la vulnérabilité. De plus, cette approche est entièrement basée sur l'analyse spatiale, ce qui permet de la rendre aisément compréhensible et

reproductible. Mais elle n'est pas entièrement satisfaisante. Pour les besoins du développement, nous avons dû trop simplifier la démarche et les phénomènes à prendre en compte.

Il s'agit d'un premier prototype qui a permis de révéler les différentes difficultés de la mise en place de SIRS pour la gestion des risques naturels. Nous avons dû trop simplifier la réalité, la vulnérabilité indirecte a été négligée, et les données utilisées sont loin d'être des informations réelles. Ainsi, un retour sur la méthodologie et les développements est indispensable, ce que nous allons voir dans les parties suivantes.

Mais auparavant, nous allons expliquer l'évolution de la gestion des risques naturels dans la réglementation française, pour bien comprendre la situation actuelle, et mettre ces travaux en perspective.

1.6 Evolution de la prise en compte réglementaire des risques naturels

Les outils développés par la recherche concernant avant tout les aléas, ce qui limite leur intérêt pour l'action publique (Commissariat Général du Plan, 1997). Celle-ci s'est néanmoins développée depuis plus d'un siècle, sans attendre le support de la recherche et en fonction des urgences, c'est à dire des catastrophes provoquées par divers phénomènes affectant divers territoires.

1.6.1 Des origines à une gestion réfléchie

En 1882, l'Etat crée le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) pour essayer de lutter contre les problèmes d'érosion en montagne provoqués par des déboisements trop importants. Cette date marque le début de l'organisation par l'Etat de la gestion des risques naturels en France. Jusque là, les risques furent d'abord subis, puis niés avec l'avènement de l'ère industrielle (Chambolle, 1988).

A l'origine, le service RTM devait lutter contre les inondations se produisant en plaine en reboisant le haut des bassins versants puisque la végétation permet de ralentir les écoulements et donc d'accélérer l'infiltration. Cette lutte, quoique limitée, prend en compte l'ensemble du phénomène sans le segmenter. C'est pourquoi seul l'Etat pouvait prendre ce genre de mesures puisqu'elles dépassent largement le niveau local jusque là responsable de la lutte contre les risques.

Mais l'instrument juridique principal de la prévention des risques naturels demeure le pouvoir de police du maire, fondé sur le code général des collectivités territoriales, articles L.2212-2 et 2215-1. Ces textes datent de la loi municipale de 1884, donnant au maire le pouvoir de police municipale, ce qui en fait le gestionnaire local de la sécurité. Le maire a ainsi à sa charge deux types de responsabilités : d'une part une obligation générale de prévention des accidents naturels et des fléaux calamiteux de toute nature qui menacent la sécurité des habitants ; et d'autre part,

une obligation spéciale de prendre en cas de danger «grave ou imminent», les mesures imposées par les circonstances (Pottier, 1998). Le préfet peut se substituer aux maires dans certaines circonstances (défaut d'action et problème intercommunal).

Les inondations sont le phénomène naturel qui a, de loin, les conséquences économiques les plus lourdes⁸ :

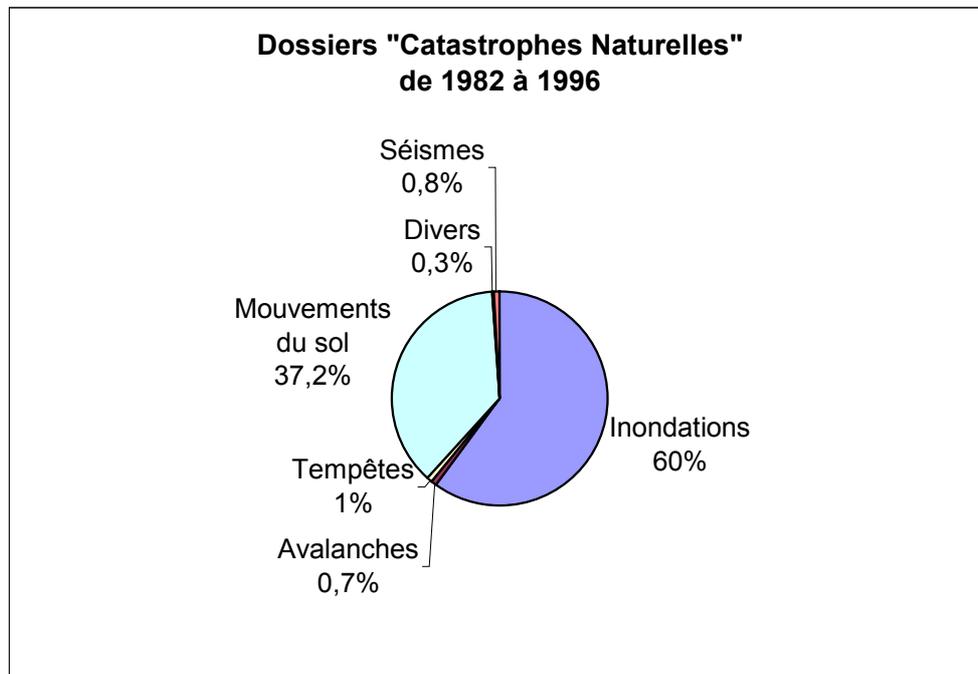


Figure 1.21 : Dossiers « catastrophes naturelles » répartis par nature de phénomène (sources : CCR)

Parmi les catastrophes naturelles, les inondations comptent, au niveau mondial, pour quelques 30% quant au coût économique. Les indemnisations sont en proportion plus faibles (18%) car beaucoup d'événements ont lieu dans des pays où l'assurance est peu développée (Bangladesh,...). En France, 80% des indemnisations des catastrophes naturelles résultaient des inondations en 1997 (Abrassart, 1997).

Aujourd'hui, un nouveau risque vient de faire « sauter la banque » représentée par le système CATNAT : il s'agit du retrait-gonflement des argiles classé dans les mouvements du sol. Ce phénomène vient en effet de conduire à une augmentation du prélèvement sur les contrats d'assurance au titre des catastrophes naturelles.

Les risques se sont multipliés sans que la société ne s'en rende vraiment compte ou bien, elle les a volontairement ignorés. L'occupation humaine de l'espace augmentant, la vulnérabilité a eu, et a encore, une croissance forte, ce qui a abouti à des catastrophes comme l'avalanche qui a traversé un bâtiment en faisant 39 morts à Val d'Isère le 10 février 1970 ; et nous ne sommes pas

⁸ Les données chiffrées proviennent des déclarations CATNAT. Il s'agit de résultats partiels, mais ce sont les seuls disponibles.

à l'abri d'une nouvelle catastrophe de cette ampleur, comme cela s'est passé à Galtür en Autriche en 1999, où 31 personnes furent tuées.

Par contre, pour les pays en voie de développement, les risques ont des conséquences souvent plus lourdes : en 1996 au Pakistan, une avalanche détruit 27 maisons et une mosquée dans le village de Bangwai faisant 36 morts et 27 blessés ou encore une coulée dans la ville de Bowo fait au moins 56 morts et 54 blessés. Cela concerne les avalanches, mais pour les mouvements de terrains, on peut citer durant l'année 1997, un mouvement en Chine, ayant enseveli des mines d'or, des ouvriers ainsi qu'un village (82 morts et 144 disparus), une érosion torrentielle en Espagne ayant submergé un camping (au moins 85 morts), etc. Pour l'année 1996, la Compagnie Suisse de Réassurances recense 341 événements naturels pour un total touchant les biens assurés atteignant 800 millions de dollars US (Zanetti, Enz, 1997). Et plus récemment, la première évaluation du coût des dommages au Venezuela en décembre 1999 est de l'ordre de deux milliards de dollars US. La liste concernant le monde est longue, sans aborder les questions d'évaluation financière complète des dégâts puisqu'il s'agit des biens assurés sans les dommages en responsabilité civile.

La France est un pays qui reste peu touché par les catastrophes naturelles de grande ampleur, mais elle possède un système réglementaire de gestion des risques très particulier que nous allons maintenant présenter.

1.6.2 Vers une mise en place de la gestion des risques

Les Plans des Surfaces Submersibles (PSS) qui sont mis en place en 1935, ont pour vocation de maintenir libres les écoulements fluviaux, donc de limiter les phénomènes d'embâcles et de débâcles, principaux responsables des catastrophes. Ces plans se sont révélés en partie inadaptés puisque les dossiers étaient traités au coup par coup, et ne prenaient pas en compte la succession d'aménagements le long des cours d'eau. De plus, ils n'avaient pas de caractère contraignant, ce qui a limité leur action.

En 1955, le code de l'urbanisme introduit des mesures générales de prévention des risques naturels : les articles R 111-2 et R 111-3 permettaient, en effet, d'interdire ou de soumettre à des conditions spéciales la construction dans les zones soumises à des risques particuliers et rendaient de ce fait nécessaire la prise en compte des risques dans la délivrance des permis de construire⁹. Apparaît pour la première fois la responsabilité de l'Etat, en cas de dommages postérieurs, s'il s'avère que le terrain construit était exposé à des risques, mais cela ne dégage pas pour autant la responsabilité de la commune, au titre de la police administrative. A l'inverse, la « perte » de valeur d'un bien du fait de son classement dans une zone à risque n'est pas indemnisée (la jurisprudence est plus nette dans ce cas que dans le cas précédent).

⁹ L'article R 111-3 stipule que :

« La construction sur des terrains exposés à un risque tel que inondation, érosion, affaissement, éboulement, avalanche, peut, si elle est autorisée, être subordonnée à des conditions spéciales. Ces terrains sont délimités par arrêté préfectoral pris après consultation des services intéressés et enquête. Le périmètre doit englober toutes les zones sur lesquelles des phénomènes suffisamment sérieux et probables sont susceptibles de mettre en cause la sécurité des constructions et de leurs occupants. »

Dans le cadre de la mise en place des dispositions s'imposant aux autorisations d'utilisation du sol, une étape capitale est franchie en 1967 avec la loi d'orientation foncière, donnant lieu à l'élaboration des Plans d'Occupation des Sols (POS). Ils instituent entre autres des zones dites ND pouvant être protégées de toute urbanisation, notamment en fonction des risques prévisibles, donc « existants ou potentiels » (ces désignations restent peu précises).

Avec ces articles précédemment cités du code de l'urbanisme (R 111-2 et R 111-3) et les POS, s'est ouverte l'ère de la prise en compte des risques naturels dans les documents d'urbanisme. Cela a entraîné de grands travaux dans les années 1970, notamment pour la vallée de la Loire, afin de réduire le niveau de risque de catastrophes lors du retour éventuel de grandes crues.

1.6.3 Le tournant de la politique de prévention en zone de montagne

Le 10 février 1970, une avalanche fait 39 morts sur la station de sports d'hiver de Val d'Isère. Cette catastrophe révèle au grand jour les enjeux de la sécurité en montagne et déclenche la mise en place d'une large politique de prévention (Ledoux, 1995). Le développement touristique des sports d'hiver a très fortement augmenté le risque en montagne. La pression foncière sur les sites de stations de sports d'hiver a entraîné la construction de bâtiments et d'infrastructures sur des secteurs plus ou moins soumis à différents aléas, et a donc créé de nouveaux risques (du fait d'une vulnérabilité accrue). En fait, les avalanches ne sont devenues un risque important pour la société que depuis qu'il existe une forte fréquentation hivernale de la montagne, c'est-à-dire depuis une cinquantaine d'années (De Crécy, 1988).

C'est au cours de la décennie 1970-1980 que les cartes des Zones Exposées aux Risques de Mouvements du Sol et du sous-sol (ZERMOS) sont réalisées par différents organismes publics spécialisés. Parallèlement se met en place la Carte de Localisation Probable des Avalanches (CLPA), carte à vocation informative.

Toujours durant cette période, les Plans des Zones Exposées aux Avalanches (PZEA)¹⁰ sont mis en place (dont la nécessité s'est vue confirmée plus tard par la condamnation de l'Etat par le tribunal administratif de Grenoble pour la catastrophe de Val d'Isère). Ces plans prenaient en compte l'intensité et la fréquence des avalanches et avaient pour mission d'intégrer les risques dans les documents d'urbanisme (sans avoir en eux-mêmes le caractère de servitude d'utilité publique). Dans ce cadre, ces plans ne sont établis que pour les zones où l'urbanisation est présente ou prévue (ils s'appuient sur les POS pour tenir compte de l'urbanisation future). Mais le zonage reste défini en fonction des aléas, la vulnérabilité n'est pas abordée.

C'est à partir de là que l'on adopta un système de trois couleurs : blanche, pour les zones estimées sûres, rouge pour celles certainement dangereuses, et bleu pour les douteuses (comme en Suisse à la même époque). Ces plans sont devenus caducs avec la loi de 1982 d'indemnisation des catastrophes naturelles, suivie du décret d'application du 3 mai 1984 instituant les Plans d'Expositions aux Risques naturels prévisibles (PER).

Les CLPA avaient, nous l'avons vu, un rôle d'information sur la présence ou non de phénomènes

¹⁰ Circulaire n°74-201 du 5 décembre 1974 relative au Plan des Zones Exposées aux Avalanches.

(étape indispensable dans toute démarche de prévention et de protection), c'est à dire qu'elles devaient fournir des renseignements aux différents acteurs gestionnaires de l'urbanisme, alors que les PZEA devaient servir comme véritable outil de prévention et de lutte contre les risques.

1.6.4 Des PER aux PPR

Le 13 juillet 1982, une nouvelle loi relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles est votée. Celle-ci, outre la mise en place du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles toujours en vigueur, contenait un second volet relatif à la prévention. C'est ainsi que sont institués les Plans d'Expositions aux Risques naturels prévisibles.

Le système d'indemnisation Catastrophe Naturelle dit «CAT-NAT» fonctionne à partir d'une prime versée par tous les assurés, fixée à un taux unique par l'Etat et appliquée par l'assureur à partir du contrat socle de l'assurance dommage. Un droit à l'indemnisation pour les assurés est ouvert après la «déclaration de catastrophe naturelle» prise sur une base communale par un arrêté interministériel sur proposition du ou des préfets. La loi ne couvre que les dommages aux biens couverts par la police d'assurance principale, donc sont exclues, par définition, les vies humaines (SCOR, 1996a). Ce système ne couvre pas non plus les biens des collectivités territoriales ni ceux des entreprises, qui doivent faire appel à d'autres formes d'assurances plus adaptées (couverture de la perte d'exploitation).

Le système mis en place au début des années 80 reposait donc sur deux mesures : le PER et CAT-NAT.

Entre 1982 et 1998, il y a eu environ 61000 arrêtés d'état de catastrophes naturelles. Un certain nombre de communes ont bénéficié plus de cinq fois ou plus d'une déclaration d'état de catastrophe naturelle (donc d'indemnisation CAT-NAT), ce qui montre que ce système n'a pas de caractère d'incitation à la prévention. On le dit un peu trop laxiste dans l'examen de la demande de déclaration de l'état de catastrophe naturelle, mais cela s'explique par le manque de précision des critères de déclaration (« intensité anormale d'un phénomène naturel... ») (Commissariat Général du Plan, 1997). Pourtant ce système, pratiquement unique au monde, permet d'apporter une indemnisation assez rapide. Ce qui est critiquable du point de vue de la prévention, c'est que la possibilité de refuser d'assurer au motif du non-respect des prescriptions des PER (maintenant PPR) n'a jamais été utilisée, alors qu'elle était inscrite dans la loi. Cela entraîne forcément une déresponsabilisation des citoyens et des assurances vis-à-vis de la prévention des risques naturels.

Le principe de l'indemnisation CATNAT était censé apporter une indemnisation rapide et proportionnée aux dommages, tandis que le PER permettait de contenir, voire de réduire la vulnérabilité. C'est le mauvais fonctionnement de cette dernière mesure qui a conduit à la dérive du système.

Le PER reposait sur l'étude de l'aléa et sur l'étude de la vulnérabilité. L'étude de la vulnérabilité consistait à simuler et à chiffrer les dommages potentiels, directs ou indirects, pour chaque niveau d'aléa défini par les études techniques. A l'origine, les PER ne devaient pas s'intéresser à la

vulnérabilité humaine, et ils ne prenaient pas en compte les risques induits par l'utilisation humaine du sol.

L'approche socio-économique du risque au travers de la vulnérabilité mise en place dans le cadre de ces plans était nouvelle. Les PER étaient les premiers véritables documents de prévention et ils ont permis de développer les connaissances des phénomènes ainsi que les méthodes de cartographie.

La définition de la vulnérabilité qui a été retenue était l'appréciation locale des dommages de toute nature encourus en cas de catastrophe due à l'aléa pris comme référence. L'étude de la vulnérabilité devait s'effectuer en amont de l'évaluation globale du risque en se fondant sur un aléa considéré comme un phénomène d'intensité donnée pris comme référence. Une fois cet aléa défini avec son intensité et son extension spatiale, il fallait définir des zones homogènes d'occupation et d'utilisation du sol soumises à l'aléa de référence (le zonage ne concernait que les espaces englobés dans l'aire d'extension de l'aléa). Ces zones homogènes sont définies selon une classification qui ne prend en compte que le bâti selon le type d'habitations et les zones d'activités (SAGERI, 1988). Une fois la valeur monétaire calculée par zone homogène, il y avait lieu d'effectuer une évaluation des dégâts potentiels en appliquant des ratios d'endommagement (fonction de l'aléa pris comme référence), le but final étant de réduire le coût des catastrophes naturelles.

Malgré cela, la vulnérabilité ne fut pratiquement jamais étudiée dans les PER (Bernard *et al*, 1993). L'évaluation monétaire se révéla trop longue et trop complexe à réaliser. En outre, l'ensemble de la méthode reposait sur une étude approfondie de l'aléa, en l'absence de laquelle la détermination de l'aléa de référence était impossible. Longues et coûteuses, ces études étaient certes une manne pour certains bureaux d'études, mais ne suffisaient pas toujours à l'établissement d'un consensus sur l'aléa de référence.

L'absence d'un financement à la hauteur de la tâche à réaliser fut le principal frein à la mise en place de ces plans. De plus, leur aspect à la fois contraignant et partenarial bloqua leur élaboration. Les communes ont très souvent utilisé leur capacité de blocage du système (grâce au renvoi au Conseil d'Etat) et beaucoup de PER n'ont pas abouti (sur 10.500 communes ayant besoin d'un plan de protection, 700 ont engagé une procédure, et seulement 307 PER ont été approuvés en 1995, année où le système a été profondément réformé).

Par ailleurs, la loi du 7 janvier 1982 inscrit au code de l'Urbanisme les Projets d'Intérêt Général (PIG). Ils ont été mis en place en partant de la constatation que chaque collectivité publique, de la commune à l'Etat, doit harmoniser ses projets d'utilisation du territoire avec ceux des autres collectivités. Une procédure de ce type était devenue nécessaire puisque les POS et les schémas directeurs sont élaborés à l'initiative et sous la responsabilité des communes ou de leurs groupements alors que, dans le même temps, l'article L 110 du code de l'urbanisme rappelle que «le territoire français est le patrimoine commun de la nation». Ainsi, les projets qui ont un caractère d'utilité publique doivent être pris en compte, ce qui est l'objet de la procédure PIG. Le décret d'application du 9 septembre 1982 précise que la prévention des risques présente un caractère d'utilité publique permettant d'utiliser la procédure PIG aux fins d'inscription dans les schémas directeurs et les POS, de mesures de prévention définies préalablement dans un projet.

Par la suite, la loi du 22 juillet 1987 crée un nouveau droit : celui des citoyens à l'information sur les risques auxquels ils sont exposés. D'un point de vue préventif, les documents prévus par le décret du 11 octobre 1990 sont le dossier d'information sur les risques majeurs établi par le préfet et le dossier d'information des citoyens, établi par le maire, sur les mesures de prévention à mettre en œuvre. Une circulaire de 1992 précise le nom et l'échelle de ces documents : Dossier Départemental des Risques Majeurs (DDRM) et le Dossier d'Information Communal des Risques Majeurs (DICRIM), ce dernier étant à la charge du maire. Elle a ajouté le Dossier Communal Synthétique (DCS) à l'échelle de la collectivité locale, établi par le préfet. Cette politique d'information du citoyen, même si elle a trouvé un écho favorable auprès des préfets comme le montre le nombre de DDRM réalisé (87 en 1996), se révèle un échec : les DCS, tout comme les DICRIM, sont encore très rares. Actuellement, leur mise en place est facilitée par une diffusion sous forme de pages Web, qui les rend donc théoriquement accessibles au plus grand nombre.

Constatant l'échec des PER, l'Etat a réorienté la politique de lutte contre les risques naturels avec la loi du 2 février 1995, relative au renforcement de la protection de l'environnement. Cette loi considère le principe de précaution comme l'un des principes généraux du droit de l'environnement. Elle en donne la définition suivante : « l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ». Ce principe, issu du droit international, a dirigé les réflexions menant à la mise en place des nouveaux plans de protection contre les risques naturels. En vertu de ce principe, les mesures de prévention ne devront pas seulement être effectives mais aussi proportionnées au risque que l'on souhaite prévenir.

Cette loi (son titre II fixe les dispositions relatives à la prévention des risques naturels) met en place de nouveaux plans : les Plans de Prévention des Risques prévisibles (PPR) qui sont des outils d'information et de réglementation en zones soumises à des risques naturels. Ils remplacent tous les outils et plans déjà existants. Les plans existants (R111-3 et PER etc.) sont automatiquement transformés en PPR, ce qui laisse une large marge de manœuvre dans l'interprétation des textes.

Cette procédure se veut plus simple et plus rapide. Alors que les PER cherchaient à induire une logique d'assurance, le PPR est avant tout un outil de régulation de l'urbanisme à la disposition de l'Etat. Il contient des prescriptions comme des interdictions, et leur non-respect est désormais sanctionné sur la base des dispositions pénales du code de l'urbanisme.

En outre, la loi apporte une solution complémentaire : les procédures d'expropriation des biens exposés à certains risques naturels majeurs (décret du 17 octobre 1995). Pour engager ce type particulier d'expropriation, une série de conditions sont exigées puisque ce dispositif ne saurait être une réponse systématique à toutes les situations de risque naturel. Les avalanches, les mouvements de terrain et les crues torrentielles sont les seuls types de risques naturels prévisibles susceptibles de faire l'objet de cette expropriation spécifique. Il faut d'autre part que l'un de ces trois risques fasse peser une menace grave sur des vies humaines (c'est à dire qu'il y ait un risque de mort d'homme), et il faut aussi que les indemnités d'expropriation soient moins coûteuses que la mise en place de moyens de sauvegarde et de protection des populations ; cette mesure a été peu appliquée à ce jour.

Il apparaît nettement que l'ensemble de ces textes entre dans une logique de recentralisation de la démarche de protection contre les risques naturels. En effet, les PPR sont prescrits par les préfets. Les risques naturels représentent en fait l'un des domaines de prescription qui permet à l'Etat de contrôler le développement des collectivités territoriales. Pour ce qui est des enjeux, leur appréciation résulte principalement de la superposition de la carte des aléas et des occupations du sol, actuelles ou projetées, par l'intermédiaire du POS. On définit des zones uniquement par rapport à l'aléa.

Les nouveautés des PPR sont : la prise en compte des vies humaines avec la possibilité de prescrire des règles d'urbanisme mais aussi de construction, et d'imposer des travaux sur l'existant. Par exemple, il peut s'agir de modification de la position d'un transformateur électrique. Ces travaux doivent être réalisés dans un délai de cinq ans, et ne doivent pas dépasser un montant équivalent à 10% de la valeur du bien (il n'y a pas de jurisprudence puisque les PPR actuels ont moins de cinq ans).

Ces règles sur l'existant qui peuvent être mises en place avec les PPR laissent un grand vide entre, des petits travaux n'excédant pas 10% de la valeur des biens pour assurer une meilleure protection et l'expropriation. Par ailleurs, il est facile pour un propriétaire de se faire établir un devis exorbitant de « mise en sécurité » de son bien, ce qui lui permet de montrer que cette mise en sécurité n'est pas possible dans l'enveloppe des 10%.

1.7 Conclusion

La politique publique de gestion des risques naturels s'oriente de plus en plus vers un contrôle de la vulnérabilité, ce qui signifie en un premier temps son plafonnement et en un second temps sa réduction. Cette action est délibérément orientée vers un traitement du bâti existant, ce pour quoi les outils d'urbanisme disponibles sont assez peu efficaces.

Le contrôle des risques naturels en montagne passe impérativement par une bonne connaissance spatiale de la vulnérabilité et des aléas. Les connaissances spatiales concernent toutes des propriétés d'ensembles ou d'éléments. Pour que ces connaissances aient un sens dans une démarche d'analyse spatiale, il faut que les ensembles soient clairement définis (Buisson, 1990).

La combinaison des méthodes classiques d'évaluation des risques naturels et de la modélisation spatiale apporte des réponses en matière de prise en compte de la vulnérabilité dans l'étude des risques naturels, comme nous l'avons vu avec ArsenRisk. En définissant des mesures qualitatives ou quantitatives des enjeux concernés par l'intermédiaire de la modélisation de la vulnérabilité spatiale, la notion d'espace vulnérable devient pertinente à la fois physiquement, géométriquement et sémantiquement.

Ainsi, il est pertinent de construire un Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS) pour la gestion des risques. Cela répond à un certain nombre de questions, tout en posant de nouvelles¹¹, que nous allons aborder maintenant.

¹¹ La mise au point de tels outils nécessitera certainement de nouveaux instruments d'urbanisme.

2. Une gestion plus globale des risques naturels : analyse spatiale et Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS)

La mise en place de SIRS et l'analyse spatiale impliquent de raisonner sur l'information géographique. Il s'agit de l'information sur les lieux ou, de l'information localisée. Il est possible de réaliser deux types de traitement sur ces données, soit un traitement géographique qui tient compte de la localisation, soit un traitement non géographique qui ne prend pas en compte cette localisation (David, 1991).

Reprenant B. David (David, 1991), **nous définissons une information géographique comme une information localisée sur la surface du globe terrestre, pour laquelle il est possible de réaliser des traitements tenant compte de sa localisation.** Donc, quel que soit le type d'application envisagé, le modèle de données prend en compte l'aspect spatial (localisation, forme, et relations topologiques des entités gérées).

Il s'agit donc d'intégrer un ensemble de données géographiques dans un système pour ensuite réaliser des traitements en analyse spatiale. Cette analyse correspond à l'ensemble des méthodes visant à préciser la nature, la qualité et la quantité d'informations attachées aux lieux et aux relations qu'ils entretiennent, en étudiant simultanément leurs attributs et leurs localisations (Brunet *et al*, 1992). Cela nous permet de raisonner sur une structure spatiale adaptée à notre problématique de gestion des risques naturels en montagne.

Rappelons que classiquement, les systèmes d'information doivent assurer les fonctions suivantes (Braesch, Haurat, 1995) :

- produire des informations légales ou quasi-légales réclamées par l'environnement socio-économique ;
- déclencher des actions programmées à la suite de l'apparition de certains événements (c'est le résultat des analyses) ;
- fournir aux différents intervenants des informations pertinentes pour leur permettre de réagir face aux sollicitations auxquelles ils sont soumis ;
- permettre une communication des informations entre les intervenants afin d'assurer une bonne coordination des activités.

Comme l'étude et la gestion des risques naturels se heurtent souvent aux problèmes de recensement, d'organisation et de représentation des données disponibles sur un site particulier, les SIRS sont des outils parfaitement adaptés. Ces données sont à la fois de nature hétérogène et issues de sources très variées, ce qui complique leur traitement et leur utilisation, tout en rendant la mise en place de SIRS fonctionnels difficile puisque nous nous situons aux limites actuelles de la technologie informatique concernant les données spatiales.

Cette section aborde les développements informatiques liés aux données géographiques, ainsi que les nouveaux outils d'aide à la gestion basés sur les données géographiques dans une perspective de gestion des risques naturels.

2.1 Introduction : mise en œuvre de SIRS

L'origine des SIRS vient de la cartographie. Ce domaine a subi de profondes mutations depuis l'apparition de supports numériques adaptés au stockage des informations géographiques. Les bases de données géographiques sont en pleine expansion, ainsi que les SIRS qui permettent de les exploiter (Jones, 1997).

Pour répondre à ces nouveaux besoins, les données cartographiques numériques ont évolué vers des données géographiques qui n'étaient plus le reflet d'une carte mais une abstraction du monde réel, ce qui a abouti aux bases de données géographiques.

Un des intérêts de disposer d'informations géographiques sous une forme numérique est de pouvoir accéder à une grande diversité d'informations (au sein d'une même base de données ou sur plusieurs). Comme on est de moins en moins limité en quantité d'informations à stocker, les données géographiques deviennent utilisables. Les bases de données géographiques manipulées au moyen de système d'information (géographique ou non) permettent de nouvelles applications difficilement réalisables au moyen des cartes papier (De La Losa, 2000).

Dans le domaine des systèmes d'information, on traite des informations et de leurs représentations physiques, c'est-à-dire des données (Chevallier, 1994).

Une des difficultés majeures de la mise en place de SIRS est qu'un espace géographique ne possède pas de système décisionnel unique. Chaque acteur, de par son activité, utilise et/ou produit de l'information sur cet espace avec ses propres unités de références. Les données se retrouvent hétérogènes, réparties au sein d'organisations multiples, dans des systèmes d'informations qui n'ont pas généralement été construits pour communiquer entre eux. L'exploitation de la dimension spatiale apporte de nouvelles possibilités de mises en relation d'objets grâce à l'analyse spatiale. Les outils permettent de construire de nouvelles informations très pertinentes pour les différents acteurs d'un espace géographique. La mise en place d'un SIRS repose sur ces potentialités, mais suppose l'accès à un ensemble d'informations souvent détenues par d'autres organisations. La mobilisation de ces informations pose d'une part, des problèmes liés à l'hétérogénéité des représentations de l'espace et d'autre part, impose l'établissement de relations entre les organisations détentrices de ces données (Rouzet, Labbé, 1997).

Ainsi, la mise en place de SIRS ne dépend pas que de la technologie informatique, mais aussi des organisations impliquées, des ressources humaines et enfin de la disponibilité et de la nature des données. Ce dernier point est fondamental pour la mise en place du système, les autres sont indispensables à son développement et surtout à son utilisation donc à son intérêt. Ceci est le point de différence entre les SIG et les SIRS.

Les SIG sont des systèmes (logiciels) comprenant : des fonctions de saisie de données géographiques sous forme numérique (Acquisition) ; un système de gestion de ces données (Archivage) ; des fonctions de manipulation (Analyse) et des outils de mise en forme (Affichage). Ces quatre phases, de l'acquisition à l'affichage, traitent des données en faisant abstraction d'un certain nombre de détails du monde réel, en raison des définitions des objets géographiques (Abstraction). C'est la règle des 5 A qui définit un SIG (Denègre, Salgé, 1996).

Les SIRS sont donc un ensemble regroupant : un SIG, les données géographiques, les organisations utilisatrices et enfin, les ressources humaines. Cette vision plus globale de l'outil est capitale pour le fonctionnement du dispositif mis en place qu'est un SIRS et il répond ainsi mieux aux contraintes de l'aide à la décision.

2.2 Bases de données et SIRS pour les risques naturels

Les bases de données ont toujours existé. Actuellement, elles deviennent informatiques, donc théoriquement plus accessibles, même si cela cause de nouvelles difficultés. Concernant les risques naturels, nous devons nous intéresser à de nombreux phénomènes touchant un même espace, que ces phénomènes soient différemment répartis spatialement ou historiquement. La mise en place de bases de données permet de faciliter l'accès à ces différentes informations et ainsi, de faciliter la gestion et la décision par une amélioration de l'analyse.

C'est ainsi que la recherche s'est naturellement dirigée vers la mise en place de systèmes d'information pour l'aide à la gestion et à la décision en matière de risque naturel. Au travers des différents travaux réalisés, nous allons présenter quelques difficultés rencontrées dans la mise en place des systèmes que nous analyserons dans le cadre de notre travail.

2.2.1 Aide à la décision en matière de risques naturels

Il nous faut tout d'abord de préciser quelques notions. **D'une manière générale, dès que l'on se trouve placé dans une situation où diverses actions sont envisageables, il convient de décider de celle qu'il est nécessaire de choisir. C'est en ce sens que le terme de « décision » est utilisé.**

Toutes les recherches concernant les risques naturels ont pour but la prévention des catastrophes. Les phénomènes étant, pour la plupart, extrêmement complexes, leur modélisation reste souvent hermétique pour les non-spécialistes. Les modèles de simulations restent utilisables pour les

experts, mais pas de façon directe pour les décideurs et le public. Ceci alors que, dans une perspective d'aide à la décision, il est impératif de donner un maximum d'informations sur les phénomènes et leurs conséquences potentielles, sachant que toute mesure de l'aléa reste incertaine (Decrop, Charlier, 1997). Nous devons donc développer des outils d'aide à la décision compréhensibles par un large public. C'est ainsi que les développements de l'informatique ont permis la mise en place de SIRS. Ces systèmes vont plus loin que l'aide à l'expertise. Le rôle de l'expert est de fournir de la connaissance. Il s'agit de l'expression d'une connaissance formulée en réponse à la demande de ceux qui ont une décision à prendre et en sachant que cette réponse est destinée à être intégrée au processus de décision (Roqueplo, 1997). De ce fait, la mise en place des SIRS pour les risques naturels a pour but de supporter l'expertise, de manière partielle, en organisant et en mettant à disposition des connaissances dans le domaine, qui vont contribuer à la prise de décision. La question n'est pas d'associer le public à la décision, encore moins de lui fournir des outils d'aide à la décision. C'est de mettre à sa disposition les informations sur la base desquelles les décisions ont été prises.

La puissance de l'informatique permet de multiplier les simulations, tester les hypothèses durant les études de sites présentant des risques. Au service de l'expertise et de la gestion, l'informatique permet une approche plus complète.

Le développement des systèmes d'information (géographiques ou non) permet de rendre opérationnels les différents types d'informations, à un niveau compréhensible par les décideurs. Ainsi, l'essor des possibilités de systèmes d'information concernant les risques (Guarnieri, 1992 ; Cligniez, 1998 ; Buisson, 1990 ; Bolognesi, 1991 ; Berger, 1997 ; Legard, 2000 ; BUWAL, 1999a, etc.) s'oriente vers des systèmes plus vastes, composés de méthodes, d'outils et de relations entre les acteurs. De ce fait, notre travail devient plus méthodologique que technique pour véritablement contribuer à l'aide à la gestion des risques naturels en montagne.

2.2.2 SGBD, entre relationnel et orienté objets

Rappelons d'abord quelques définitions : un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) peut être vu comme un ensemble de couches logicielles permettant aux utilisateurs de sauvegarder, d'interroger, de rechercher et de mettre en forme (insérer, effacer, modifier, ...) des données stockées dans la mémoire. Il s'agit des fonctions premières des SGBD. Elles sont complétées par des fonctions plus complexes pour, par exemple, assurer le partage et la cohérence des données entre utilisateurs, ou encore protéger les données.

Au dessus des SGBD, les systèmes d'information intègrent maintenant des Ateliers de Génie Logiciel (AGL) permettant de modéliser les données d'une base de données et de présenter les traitements associés à l'aide de langages de spécifications. Ces outils d'aide à la conception permettent de spécifier les descriptions des données. Pour cela, ils s'appuient sur des modèles de données, relationnels ou orientés objet (ou encore relationnels-objet). De plus, les AGL travaillent sur deux niveaux : le niveau conceptuel pour l'analyse (ce dont nous nous sommes essentiellement servis) et le niveau logique, c'est-à-dire la structure informatique d'implantation.

Le modèle relationnel, introduit en 1970 (Codd, 1970) est un modèle ensembliste simple. Il supporte des ensembles d'enregistrements aussi bien au niveau de la description que de la manipulation. Ce modèle est toujours à la base de nombreux systèmes.

Le modèle relationnel est fondé sur la théorie mathématique des relations construites elles-mêmes sur celles des ensembles. Il permet de modéliser les données sous forme de tables à deux dimensions (Badard, 1996).

Trois notions de base sont importantes pour comprendre les bases de données relationnelles (Gardarin, 1982) :

- les **domaines** de valeur : ce sont les ensembles dans lesquels les données prennent valeur. A partir des domaines classiques du type entier, réel, caractères, ... peuvent être définis des domaines spécifiques, tel que la date qui peut être considérée comme un entier à 6 chiffres (jour/mois/année) ;
- les **relations** : ce sont des sous-ensembles du produit cartésien d'une liste de domaines, caractérisé par un nom. Etant un sous-ensemble d'un produit cartésien, une relation est composée de vecteurs. La représentation d'une relation est celle d'une table à deux dimensions où chaque ligne correspond à un vecteur alors que chaque colonne correspond à un domaine du produit cartésien considéré ;
- les **attributs** : il s'agit de la colonne d'un attribut caractérisé par un nom, afin de pouvoir distinguer les colonnes d'une relation sans utiliser un index et ainsi de ne pas établir une notion d'ordre entre celles-ci ;
- Le **tuple** : il correspond à un enregistrement dans une relation (encore appelée table).

Pour travailler sur les bases, l'algèbre relationnelle a été développée. Elle est constituée par une collection d'opérations formelles qui agissent sur des relations et produisent des relations en résultats. Le langage d'interrogation des systèmes relationnels est SQL (Structured Query Language) qui est un langage de recherche et de mise à jour, permettant de spécifier les ensembles de données à sélectionner ou à mettre à jour à partir des propriétés des valeurs (ce langage a évolué, et offre maintenant de multiples possibilités, comme créer des tables,...). Il permet de définir de manière non procédurale les traitements à réaliser.

Le langage SQL est divisé en sous-types :

- LMD : Langage de Manipulation des Données pour insérer, modifier, effacer des données, mais aussi interroger les données (LID : Langage d'Interrogation des Données) ;
- LDD : Langage de Description des Données pour créer, modifier, tronquer, effacer, renommer des structures de données (tables, index, trigger) et aussi un Langage de Contrôle des Données (LCD) pour attribuer et enlever des droits d'accès.

En utilisant ce type de langage, un utilisateur n'a pas besoin de connaître les détails d'implémentation des opérateurs algébriques pour obtenir une exécution optimisée de ses traitements (David, 1991).

Pour répondre aux difficultés de modélisation liées à la logique relationnelle, les modèles orientés objets ont été développés. On évoque notre environnement en terme d'objets. Il est donc simple de le penser de la même manière lorsqu'il s'agit de concevoir un modèle. Un modèle conçu à l'aide d'une technologie orientée objet est souvent plus facile à comprendre, puisqu'on peut le mettre en correspondance directement avec la réalité. Ainsi, avec une telle méthode de conception, il n'y a qu'un petit fossé sémantique entre la réalité et les modèles (ce qui est moins le cas avec les méthodes relationnelles) (Jacobson *et al*, 1993).

Les modèles orientés objet ont donc été créés pour modéliser le monde réel. Le concept essentiel est bien entendu celui d'**objet**. Ainsi, dans un modèle objet, toute entité du monde réel est un objet. Les objets représentent une entité du monde réel mais aussi des artefacts de programmation (comme les fenêtres de dialogue, les boutons...). Un objet possède un identifiant, qui est une référence unique attribuée à l'objet lors de sa création et qui permet de le désigner.

L'identité d'objet est fondamentale car elle permet de les distinguer, à la fois physiquement et logiquement. Un identifiant est une référence unique attribuée à un objet lors de sa création. Il est à noter que l'attribution d'identifiants internes invariants dans une base de données à objets s'oppose aux bases de données relationnelles dans lesquelles les objets (tuples) ne sont identifiés que par leurs valeurs.

Ainsi, un objet est repéré de manière unique par son identifiant, sur lequel un autre objet peut pointer. Cette notion de **pointeur** est essentielle dans les modèles à objets car elle permet à un objet de référencer un autre objet très facilement. Les pointeurs sont également à la base de la programmation dynamique.

Un objet possède également des attributs ou **variables d'instance** qui mémorisent soit des valeurs qui peuvent être élémentaires (entier, réel, ...) ou complexes (structure à valeurs multiples) soit des pointeurs vers d'autres objets. Ces variables permettent de modéliser les caractéristiques d'un objet.

De plus, les modèles objet permettent également d'utiliser des fonctions appelées **méthodes**. Un objet peut contenir des méthodes qui définissent son comportement.

Afin de créer des objets, la notion de **classe** a été introduite. Une classe peut être vue comme un ensemble permettant de spécifier des propriétés d'objets (variables d'instances, méthodes) et de créer des objets possédant ces propriétés. La classe consiste donc une généralisation d'objets partageant des caractéristiques communes. De plus, pour éviter la répétition de toutes les propriétés pour chaque classe, il est possible de définir de nouvelles classes par « raffinement » de classes plus générales. Il s'agit de la spécialisation. A l'inverse, l'**héritage** permet aux classes spécialisées de posséder, sans avoir à les spécifier, les propriétés des classes plus générales, c'est-à-dire que l'on peut définir un objet en construisant sa définition à partir d'un autre objet.

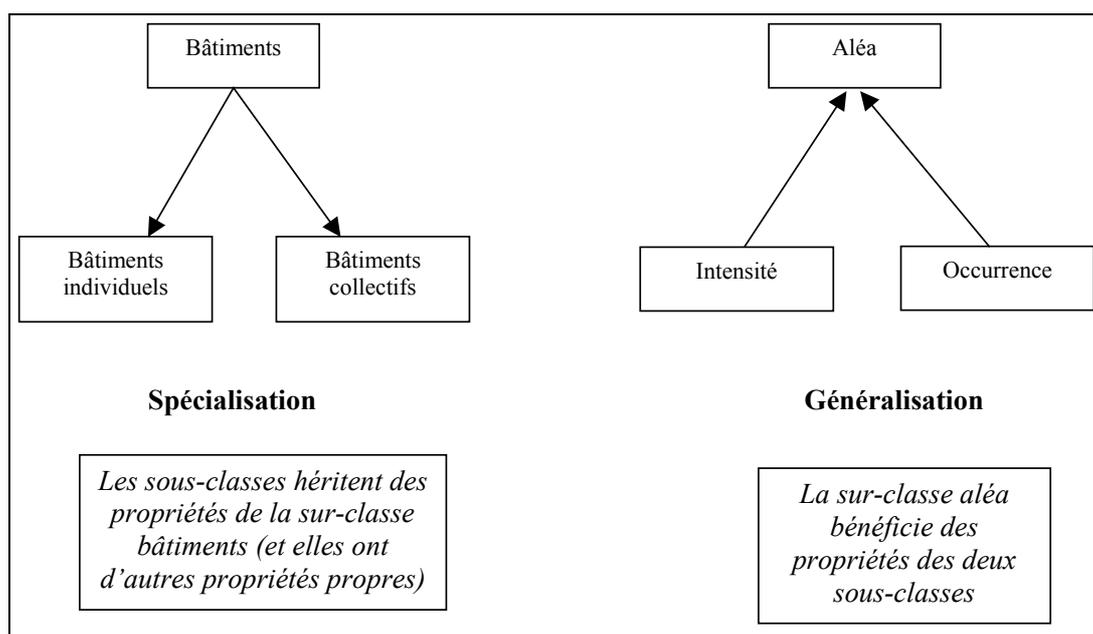


Figure 2.1 : mécanismes de l'héritage

Un objet regroupe dans une même entité ses données et ses programmes (méthodes). L'utilisateur n'a plus à connaître la structure de données puisqu'il manipule l'objet au travers de ses méthodes qui constituent son interface. Ce principe, l'**encapsulation**, améliore la maintenance des programmes ainsi que l'utilisation de modules de programmes standardisés.

L'approche objet est plus près de notre conception du monde, ainsi, elle se généralise dans les démarches de conception, même au travers d'approche hybride comme le relationnel-objet. Cette dernière permet de représenter des données relationnelles sous forme d'objets complexes et les rend accessibles pour une exploitation par les deux types de modélisations.

L'UML est un langage de modélisation objet qui fait maintenant l'unanimité. Nous utiliserons donc ce langage pour notre approche dans la partie 3.

2.2.3 Le raisonnement multi-échelle

La mise en place de SIRS concernant les risques naturels se heurte très rapidement aux difficultés du multi-échelle. En effet, le système doit gérer des données géographiques issues de sources très variées ayant des qualités et des représentations différentes. Tous ces acteurs s'intéressent à un même phénomène du monde réel regardé selon différents points de vue. L'information géographique est donc collectée, saisie et analysée à différentes échelles de résolution et d'abstraction de l'espace, de sorte que la perception des processus géographiques dépend de ces échelles d'observation (Raynal *et al.*, 1996).

Un des intérêts de disposer d'informations géographiques sous forme numérique est de pouvoir accéder à une grande diversité d'informations. On est de moins en moins limité par la quantité d'informations à stocker. En revanche, si on veut visualiser ces informations sous forme d'une carte (l'utilisation la plus courante), très vite on arrive à la saturation de la carte en objets géographiques, qui finissent par la rendre illisible. Or, la nature même des données géographiques fait qu'il est indispensable de les visualiser cartographiquement pour que leur représentation soit utile. Il faut donc, pour produire une carte à partir de données numériques, disposer de spécifications cartographiques précises et d'un système capable d'extraire des données l'information qui nous intéresse, et ensuite, en dériver une représentation graphique adaptée à l'échelle voulue (Regnauld, 1998).

Sur une carte « papier », le volume d'informations et l'emprise de la carte sont directement conditionnés par l'échelle qui est fixe. Le nombre de thèmes et leur degré de détail sont donc limités si l'on veut produire une carte lisible. Si l'utilisateur veut disposer de plusieurs représentations d'une même zone, il lui faut obligatoirement faire réaliser plusieurs cartes et faire lui-même le rapprochement entre ces cartes. Il ne faut pas oublier que l'échelle, en géographie, est un terme qui peut désigner le niveau d'abstraction d'une représentation spatiale. Définir une abstraction est un processus qui mène naturellement à la modélisation (Rigaux, 1995). Ainsi, à chaque échelle correspond un niveau d'abstraction, donc des objets graphiques qui peuvent être différents. En numérique, l'échelle, tel que nous la conservons pour une carte papier, n'a plus de sens, elle est remplacée par un niveau d'abstraction où les objets sont représentés comme sur une carte papier.

Rappelons que le changement d'échelle lors d'une représentation cartographique n'est pas du même ordre que le fait de « zoomer » sur une partie de la carte. En effet, faire un agrandissement (« zoomer ») sur une région ne modifie pas l'échelle d'abstraction associée à la région, mais rend uniquement celle-ci plus grande, donc peut la rendre plus claire, plus lisible. **Changer de niveau d'abstraction, c'est augmenter ou diminuer la quantité de connaissances considérées.** Il ne faut pas le confondre avec le changement d'échelles qui correspond au rapport entre la mesure d'un élément sur la carte et la mesure de ce même élément sur le terrain.

Dans notre cas, le multi-échelles, le multi-résolutions, ou encore la représentation multiple seront définis de la même manière par : **la coexistence, dans une même base de données à référence spatiale de plusieurs représentations (géométriques et/ou sémiologiques, et/ou sémantiques) d'un même objet du monde pour des fins d'utilisations différentes** (d'après Martel, 1999 ; et Vangenot, 1998).

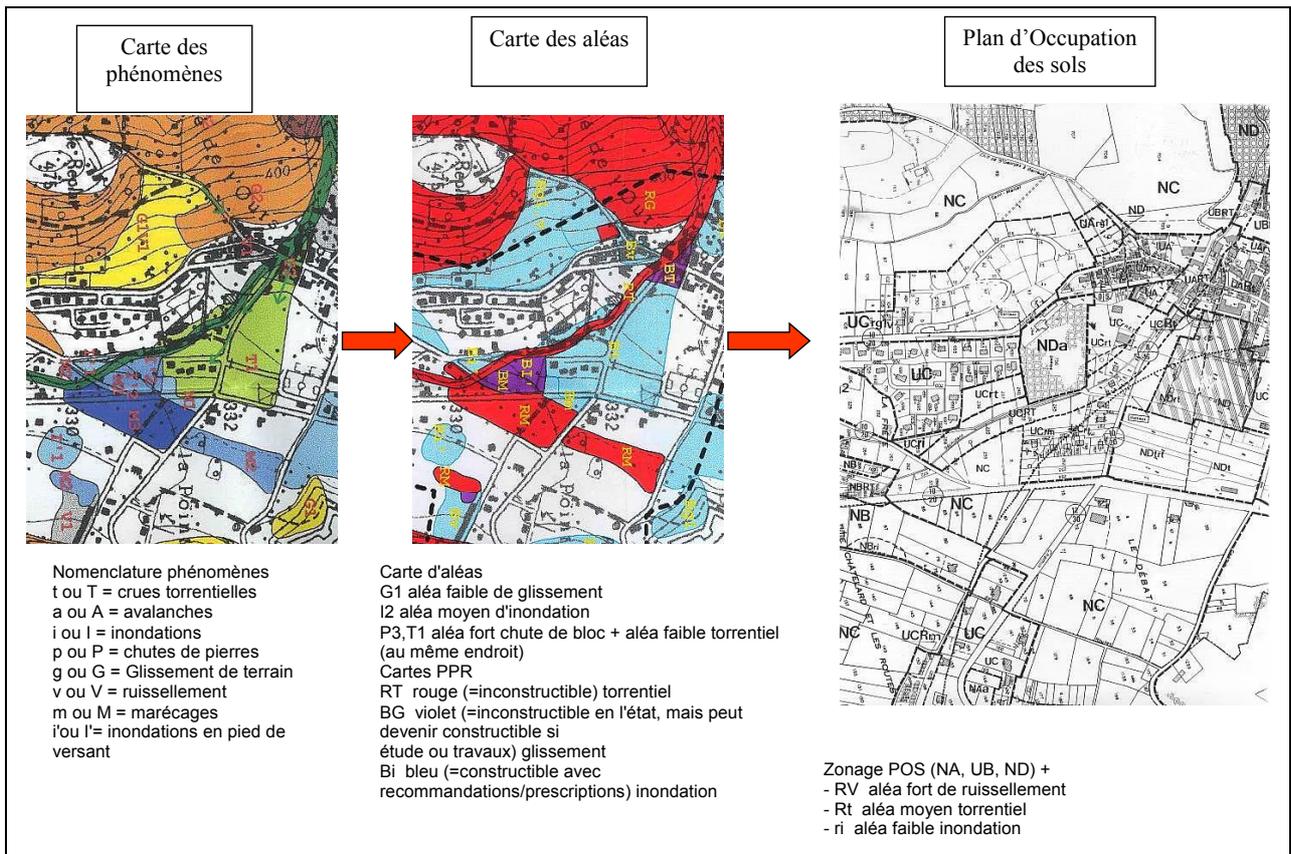


Figure 2.2 : exemple de représentations multiples pour la gestion des risques

Ces contraintes sont liées au support papier et n'ont plus cours avec les cartes numériques. Ainsi, plusieurs représentations des mêmes données à des échelles différentes et selon différents thèmes, à des époques distinctes, doivent pouvoir être affichées. L'échelle d'abstraction et les thèmes sélectionnés par le système ne doivent donc pas être fixes. Le choix se fera en fonction de critères de sélection cartographiques (Devogele, 1997) :

- Les **circonstances** d'utilisation : pour la gestion des risques, toutes les informations du cadastre ne sont pas utiles ;
- La **densité** d'information de la zone : en zone urbaine, nous aurons besoin d'une carte au 1/10.000 et pour les zones plus rurales, d'une carte au 1/25.000 ;
- La **catégorie** de l'utilisateur : un expert a besoin de levés topographiques alors qu'un préfet n'a besoin que d'un zonage ;
- L'**intérêt** de la zone : un secteur urbanisé subissant des aléas doit être très détaillé, alors qu'une zone de départ du phénomène, en haute montagne, peut être définie de façon moins précise ;
- La **date** désirée : pour des raisons juridiques, les représentations à différentes dates doivent être gérées ;

- La **distance** entre les objets à visualiser : pour une carte routière, l'échelle et les thèmes sélectionnés peuvent aussi varier durant l'application (pour les carrefours par exemple).

Pour les risques naturels, la difficulté est de faire coexister les différents documents élaborés indépendamment sur un même fond pour les rendre homogènes. Il s'agit la plupart du temps de données issues du cadastre, pour le bâti, et de données représentant les différents phénomènes. Ces données ne sont pas à la même résolution cartographique et sémantique, ce qui rend leur superposition inappropriée, même si en apparence, les SIG le réalisent très bien.

D'une façon générale, les données topographiques et thématiques de base délivrées par l'Institut Géographique National ne sont pas d'un niveau suffisant pour servir de base à une représentation des phénomènes naturels générateurs de risque en montagne. Cette situation, qui met la France à un niveau peu enviable dans les Alpes et les Pyrénées, ne semble pas devoir s'améliorer dans un avenir proche.

Ces données à références multiples sont un des problèmes de gestion informatique de données à références spatiales liées à la mise en place de SIRS, comme nous allons le voir maintenant.

2.3 Contraintes informationnelles

Dans une démarche itérative de prototypage d'un SIRS comme nous la menons, la connaissance approfondie des données à insérer dans le système est une étape indispensable et déterminante pour la survie du système final. Pourtant, c'est de là que viennent les principales difficultés qui sont souvent minimisées lors du rendu final. On privilégie, d'un côté, les choix de la plate-forme logicielle en fonction des traitements que l'on voudra réaliser et, d'un autre côté, on réalise un inventaire plus ou moins exhaustif des données disponibles. De ce fait, la prise en compte des contraintes informationnelles se fait lorsque le système est en développement ou pire lorsqu'il est développé et que l'on procède au chargement global des données. Le système est alors développé sans vraiment une réflexion poussée préalable à l'intégration de données spatiales hétérogènes. Pour la conception de SIRS viables, un certain nombre d'étapes doivent être respectées pour le cycle de vie du projet. Quatre grandes phases peuvent être déterminées (Laurini *et al.*, 93) :

- l'analyse préalable, pour recenser les besoins et juger de la faisabilité ;
- la conception du produit ;
- le choix du système et son développement ;
- les étapes opérationnelles en vue de l'installation et du bon fonctionnement du système.

Dans un processus itératif de recherche, où notre but est précisément de tester la faisabilité d'un SIRS et d'effectuer de l'analyse spatiale à partir de données numériques ou d'améliorer nos connaissances, le respect de ces phases ne peut être réalisé. Ainsi, l'analyse préalable se fait en

grande partie en fonction du choix des systèmes utilisés et du développement que l'on peut faire, voire en fonction de la disponibilité de ces derniers, c'est-à-dire, en fonction de choix économiques.

Cela s'applique en particulier au domaine des risques naturels, exceptionnellement riche en informations de toutes sortes, et indispensable à prendre en compte pour les politiques d'urbanisme et la protection des personnes. De nombreuses expériences ont démontré les bénéfices liés à l'utilisation de l'informatique pour répondre à différents besoins tels que la gestion, la modélisation et la prévision des phénomènes. La combinaison des méthodes classiques d'évaluation des risques naturels et de la modélisation spatiale orientée objet peut apporter des réponses en matière de prise en compte de la vulnérabilité dans l'étude des risques naturels. De plus, ce type de modélisation permet de prendre conscience très tôt des difficultés qui seront rencontrées lors des phases de développement, notamment grâce au modèle des cas d'utilisation proposé par UML (Unified Modeling Language for Object-Oriented Development) (Booch *et al.*, 1999). Pourtant, comme pour tout développement de système d'information, les données sont une des principales sources de contraintes difficilement surmontables.

2.3.1 Contraintes liées aux données réellement disponibles

Une demande très forte existe pour recenser et mettre au service de la société des systèmes capables de fournir une information quasi exhaustive sur un sujet. L'informatique a permis de nombreuses réalisations et offre encore beaucoup de perspectives pour la création de ces bases d'informations.

Les besoins en données varient d'une application à une autre et même d'un utilisateur à un autre, ce qui confère une valeur relative plutôt qu'absolue à la notion de qualité. Qualité que l'on peut définir comme l'ensemble des caractéristiques qui rendent une donnée apte à satisfaire les besoins définis par un utilisateur dans le cadre d'une application précise (Bédard, Vallière, 1995).

Il y a déjà quelques années, des difficultés se sont posées sur les sources d'informations géographiques, et trois types d'obstacles ont été clairement définis (Hagget, 1968) :

- les données, recueillies à des fins non géographiques, sont peu adaptées aux besoins de la recherche géographique ;
- nous sommes prisonniers du degré de précision initial de recueil des données ;
- les informations sont données par ensembles, qui sont souvent difficilement exploitables (cela est particulièrement vrai pour les recensements).

Ces difficultés liées à l'analyse des données spatiales ne sont pas réglées, et le passage au numérique en apporte de nouvelles avec, par exemple, les difficultés de la généralisation.

Pour les données cartographiques, nous pouvons identifier quelques types de contraintes assez claires entraînant des problèmes de compatibilité (Charron, 1995), parfois insolubles avec les connaissances actuelles. Cela entraîne des contraintes liées :

- à une difficile traduction du document papier en un format informatique ;
- à la sémantique des entités et attributs (noms, définitions, synonymes, etc.) ;
- à la description des entités (qualité, précision, type et longueur des attributs, domaines de valeurs possibles, etc.) ;
- à la référence spatiale (systèmes de coordonnées, projections cartographiques, ellipsoïde de référence, formes géométriques, différences d'échelles, etc.) ;
- à la référence temporelle (date de création, de mise à jour, période de validité, pérennité, etc.).

Ces contraintes rendent la mise en place et surtout le développement de SIRS exploratoire pour l'analyse spatiale très complexe. Selon un point de vue industriel, il existe la plupart du temps une ou plusieurs solutions à condition d'y accorder des moyens. Mais dans le cas qui nous intéresse, c'est-à-dire des prototypes exploratoires permettant d'aborder des questions de recherche, cela est rarement possible.

Par ailleurs, nous savons que les efforts à accomplir pour améliorer la qualité des données se situent au niveau des processus qui créent les données (Redman, 1998). Etant rarement propriétaires des données que nous utilisons, nous pouvons difficilement améliorer leur qualité. De plus, les informations géographiques sont recueillies dans une logique d'autarcie. Les identifiants définis sont pour la plupart propres à chaque service. Par conséquent, ils peuvent rarement être utilisés pour identifier des homologues (Devoegele, 1997) rendant l'intégration de données hétérogènes, c'est-à-dire issues de sources diverses, longue et difficile (comme nous le verrons dans la dernière partie).

Ces différentes contraintes impliquent en fait des difficultés bien plus profondes que de simples complications. Elles influent sur les résultats possibles en orientant la démarche et limitant les développements.

2.3.2 Impact des contraintes informationnelles sur la conception du système

Les applications de SIRS génèrent des besoins très variés en terme de représentation, de traitement et d'analyse de données spatiales. Cette grande diversité, qui reflète l'étendue des domaines concernés, rend difficile l'identification d'un ensemble minimal de spécifications pour le développement de méthodes de conception et de réalisation (Claramunt *et al.*, 1997). Il existe une multitude de méthodes qui s'orientent maintenant pour la plupart vers la conception objet, ce qui privilégie le travail sur les données. La phase conceptuelle devient la phase la plus importante

et pourtant, elle devient une phase théorique dans une démarche de prototypage, puisqu'elle sert aussi à la découverte des données.

N'oublions pas que nous raisonnons sur des données cartographiques. L'espace géographique étant continu, on peut toujours imaginer un relevé plus précis, un affinement de l'inventaire et il est clair qu'une information géographique résulte toujours d'un choix humain. Il ne peut donc être question de « représentations exactes », mais d'un degré d'exactitude. Ce degré est à deux niveaux : le degré de précision de l'information et le degré de précision de la représentation (Bertin, 1967).

Par ailleurs, cette approche privilégie la mise en place de méta-données, c'est-à-dire de données nous renseignant sur la nature de certaines autres données et qui permettent ainsi leur utilisation pertinente. Ces méta-données peuvent renseigner sur des données existantes que nous pouvons posséder ou utiliser mais aussi, et c'est souvent le cas, sur des données indisponibles, voire inexistantes. Cela amène une réflexion sur la collecte des informations, de leur simple qualité à leur pertinence puisqu'elles ne correspondent pas toujours à la demande actuelle qui évolue sans cesse. Une majorité du travail s'effectue alors sur des données créées de toutes pièces pour l'étude en question, ce qui remet en question la reproductibilité de l'étude fournie.

2.3.3 Vers des systèmes opérationnels ?

Les difficultés de prise en compte de données spatiales hétérogènes que l'on vient d'évoquer nous amènent à considérer les systèmes de méta-données comme une solution potentielle à l'intégration de ces sources d'information diverses et variées. Les essais dans ce domaine sont très peu nombreux et sont restés embryonnaires. On citera pour exemple la norme EDIGéO qui, sans être un réel système de gestion des méta-données, a jeté les bases d'un format d'échange entre systèmes à références spatiales hétérogènes. Mais, outre un format d'échange, il faut concevoir des systèmes qui puissent collaborer. L'accès aux données spatiales va en s'améliorant, ce qui incite à la création de SIRS voulant gérer de nombreuses informations. Ce n'est pas que parce qu'il y a plus de données que les systèmes fonctionnent mieux.

Le problème posé ici est cependant beaucoup plus vaste. Il s'agirait de définir un descriptif générique pour tout ce qui a trait à la gestion opérationnelle des données spatiales, de leur acquisition à leur mise à jour, en passant par leur gestion cartographique et statistique quotidienne. En rajoutant ce niveau d'abstraction, on s'approche alors du système de « méta-méta-données », capable de conceptualiser les différents paramètres qui définissent un SIRS, lui-même capable de définir les paramètres des données qu'il intègre. Et cela est une réflexion à mener à terme avant tout développement. En cela, la mise en place de systèmes doit être intégrée dans une logique d'organisation, ce sont les utilisateurs qui font vivre le SIRS, donc s'ils ne coopèrent pas, tout développement est voué à l'échec.

2.4 Mise en commun des données concernant les risques

L'étude et la gestion des risques naturels se heurtent comme nous l'avons vu au problème de recensement, d'organisation et de représentation des données disponibles sur un site particulier. Ces informations sont à la fois de nature hétérogène, issues de sources très variées et archivées dans des lieux différents, ce qui rend leur connaissance, leur traitement et leur utilisation difficiles.

Etant donné la complexité des phénomènes mis en jeu et les implications juridiques en cas de catastrophe naturelle, faciliter l'accès aux différentes sources d'informations est indispensable. En cela, la mise en place de systèmes d'information se justifie.

Une première réflexion a été menée dans ce sens (dans le cadre de notre travail) avec le projet « Système d'Information sur les Risques naturels de la haute Vallée de l'Arve (SIRVA) », que nous allons présenter maintenant.

Ce projet avait un fort contenu méthodologique. Son but principal était de construire un prototype du système sur une zone test, la haute vallée de l'Arve, dans l'optique de l'étendre à l'ensemble de la Haute-Savoie. Il est révélateur des contraintes informationnelles que nous venons de discuter, pourtant ce partage est indispensable dans le cadre de la gestion des risques.

2.4.1 *Système d'Information sur les Risques naturels de la haute Vallée de l'Arve*

L'intérêt de mettre en place un SIRS concernant les risques naturels est double : outre fournir une assistance aux acteurs du risque en rassemblant les différentes informations ou en les recensant, il peut aussi être un des outils de l'information préventive, par l'intermédiaire du Web par exemple. Cette dernière consiste à renseigner tous les citoyens d'une commune exposée à un ou plusieurs risques naturels ou technologiques, sur la nature de ces risques, sur les mesures de prévention mises en place tant par l'Etat que par les communes elles-mêmes, et à leur enseigner quelques gestes élémentaires à avoir en cas d'accident ou de catastrophe (Gominet, 1999).

Le projet SIRVA avait pour objectif de fournir aux gestionnaires du risque un cadre dans lequel ils pourraient archiver, de façon ordonnée, toutes les informations sur les risques naturels relatives à un territoire donné. Les principales fonctionnalités du système sont :

- la récupération et la sécurisation des données existantes ;
- l'intégration des données nouvelles au fur et à mesure de leur production ;
- faciliter la consultation des données grâce au système d'information.

La mise en place de ce prototype a consisté à recenser, structurer et mettre en relation les données utiles pour les gestionnaires des risques en montagne, c'est-à-dire dans ce cas précis,

principalement les services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) et les Directions Départementales de l'Équipement (DDE).

2.4.1.1 Gestion des données et modélisation du système

L'objectif était de recenser l'information, de la structurer, de la partager et de développer un prototype.

Dans un souci de prototypage expérimental, le système SIRVA présenté ici a volontairement été restreint à quatre communes de la haute vallée de l'Arve en Haute-Savoie : Chamonix, les Houches, Vallorcine et Servoz. Il inclut dans un premier temps les données suivantes :

- les sites et événements de l'Enquête Permanente sur les Avalanches, ainsi que les Cartes de Localisation Probable des Avalanches, gérées par la division Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches du Cemagref ;
- les sites et événements relatifs aux autres phénomènes (éboulements, inondations, etc.) issus des archives du service de Restauration des Terrains en Montagne de Haute-Savoie (RTM 74) ;
- les avis d'urbanisme donnés pour des parcelles exposées, rendus par le même service RTM 74. Il ne s'agit donc que d'une seule partie des documents d'urbanisme délivrés par les communes ;
- le découpage en parcelles cadastrales et les fonds de plan de l'IGN, fournis par la Régie de Gestion des Données du Conseil Général de Haute-Savoie (RGD 74). Cette régie a pour objectif d'étudier, de concevoir, de développer, et d'exploiter le système informatique qui gèrera la banque de données à référence spatiale du département de la Haute-Savoie, tout en diffusant les données auprès des collectivités et des services publics du département. A terme, la régie sera le gestionnaire de SIRVA ;
- les textes réglementaires des Plans de Prévention des Risques concernant chacune des communes retenues dans le cadre du projet.

Alors que d'autres données doivent encore être ajoutées à plus ou moins long terme, cet inventaire témoigne déjà de l'hétérogénéité des informations à prendre en compte. Cette hétérogénéité existe tant dans la nature des données (cartes, textes, photos...) que du point de vue de leur localisation (services de l'État, collectivités locales, bureaux d'études, journaux...). Le recensement des données a également consisté à évaluer la qualité des informations issues d'archives (telles que les données issues du service RTM au format papier) et à étudier les possibilités de codage informatique en vue d'une interrogation par requêtes. Une attention particulière portant sur les informations spatiales s'est aussi avérée nécessaire en raison des traitements spécifiques à appliquer (digitalisation, vectorisation des cartes).

Les données sont sous diverses formes, le principal objectif du projet étant de les rendre disponibles aux gestionnaires de risques naturels. Ces derniers, comme les services RTM, la

DDE, ou les communes (lorsqu'elles disposent de service technique), sont les premiers intéressés (Brugnot *et al.*, 1999).

Lors de la conduite du projet, nous nous sommes au départ intéressés aux diverses données textuelles, avant de les mettre en relation avec les données spatiales qui devaient avant tout (pour les utilisateurs finaux) servir de support. Ainsi, lors de la conception, l'accent a été mis sur le recensement et l'intégration des données textuelle au détriment des données spatiales. Cela a entraîné une sous-estimation des difficultés de mise sur le Web de données spatiales ce qui rend ces développements moins aboutis.

Pour les données textuelles, prenons par exemple le cas de l'EPA : elle est stockée informatiquement depuis des années. Le codage est toutefois difficilement exploitable en l'état. Chaque événement de l'EPA est codé sur une ligne de 80 caractères juxtaposés correspondants à différentes rubriques (figure suivante). Ce codage est à l'image de ce qu'il était possible d'enregistrer sur une carte perforée, seule solution envisageable pour le stockage des données lors de l'informatisation de l'EPA en 1976 (Strazzeri, Manche, 1998).

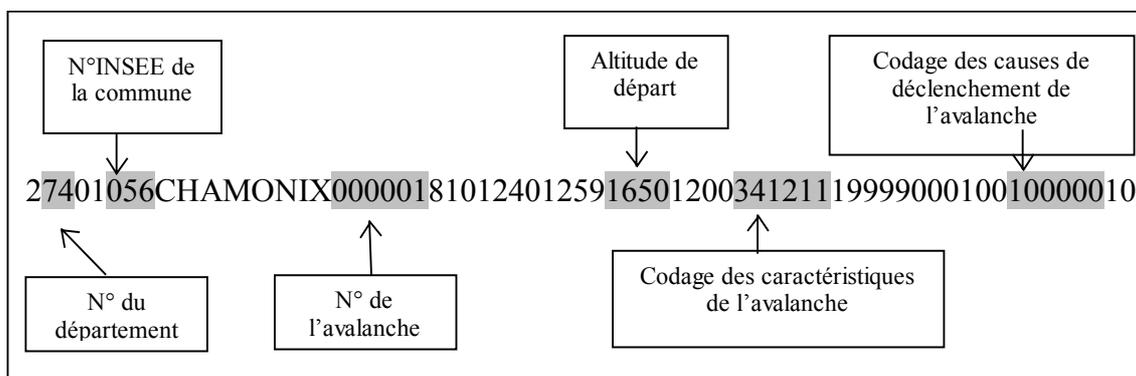


Figure 2.3 : Exemple de codage d'un événement dans l'EPA et signification de quelques séquences de caractères

Il est délicat, à partir de ce système, de fichiers de procéder au traitement de requêtes complexes¹² sans une programmation spécifique. La modélisation des informations codées dans ce type de fichier est nécessaire pour aboutir à un schéma de données permettant une meilleure exploitation du contenu.

La conception a reposé sur le langage UML, avec l'identification des données, l'identification des acteurs et la définition de leurs besoins, suivi de la définition des spécifications. La phase la plus longue de la modélisation a été le modèle conceptuel objet pour obtenir un consensus de l'ensemble des partenaires. Deux prototypes ont été développés avec la mise en place d'une base de données relationnelle (sous le logiciel Oracle) accessible via Internet (Villanova, 1998).

Le travail de modélisation réalisé a permis d'atteindre les objectifs suivants :

¹² Par exemple : recherche des altitudes de départs et des causes de déclenchement de toutes les avalanches ayant eu lieu sur un site particulier d'une commune donnée entre deux dates.

- la prise en compte des données multiples et hétérogènes et leur organisation dans un modèle de classes qui met également en évidence les relations entre ces données;
- la définition précise des besoins et attentes des futurs utilisateurs notamment en termes de consultation, d'enregistrement et de modification d'informations. Nous avons d'une part déterminé quelles étaient les données pertinentes auxquelles accéder et en vue de quelle action et, d'autre part, défini les modalités d'accès à ces données (par spécification textuelle d'un ou plusieurs critères - lieu, dates, numéro de parcelle, etc. - ou par sélection d'une zone sur une carte, etc.) ;
- une réflexion sur les niveaux de services du futur système et les droits d'accès à celui-ci. La définition des fonctionnalités du système devait impérativement tenir compte des différents publics et déterminer pour chacun d'eux des éventuelles limitations quant à l'utilisation du système. Il est évident que le grand public ne peut en aucun cas être autorisé à modifier ou supprimer des données. D'autres questions moins triviales ont également été étudiées telles que les droits des services RTM concernant les données de l'EPA gérée par le Cemagref (le RTM peut-il être autorisé à compléter les informations de l'EPA sur une avalanche par des informations recueillies par ses services ?).

Le développement de SIRVA s'est orienté vers Internet, pour répondre aux besoins des futurs utilisateurs qui seront amenés à consulter ou renseigner le système depuis des sites géographiquement distants. De plus, nous voulions que ceux-ci n'aient pas à acheter de logiciel particulier pour utiliser le système. Il s'agit d'une contrainte forte pour le développement de ce prototype, mais cela est imposé pour que le système soit utilisé par différents acteurs du risque et éviter de nouveaux investissements en logiciels.

2.4.1.2 Mise en place du système

Nous avons deux objectifs principaux : offrir un environnement capable de gérer la masse d'informations dont nous disposons ainsi que permettre un accès aux données en passant par Internet. L'utilisation d'un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) a été retenue pour répondre au premier point car il permet de regrouper l'ensemble des données du système tout en offrant un certain nombre de facilités (Villanova *et al*, 2000) :

- performances : au vu de la masse d'information stockée, cet aspect est particulièrement sensible. On peut estimer qu'il existe actuellement pour le seul département de la Haute-Savoie 668 sites et 17856 événements avalanches recensés dans l'EPA, chacun caractérisé par une trentaine de valeurs. Les caractéristiques multimédias des informations traitées ajoutent encore à la complexité et mettent en évidence la nécessité de disposer d'environnements performants.
- gestion des aspects multi-utilisateurs : un tel système sera utilisé par différents types d'utilisateurs avec des niveaux de compétence informatique et des besoins très variés. Il faut donc pouvoir spécifier différents moyens d'accès aux données, contrôler les

accès, spécifier les droits en fonction du profil afin de garantir la cohérence de la base de données.

- accès distribués : les utilisateurs et les outils logiciels sont par nature répartis sur différents sites. Le système doit donc permettre et contrôler ces accès répartis. Nous avons choisi de mettre en œuvre une technologie Internet afin d'homogénéiser les modes d'accès et de garder un mode intuitif et navigationnel pour l'accès aux données.

Dans la version actuelle du prototype nous avons choisi un SGBD relationnel, en l'occurrence ORACLE, afin de prendre en compte les environnements existants. Deux des « fournisseurs » d'informations, le Cemagref et le RTM (via la RGD'74) ont à leur disposition ce logiciel. De plus, l'environnement de développement proposé par ce logiciel permettait de répondre aux exigences de prototypage (Lockman, 1997). Néanmoins, nous estimons qu'à terme, une technologie à objets représente une solution plus adéquate pour différentes raisons : tout d'abord, la modélisation sous forme d'objets est plus naturelle et plus proche de la réalité, surtout avec un langage comme celui de Perceptory (une carte, un site, un événement, comme nous le verrons dans la partie 3) ; ensuite, les possibilités de raffinement des classes d'objets via l'héritage de structure et de comportement permettraient de faciliter les extensions au système ; enfin, les caractéristiques multimédias du domaine d'application traité devraient pouvoir bénéficier des recherches récentes sur les SGBD multimédias (Mocellin *et al.*, 1999).

Dans le cadre du projet, le choix de développer une interface de saisie et d'interrogation en HTML nous a amené à tester différentes orientations possibles. Dans un premier temps, nous avons expérimenté l'utilisation du logiciel JDBC pour générer les pages HTML. Celui-ci nous a semblé plus complexe à mettre en œuvre, bien que plus complet qu'Oracle Web Application Server sur lequel s'est finalement porté notre choix. OWAS est un ensemble de logiciels permettant l'accès aux bases de données Oracle, et ce à partir d'un navigateur quelconque.

Le système permet d'accéder à des informations textuelles tel que les règlements d'urbanisme, les rapports sur les événements, l'EPA, etc., de consulter les cartes (CLPA, cadastre, etc.) et de passer d'un type d'information à un autre puisque toutes sont en rapport avec un phénomène.

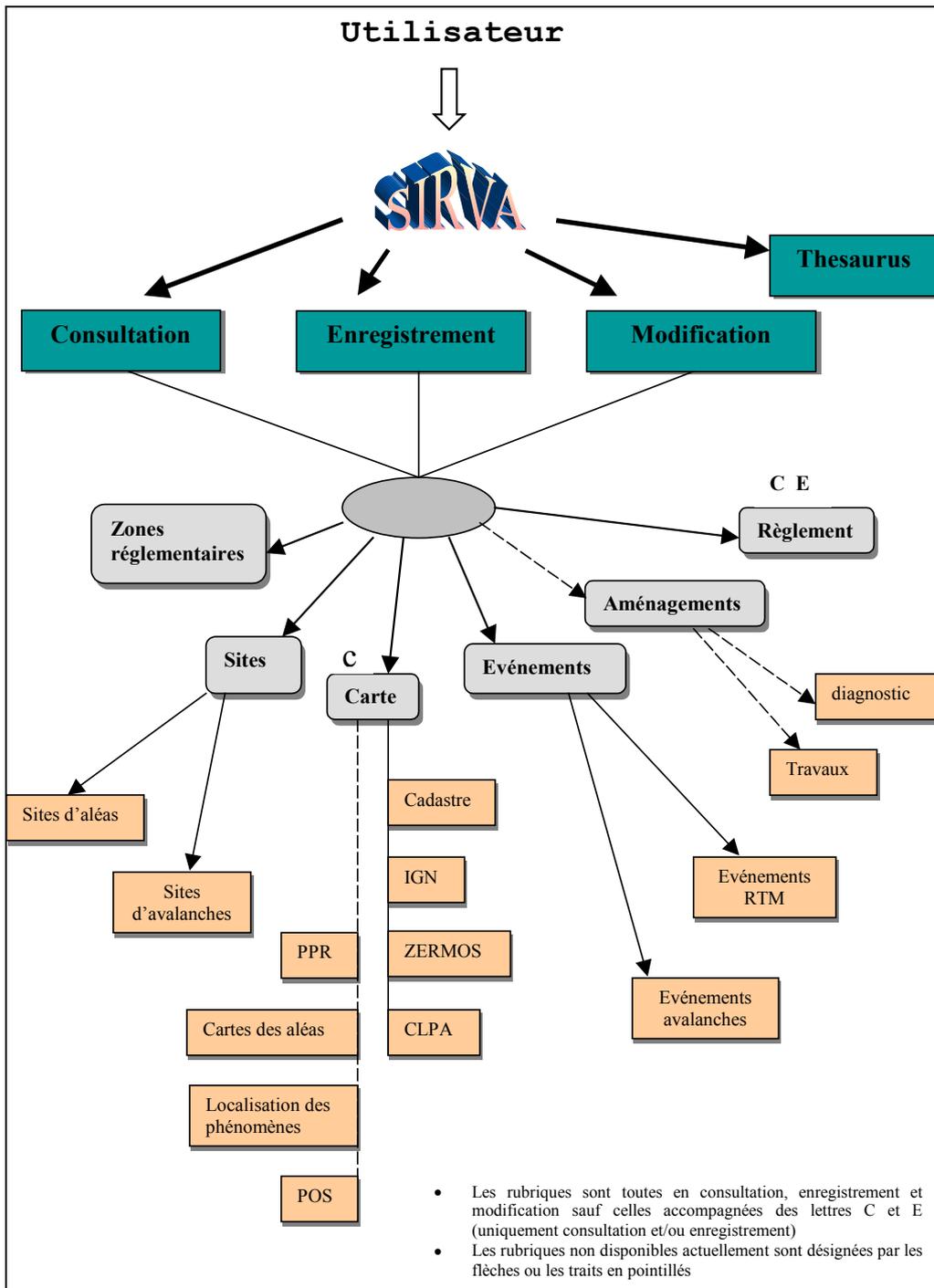


Figure 2.4 : fonctionnalités du système

SIRVA est une application client-serveur, c'est-à-dire que les informations sont stockées au sein d'une base de données relationnelle (avec le logiciel Oracle) et d'un serveur d'application qui contient tous les fichiers des cartes, le tout accessible par un réseau.

La base de données est ainsi accessible pour des consultations, des modifications ou des ajouts via le Web pour les différents acteurs ayant besoin du système, grâce à un navigateur Internet.

Bien que la tendance actuelle soit orientée vers la programmation objet (voir partie n°3), c'est l'approche relationnelle qui a été retenue pour la base de données dans ce projet. En effet, les besoins spécifiques auxquels devaient répondre ce prototype ne nécessitaient pas forcément une organisation objet de la BD, même si la conception du prototype s'est faite en UML pour les raisons expliquées précédemment.

Le prototype a été mis en ligne, et fonctionne sur un serveur accessible via le Web.

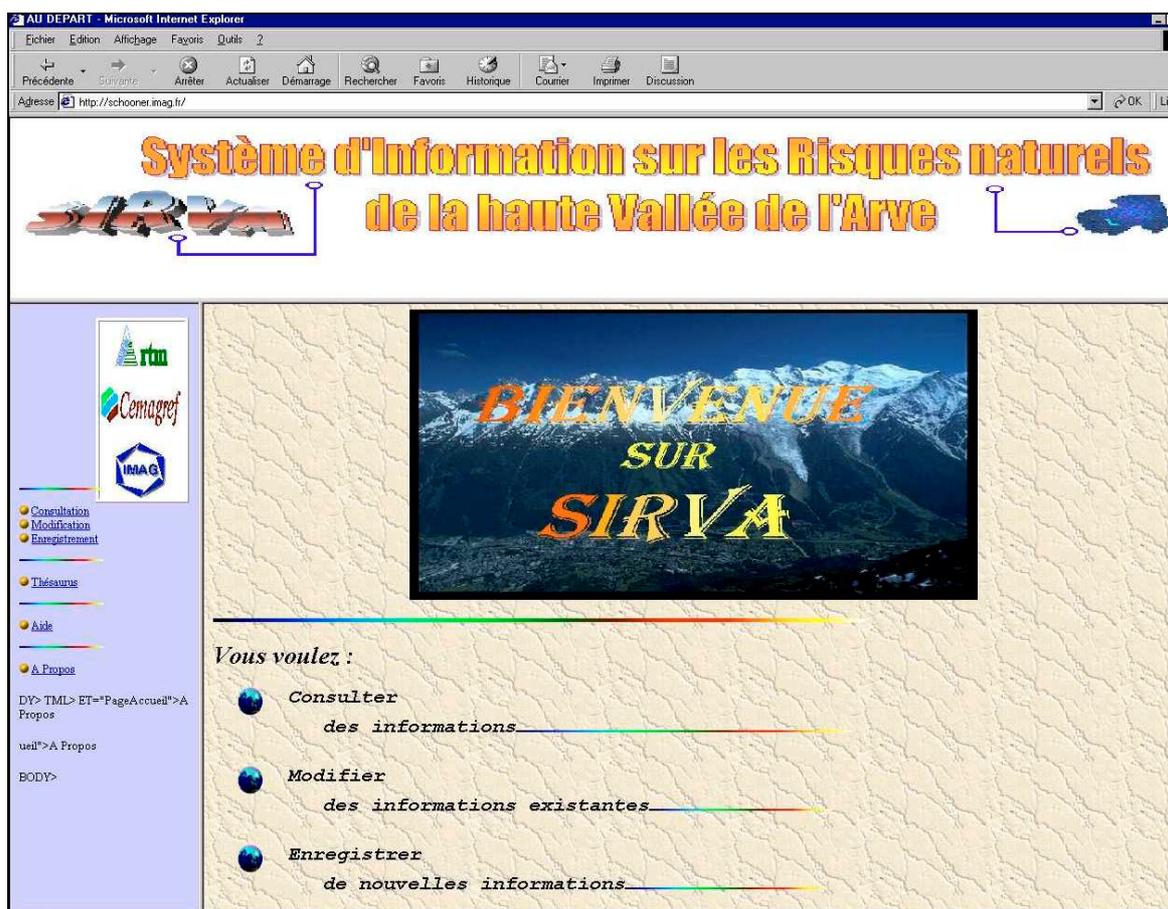


Figure 2.5 : page d'accueil de SIRVA

La figure n°2.6 illustre une situation de consultation d'information concernant les données de l'EPA. La page HTML de cette figure propose un formulaire de requête à l'utilisateur lui permettant de préciser son besoin d'information (choix de la commune et du site, critères de date).

**Système d'Information sur les Risques naturels
de la haute Vallée de l'Arve**

Consulter les informations concernant les événements d'un site particulier

Veuillez sélectionner le site qui vous intéresse...

CHAMONIX (74) : ARVE ET SES AFFLUENTS

...et préciser la période qui vous intéresse:

Tous les événements enregistrés à ce jour

Tous les événements survenus avant le :

Tous les événements survenus après le :

Tous les événements survenus entre le : et le :

Afficher

[SOMMAIRE](#)

Figure 2.6 : Formulaire de requête concernant les événements de l'EPA

La soumission de cette requête entraîne l'affichage à l'écran d'une page développée en HTML recensant l'ensemble des événements répondant aux critères. La consultation d'un événement particulier est alors possible selon le même principe.

Cet exemple ne témoigne que de quelques-unes des possibilités de consultation d'information dans SIRVA. D'une part, d'autres modes de consultation sont possibles tels que les accès directs à un événement ou un site particulier (sans passer par des tableaux récapitulatifs). D'autre part, la consultation concerne de nombreux autres types de données : les « rapports événements » du service RTM (ainsi que les documents annexes qui s'y rapportent : cartes, photos...), les avis d'urbanismes, les règlements des PPR, ainsi qu'une partie documentaire : le thesaurus. Ce thesaurus, négligé au départ du projet se révèle une partie importante du site Web, puisqu'il permet aux non initiés de mieux appréhender le sujet.

Le projet se situe à l'intersection de différentes disciplines, donc cela provoque des désaccords sur le vocabulaire. Le système se doit de clarifier les termes employés et les données utilisées en donnant les définitions les plus officielles et les plus récentes possibles. Le thesaurus comprend : les définitions officielles des termes liés aux risques naturels, une description des phénomènes en question, un inventaire des données cartographiques liées aux risques, et les définitions du vocabulaire spécifique au projet.

Une partie de gestion cartographique a aussi été développée. Pour rappel, le fonctionnement d'un tel système SIG-Web est illustré par la figure ci-après. Un serveur SIG-WEB est un logiciel permettant de diffuser sur Internet, intranet ou extranet des données numériques venant d'un système d'informations à référence spatiale (cartes, plans, images etc.) :

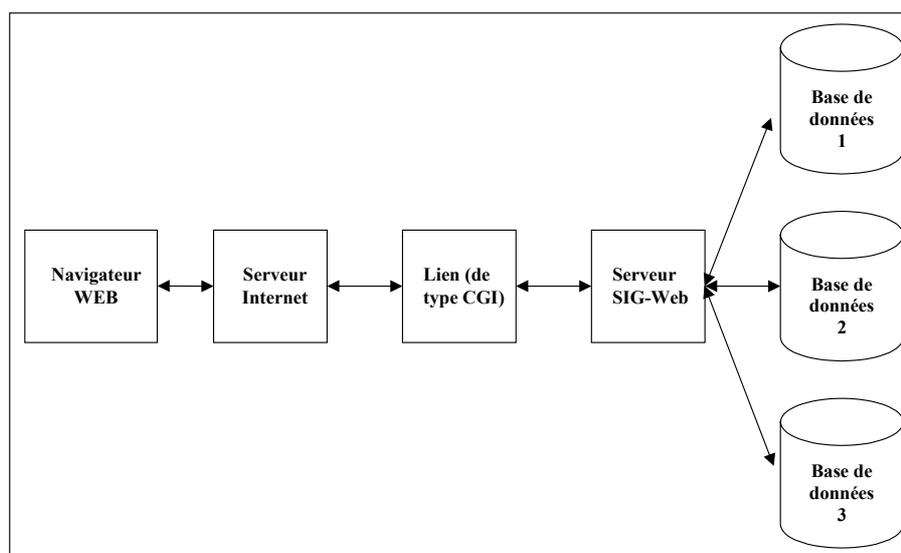


Figure 2.7 : architecture d'un SIG accessible via le Web

Après une étude des différents produits commerciaux, nous avons trouvé que leurs solutions ne nous satisfaisaient pas entièrement. Les contraintes apportées par la CLPA à travers la gestion de la transparence n'étaient pas disponibles dans ces environnements et nous avons préféré développer notre propre solution. Celle-ci nous a permis d'aborder les différentes difficultés liées à la cartographie en passant par le Web.

Au départ du projet, les données cartographiques numériques n'existaient que pour la CLPA. Nous avons basé nos choix de développement sur ce type de données. La Carte de Localisation Probable des Avalanches est depuis 1990 progressivement mise sur le Système d'Information Géographique Arc/Info. Sur ce SIG, tous les éléments de la carte papier traditionnelle sont repris :

- extensions maximales des avalanches connues après enquête avec leur numéro : cette information est pour la majorité zonale, mais elle peut dans certains endroits être sous forme linéaire (flèche) ;
- estimation par photo-interprétation des zones avalancheuses. Comme pour les avalanches reconnues, cette information est majoritairement zonale et ponctuellement, linéaire ;
- limites de communes et des zones étudiées : c'est une information linéaire qui est indiquée en pointillés sur les cartes ;
- ouvrages de protection : cette information peut être zonale pour des reboisements, linéaire pour des rangées de paravalanches de filets ou le tracé d'un Catex ou d'une galerie, et ponctuelle pour des étraves ou Gazex. Cette information, indiquée en noir, est associée à des symboles qui représentent l'ouvrage, rangée de paravalanche ou étrave ; dans ce dernier cas, l'orientation de l'ouvrage qui entraîne l'orientation du poncif doit être indiquée ;

Pour ce faire, l'information est répartie sur plusieurs cartes, appelées chacune couverture.

Le choix concernant le développement d'une interface de visualisation des cartes accessible via Internet s'est porté sur la technologie des applets Java. L'applet développée est un ensemble de programmes qui permettent d'afficher les différentes cartes disponibles mais aussi d'établir des requêtes à partir de certaines d'entre elles. L'application de navigation cartographique permet une utilisation de cartes à des niveaux d'échelles différents : ces cartes étant digitalisées (elles sont toutes géoréférencées) leur superposition est possible.

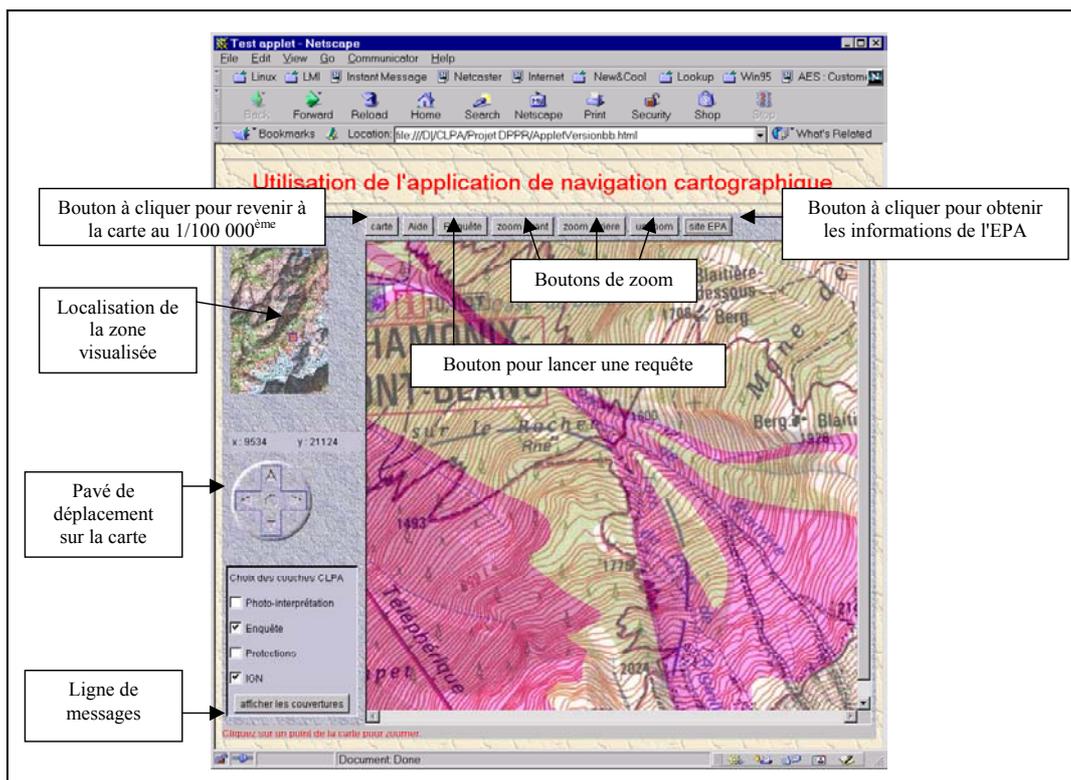


Figure 2.8 : exemple de l'applet avec l'affichage de la CLPA

Lorsque l'applet est chargée, une carte IGN au 1/100 000 de la haute vallée de l'Arve est proposée. L'application possède trois niveaux de zooms successifs : le premier permet d'afficher la carte IGN au 1/25 000 à partir de la carte au 1/100 000 ; le deuxième et le troisième permettent d'agrandir la carte au 1/25 000. A partir de ces deuxième et troisième niveaux de zoom, il est possible d'afficher des couvertures cartographiques supplémentaires (cadastre, CLPA et carte de zonage réglementaire du PPR) soit seules, soit en les superposant sur la carte IGN. L'affichage de la CLPA et de la carte de zonage réglementaire provoquent respectivement l'apparition des boutons libellés « EPA » et « Règlement », chacun d'eux permettant un accès aux informations de la base de données concernant ces deux types d'informations.

Cette applet nous a permis de tester les capacités de cartographie sur le Web en construisant l'ensemble du processus. Ainsi, nous pouvons protéger nos données grâce à un format propriétaire. Mais, à long terme, ce n'est pas une solution, étant donné que ce type de langage est

en constante évolution, ce qui fait que pour la stabilité du système, nous nous heurtons à des difficultés de maintien. Cette application peut donc être vue en tant que « prototype jetable », c'est-à-dire un prototype de développement qui sera fondamentalement transformé pour une véritable mise en place chez les utilisateurs.

Cette mise en place d'un système d'information sur les risques naturels a permis de montrer aux acteurs de la gestion des risques l'intérêt de ce type d'outils. Mais cela a aussi révélé des problèmes, liés aux contraintes informationnelles et à la récupération des informations issues des archives. Cette récupération de données nécessite un travail beaucoup plus important qu'un simple recensement suivi d'une saisie. Elle nécessite une véritable analyse de l'ensemble de ces informations pour essayer d'éviter, dans la mesure du possible, des incohérences, des erreurs, etc. avant d'effectuer une saisie qui peut se révéler extrêmement fastidieuse au vu des documents d'origines. Une fois cette saisie bien au point, le développement de ce type d'outils pourra se généraliser et passer à une utilisation courante, pour simplifier les démarches des services gestionnaires des risques.

2.4.2 Base de données pour une meilleure gestion

La prise en compte des risques naturels à l'occasion des opérations d'urbanisme engendre un flux important de données, notamment dans le cadre de l'établissement d'un PPR :

- récupération des informations disponibles sur les phénomènes ;
- production de documents de synthèse de ces données, essentiellement des cartes ;
- production de documents de zonage, qui intègrent les connaissances relatives aux phénomènes et aux enjeux ;
- traitement au cas par cas des demandes de permis de construire et de certificats d'urbanisme, voire d'expertises ponctuelles. Ce traitement utilise toutes les connaissances produites aux étapes précédentes et génère des *avis*, qui sont de nouvelles données, car l'échelle d'expertise est beaucoup plus fine. Les *avis* résultants posent un gros problème de cohérence entre parcelles voisines, car ils sont émis de façon ponctuelle.

Parallèlement, et de façon totalement indépendante, la nature continue de fonctionner en témoignant vis-à-vis de ces procédures une indifférence totale. Elle génère épisodiquement des phénomènes qui peuvent être exceptionnels, dont l'impact peut être catastrophique selon l'ampleur de ces phénomènes et la vulnérabilité des zones atteintes. D'un point de vue administratif, ces nouveaux phénomènes peuvent, dans certains cas, remettre en cause le zonage et les procédures associées d'un PPR. Du point de vue de la gestion des données, il faut s'assurer que ces événements sont convenablement décrits et enregistrés dans des bases de données, même si leur intensité et/ou leurs effets ne sont pas extrêmes (Brugnot *et al.*, 1999). Ainsi, la mise en place de bases de données spatiales devient un outil extrêmement intéressant pour la gestion quotidienne des risques naturels.

De plus, la mise en place de ces BD relatives aux risques est primordiale pour le développement d'approches par analyse spatiale. De nombreux travaux, menés parallèlement et conjointement à cette thèse concernant les risques naturels, s'intéressent à la mise en place de ce type de système.

Pour l'expertise des risques, l'analyse des données historiques est fondamentale. Outre les connaissances récentes issues de la CLPA pour les avalanches, l'EPA permet d'affiner notre connaissance avec des événements anciens. La mise en place de ces informations dans une base de données générale et accessible faciliterait l'expertise, tout comme un programme récent basé sur l'analyse historique. Un des objectifs de ce projet¹³ est de contribuer à une meilleure connaissance passée, et présente, des phénomènes avalancheux, notamment de faire un recensement cartographique précis des phénomènes tenant compte des variations de situations comme de l'évolution des conditions physiques et humaines du site étudié. L'appel fait aux historiens vise à intégrer des renseignements issus des archives anciennes comme à disposer de l'expertise de spécialistes de la lecture et de l'analyse des différents types de sources pouvant documenter la connaissance de ces phénomènes. Il s'agit aussi d'une réflexion à la fois théorique et méthodologique sur l'apport de la mémoire orale dans cette investigation et dans la connaissance de ces phénomènes (Cœur *et al.*, 1998).

L'approche historique, effectuée conjointement aux autres travaux de modélisations, d'enquête sur le terrain..., constitue une étape essentielle de l'analyse des risques, au plan technique comme pédagogique. En effet, au plan technique, elle permet de :

- dresser un historique des événements ;
- retrouver des caractéristiques des phénomènes passés, en particulier les phénomènes extrêmes ;
- comprendre les conditions de genèse du phénomène ;
- déterminer les fréquences de référence dans le cas où l'on dispose de séries de données fiables.

Au plan pédagogique, elle permet :

- de raviver la mémoire collective en rappelant que les phénomènes se répètent ;
- d'expliquer un zonage qui peut être différent par rapport aux derniers phénomènes récents.

Les données historiques disponibles ne sont que rarement graphiques. Il faut alors arriver à positionner l'événement sur un support géographique à partir des éléments textuels. Cette recherche s'intègre dans la base de données développées pour SIRVA. Il s'agit en quelque sorte d'ajouter un certain nombre de données issues des enquêtes historiques, pour rendre le système d'information plus dense, donc fournir plus d'information. Pour cela, ce projet s'oriente à part égal vers la collecte des données et la réflexion méthodologique sur la manière de collecter

¹³ Programme HISTOVAL, information historique et cartographie du risque avalanche, données factuelles et problèmes méthodologiques – Cemagref, Université Pierre Mendès France de Grenoble

l'information et la fiabilisation des données et documents produits. Une partie des difficultés vient de la manière de positionner géographiquement les données dans la base de données pour qu'il soit possible de trouver l'emprise de validité d'une information et réciproquement retrouver les informations relatives à un point donné du territoire.

Ce projet s'intègre dans les différents travaux de cette thèse, visant à la mise en commun de l'ensemble des connaissances concernant les risques pour faciliter et améliorer leur définition.

2.5 Raisonnement reposant sur la logique floue

Toute observation sur la nature comporte en définitive une part d'incertitude. Ainsi, le monde n'est pas entièrement rationnel, ni entièrement chaotique, mais c'est un mélange de choix, de calculs et de hasard (Haggett, 1973). En conséquence, l'incertitude fait partie de toutes les modélisations du monde réel. La logique classique, caractérisée par deux valeurs de vérité (vrai et faux) est inappropriée à la description fine et souple des connaissances. Elle est particulièrement inadéquate à la représentation et au traitement des connaissances vagues, imprécises ou, incertaines (Tong-Tong, 1995).

La théorie des ensembles flous (ou sous-ensembles flous, dérivé de l'anglais *fuzzy set*) reste relativement simple dans ses principes. Une fonction d'appartenance, comprise entre 0 et 1, qui généralise le concept de probabilité, définit le "niveau" d'appartenance d'un élément à un ensemble. Une fonction d'appartenance peut être qualitative (pas du tout, un peu, beaucoup, entièrement). L'utilisation des ensembles flous se prête bien à des cas où on dispose de mesures incomplètes et/ou imprécises (Rolland-May, 1985).

L'espace géographique flou est un espace aux limites non définies (Rolland-May, 1987). Cette définition correspond à nos structures spatiales liées aux aléas. Un espace géographique flou peut être doté d'un « cœur », défini comme un ensemble de points dont la fonction d'appartenance est égale à l'unité, « entourés » de points dont la fonction d'appartenance tend vers zéro au fur et mesure que l'on s'éloigne de ce « cœur ». Le concept d'ensemble flou n'est pas utile pour définir des espaces aux limites précises, comme les limites administratives (il s'agit la plupart du temps des espaces définis par les hommes).

Les objets n'appartiennent que partiellement à un ensemble flou, et peuvent être aussi membres de plusieurs d'entre eux. Tandis que les limites d'un ensemble standard sont « exactes », celles d'un ensemble flou sont estompées, et ces limites graduelles peuvent créer des contradictions (Kosko, Isaka, 1993).

Le terme de flou représente deux significations, l'imprécision et celle l'incertitude (Rolland-May, 2000). L'imprécision d'un objet se définit par le manque de netteté de cet objet, et l'incertitude est un état de doute dans la définition d'un objet. L'incertitude est donc liée, non à l'objet lui-même, mais à l'observateur.

Deux sortes d'objets géographiques aux frontières indéterminées peuvent être distinguées : les objets indéterminés par leur nature, pour des motifs sémantiques ou conceptuels (comme les aires

d'influence), et les objets dont les frontières floues découlent de l'impossibilité de faire des observations « exhaustives » et/ou d'imprécisions dans les observations (erreurs de numérisation, conditions d'observation,...) (Pantazis, Donnay, 1997). Cette vision très « informatique » des objets géographiques peut cependant être élargie pour se rapprocher de la réalité.

Cette définition formelle de l'espace flou induit des caractéristiques dont il faut tenir compte pour l'analyse spatiale :

- L'espace géographique flou est un espace différencié dans le sens où la valeur d'appartenance d'un objet à un ensemble n'est pas uniformément égale à 1 (présence) ou 0 (absence). Seul le cœur éventuel est un sous-espace homogène ;
- Cet espace est recouvrable. Cela veut dire que les composantes peuvent appartenir à plusieurs espaces flous à la fois, ceux-ci n'étant pas forcément disjoints (cela est aussi valable pour les ensembles « classiques »).

Pour l'espace géographique, le flou peut être expliqué par plusieurs facteurs, l'imprécision spatiale, l'incertitude spatiale et le changement de résolution.

La notion d'imprécision est plutôt liée à l'erreur aléatoire commise dans une mesure. Elle peut s'appliquer à l'erreur due au changement d'échelle (voir ci-dessous). Elle est souvent traduite par une loi de type normale (dit encore gaussienne).

L'incertitude spatiale résulte d'un manque d'information ou d'une information incomplète relatifs à un espace donné. Elle est donc liée à une connaissance imparfaite de ce dernier. Cette incertitude est particulièrement flagrante dans le cas des phénomènes naturels dès qu'il s'agit de prendre en compte les informations issues des archives. On arrive à savoir si un phénomène a touché une maison particulière, s'il a coupé une route, mais on est incapable de savoir où exactement se situe le contour de la zone concernée ou quelle est la limite extrême atteinte par l'avalanche.

Le changement de résolution est lié aux outils informatiques de type SIG. Les objets géographiques sont définis à une échelle précise, les transcrire à une échelle plus grande entraîne une incertitude (qui la plupart du temps n'est pas prise en compte). Pour exemple, une limite d'avalanche définie par expertise sur une représentation cartographique au 1/25.000 reporté sur un plan au 1/5.000 n'aura pas le même tracé et le report direct par simple superposition et agrandissement est faux.

Ainsi, pour les risques naturels, l'utilisation des ensembles flous est indispensable puisque nous cumulons l'incertitude spatiale, le changement de résolution et, dans une moindre mesure, l'imprécision spatiale (qui sera pratiquement négligée, à part pour ce qui concerne les effets des reliefs sur les écoulements des phénomènes). Nous aborderons ceci dans la dernière partie, en montrant une solution technique relativement simple de mise en œuvre qui prend en compte cette imprécision liée aux objets spatiaux.

2.7 Conclusion

Nous avons abordé dans cette partie les différentes difficultés liées à la mise en place de systèmes d'information pour l'étude de la vulnérabilité spatiale dans une perspective de gestion des risques naturels en montagne. Ces outils sont des aides précieuses à la gestion des risques comme nous l'avons vu avec le projet SIRVA. Ce dernier révèle les difficultés liées à la mise en place de SIRS et la gestion des données.

Les objets spatiaux incertains seront de nouveau abordés dans la partie 4, au travers des développements informatiques que nous avons mis en place. La gestion des données est de nouveau abordée dans la partie 3, grâce à une nouvelle modélisation pérennisant les développements de systèmes d'information gérant des données spatiales.

La mise en place des systèmes d'information, à référence spatiale ou non, nous fait progresser dans les différents domaines abordés (aide à la décision, connaissance des risques naturels, gestion des informations,...) tout en soulevant de nouvelles difficultés comme la gestion des données et l'information incertaine. Pour surmonter ces obstacles, un retour théorique sur la modélisation du système est indispensable.

3. Modélisation orientée objet pour les risques naturels

Dans une perspective d'aide à la gestion/décision pour les différents acteurs concernés par les risques naturels, il y a un besoin de mettre en place une méthodologie d'évaluation des risques naturels intégrant la majorité des paramètres. Ainsi, nous nous proposons de mettre en place un prototype de Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS) grâce au formalisme Orienté Objet issu de l'informatique. Cette approche permet de résoudre une partie des difficultés rencontrées jusqu'à maintenant comme le maintien à moyen terme du système et l'intégration de données issues de sources très diverses.

Ainsi, après une redéfinition des différentes variables composant les risques, nous présentons une approche de type prototypage, basée sur le formalisme UML afin d'obtenir une maquette d'outils opérationnels d'évaluation des risques naturels en montagne.

Une méthode définit une démarche reproductible pour obtenir des résultats fiables. D'une manière générale, les méthodes permettent de construire des modèles à partir d'éléments de modélisation qui constituent les concepts fondamentaux pour la représentation de systèmes. Il existe une multitude de méthodes. L'approche objet fournit les éléments de modélisation des logiciels (Muller, 1997) et permet une mise en forme de la connaissance. Le formalisme est un langage commun aux partenaires qui permet une rédaction sans ambiguïté de la modélisation. Il garantit ainsi une compréhension mutuelle.

Les approches dites relationnelles ont longtemps été les seules utilisées pour la modélisation et l'organisation des bases de données spatiales (Laurini, Milleret-Raffort, 1993 ; Caron, 1991), mais depuis quelques années, le développement des méthodes orientées objet répondent de mieux en mieux aux difficultés de gestion de données spatiales.

Au sein des approches orientées objet, une notation en est devenue le standard, l'UML. L'utilisation de ce langage fait l'unanimité dans le monde de la conception, tout comme dans les domaines de la géomatique (Claramunt *et al*, 1997).

La méthode UML est un langage graphique pour la visualisation, la construction et la documentation de logiciels et de systèmes d'information (Booch *et al*, 1999).

Le domaine d'application de cette méthode couvre tous les types de systèmes, qu'ils soient à base de logiciels ou non, ainsi que l'intégralité de leur cycle de vie depuis l'analyse des besoins jusqu'à leur implémentation.

De par sa notation, principalement graphique, c'est un langage simple et expressif, facilitant ainsi la compréhension et la communication. De plus, sa notation n'est pas figée et offre aux utilisateurs divers mécanismes d'extension. Enfin, c'est un langage qui se veut indépendant des méthodologies d'analyse ou de conception et des langages de programmation, donc qui offre une grande souplesse dans son utilisation au cours de la réalisation de différents prototypes sur différentes plate-formes, ce qui facilite la mise en place d'un cadre normatif.

Le choix de cette approche s'appuie sur les travaux réalisés ces dernières années sur la modélisation des SIRS (Bédard 1999b).

Cette méthode a pour objectif de représenter des systèmes entiers par des concepts objet, d'établir un couplage entre les concepts et les artefacts exécutables, de prendre en compte les facteurs d'échelles, de créer un langage de modélisation utilisable à la fois par les humains et les machines.

3.1 Modélisation des systèmes

La réussite des systèmes passe par une longue réflexion préalable. Avec le développement de l'informatique, cette réflexion est guidée grâce à la mise en place d'une série de modèles, donc de représentations du monde réel.

La modélisation a pour objectif de définir un modèle de données, qui permet à l'utilisateur d'exprimer ses attentes. Elle correspond à une représentation simplifiée de la réalité.

Par ailleurs, lors de la modélisation, selon le(s) concepteur(s) et les objectifs de l'application, les mêmes données peuvent être représentées par des concepts différents, d'où un modèle différent. Ainsi, la modélisation suivante correspond à un certain point de vue.

3.1.1 Modèle de développement

Il existe pour la conception des systèmes d'information plusieurs modèles de développement. Ces derniers ont pour objectif d'organiser les différentes phases du cycle de vie, de guider le développeur dans les activités techniques et de fournir des moyens de gérer le développement et la maintenance (ressources, délais, avancements, etc.).

En recherche, le modèle le plus adapté est le modèle de développement en spirale. Il permet la réalisation de plusieurs prototypes (ou versions) avant la réalisation du système réel (définitif), une validation progressive et précoce, et enfin une souplesse dans le choix des prototypes.

Ce cycle de vie itératif permet l'évolution de prototypes exécutables, mesurables, et donc permet de travailler sur l'évaluation d'éléments concrets. Il s'oppose ainsi au cycle de vie en cascade qui repose sur l'élaboration de documents, et ne permet qu'une validation tardive. Cette méthode par

itération facilite la prise en compte des problèmes et nous force à donner des résultats concrets régulièrement.

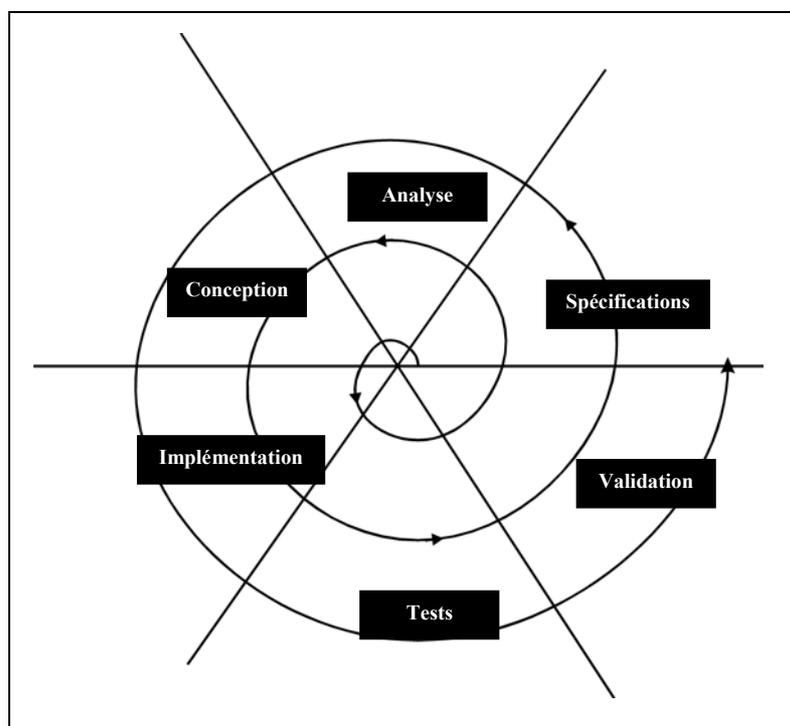


Figure 3.1 : Modèle de conception en spirale

Le cycle de vie itératif est souvent critiqué puisqu'il donne l'impression d'un manque de stabilité dans la définition des besoins de la part des utilisateurs. En fait, il n'y a pas de nouveaux besoins, il y a surtout des besoins sous-estimés ou mal identifiés durant la phase exploratoire. Ainsi, ce type de cycle de vie évite de paralyser la réflexion une fois le développement mis en route et permet de se concentrer en premier lieu sur les besoins majeurs pour incorporer, par la suite les besoins secondaires (Muller, 1997).

Pour éviter les difficultés liées à la définition des besoins, les cas d'utilisation apportent une très bonne technique ; leur élaboration oblige à imaginer comment on veut utiliser le futur système. Ceci reste difficile en l'absence d'éléments concrets, ce qui n'est pas le cas avec le cycle en spirale.

3.1.2 Niveaux de modélisation

La modélisation des données et des traitements est une phase importante dans ce processus d'élaboration des SIRS. Un modèle est représenté à l'aide d'un langage formel (formalisme) qui comprend des composantes sémantiques, des notations et des règles d'utilisation. La modélisation des traitements se traduit souvent par des diagrammes de flux de données permettant de représenter les dépôts de données, les flux et les procédures de l'organisation. La modélisation des données, quant à elle, s'exprime par des états successifs de modèles (conceptuel, logique et

physique), symbolisant différents niveaux d'abstraction entre la réalité et la base de données. Les données et les traitements peuvent être modélisés ensemble avec une méthode orientée objet telle qu'UML (Pouliot *et al.*, 1997).

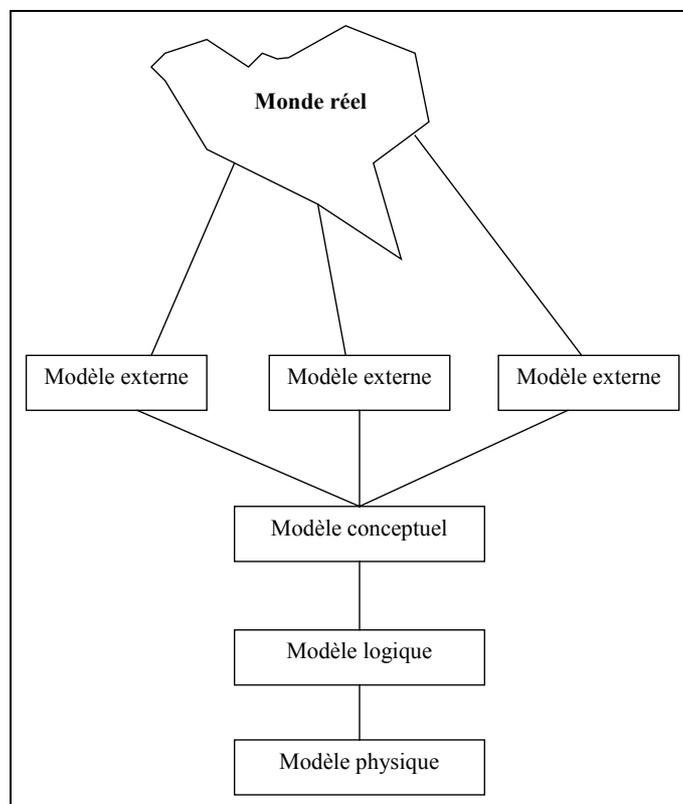


Figure3.2 : Niveaux de modélisation

Les modèles externes représentent, pour chaque utilisateur, le sous-ensemble du monde réel qui l'intéresse. Ces différents modèles peuvent être totalement indépendants les uns des autres puisque spécifiques à chaque utilisateur.

Le niveau conceptuel (ou modèle de classes selon UML) est le plus important, comme nous le verrons dans la partie 3.5. Il permet de schématiser le monde réel en fonction des utilisateurs et de commencer à structurer le futur système.

Le modèle logique est le premier niveau informatique adaptant le modèle conceptuel aux exigences des logiciels de bases de données.

Le modèle physique quant à lui correspond aux structures physiques des données, c'est à dire qu'il tient compte du matériel, des logiciels, des méthodes d'accès. Généralement, ce niveau n'est pas accessible aux utilisateurs.

3.2 Cas d'utilisations

Les cas d'utilisation décrivent sous la forme d'actions et de réactions, le comportement de notre futur système et les relations de celui-ci avec l'environnement.

Un cas d'utilisation est une manière spécifique d'utiliser le futur système. C'est l'image d'une fonctionnalité du système, déclenchée en réponse à la stimulation d'un acteur externe. Il modélise ainsi les acteurs (c'est à dire les entités extérieures au système, qui interagissent avec le système) et leurs interactions avec le système.

Les acteurs sont représentés par des « *stickman* » et les cas d'utilisation par des ovales. Ces schémas permettent alors d'avoir une idée des fonctionnalités que devra posséder le futur système.

Dans le cadre de notre étude, cette partie du travail de modélisation est simplifiée puisque le but premier est de construire un prototype pour montrer l'utilité de l'approche spatiale dissociant l'aléa de la vulnérabilité à l'intérieur d'un même système.

Nous avons comme acteurs dans cet exemple : les gestionnaires administratifs des risques naturels, le gestionnaire du système et les chercheurs. Les cas d'utilisation sont des exemples d'utilisation du système auxquels le système devra répondre.

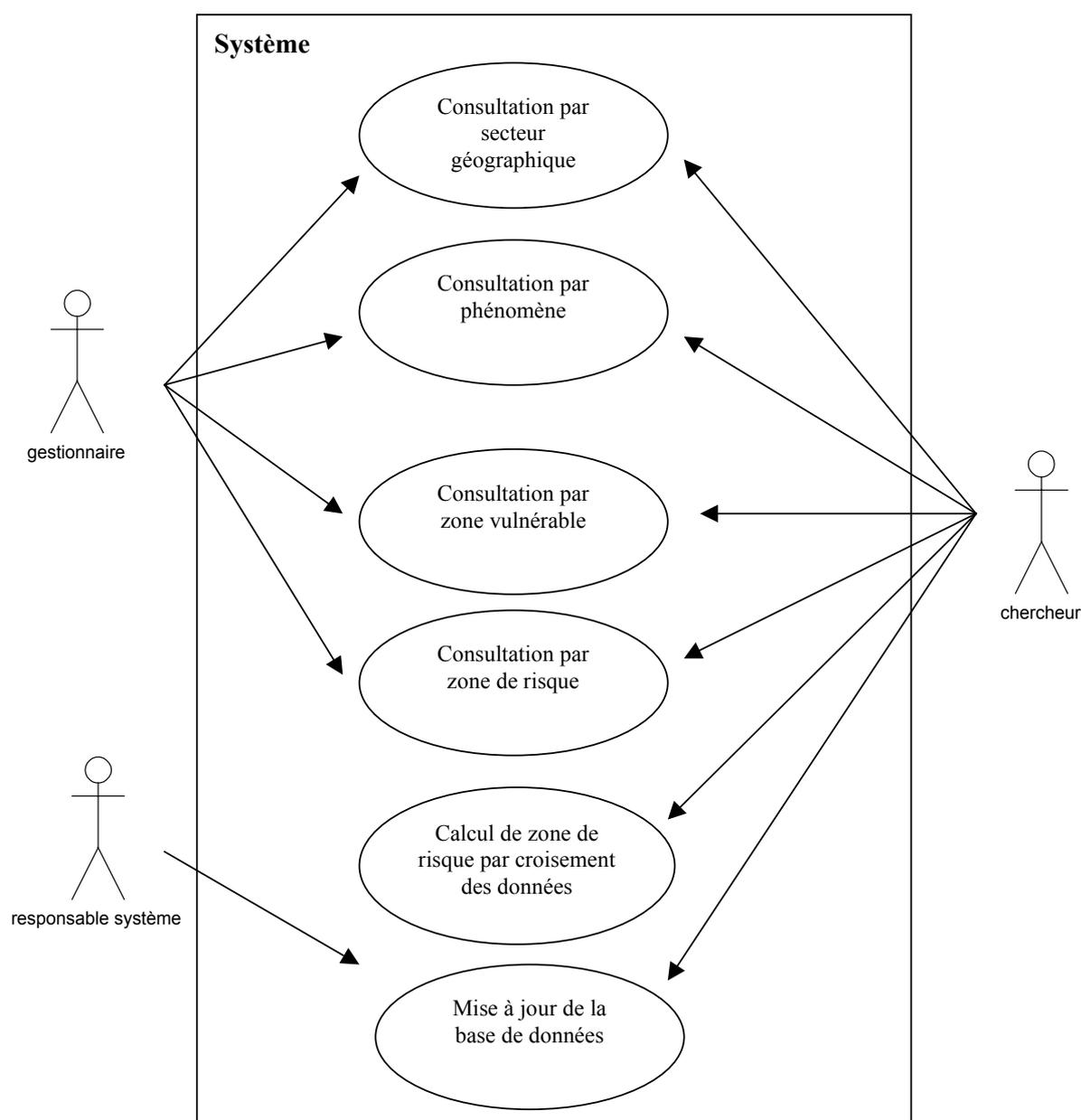


Figure 3.3 : cas d'utilisations

Les différents cas d'utilisation sont ensuite décomposés en scénarios, qui peuvent être présentés sous forme textuelle succincte ou sous la forme de diagrammes de séquence, qui définissent les interactions entre les objets selon un point de vue temporel (Muller, 1997).

3.3 Diagrammes de séquences

Ici, il s'agit de représenter chronologiquement les interactions (représentées par des flèches) entre les utilisateurs et les objets du système ou entre les objets eux-mêmes.

Etant donné qu'il s'agit de la construction d'un prototype, seuls quelques diagrammes sont présentés, illustrant quelques cas d'utilisation. Pour une mise en place complète du système, il nous faudrait réaliser l'ensemble des diagrammes correspondant à tous les cas d'utilisation préalablement définis avec les utilisateurs du futur système.

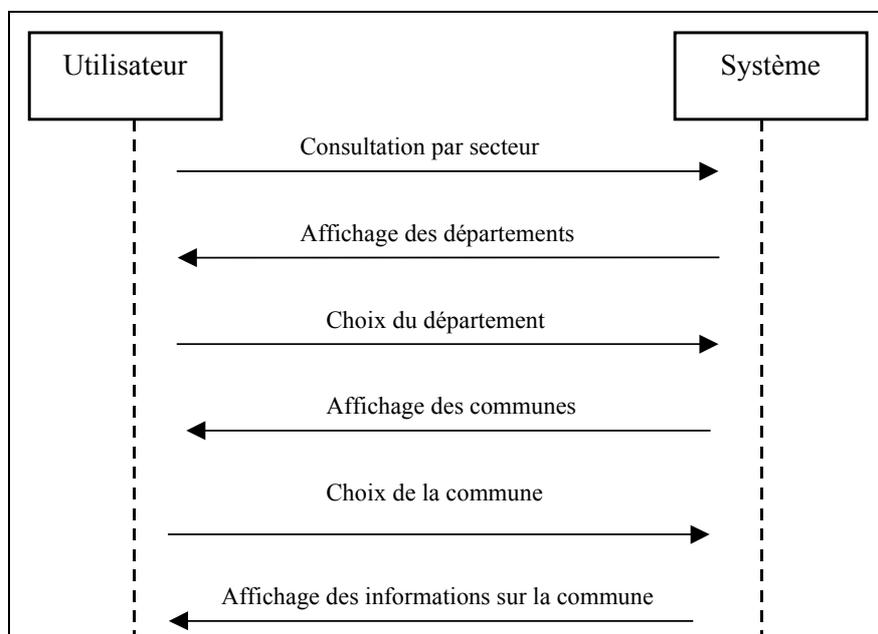


Figure 3.4 : consultation par secteur géographique

L'utilisateur doit ensuite affiner sa recherche par rapport aux risques naturels, concernant la commune choisie, par exemple (le choix de la référence d'entrée est la commune puisque c'est l'entrée logique pour une étude des risques naturels).

Les limites administratives sont une référence commune, donc simple d'accès et, surtout, les différents utilisateurs potentiels consultés (au sein des services déconcentrés de l'Etat) travaillent de cette façon.

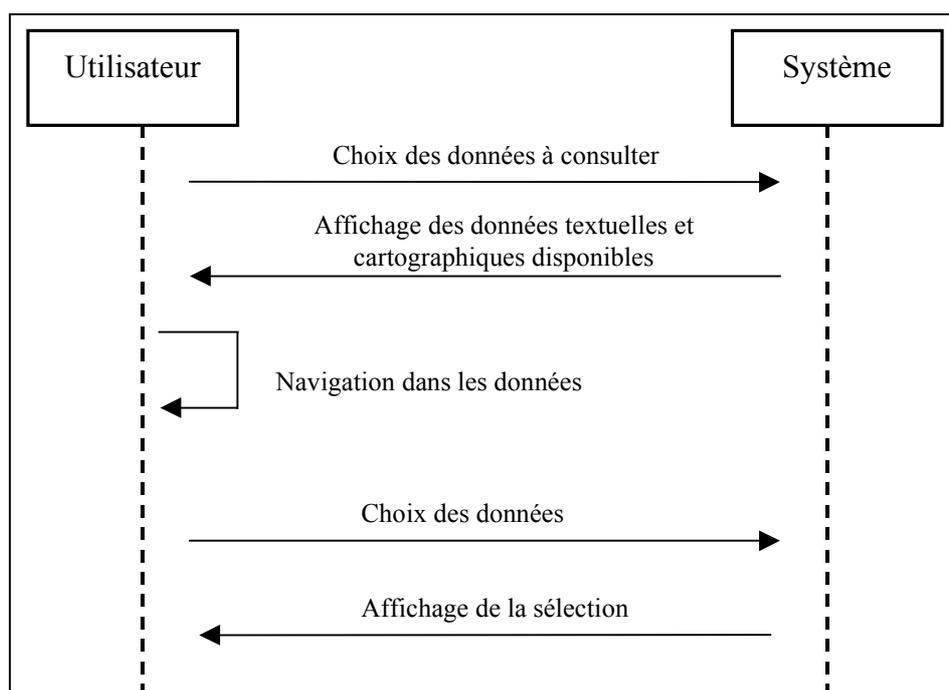


Figure 3.5 : raffinement d'une requête

Ces deux diagrammes représentent la vision la plus simple des possibilités du système, dans le sens où nous lui demandons uniquement de fournir les données disponibles. Il s'agit d'une fonction de base pour un système d'information, à référence spatiale ou non.

Dans une perspective de gestion des risques, deux entrées sont logiques pour utiliser le système soit les phénomènes naturels, soit les zones vulnérables (maisons, quartiers, villages, etc.).

Nous avons choisi de privilégier l'entrée par les phénomènes, ce que font souvent les gestionnaires des risques connaissant bien les secteurs urbanisés.

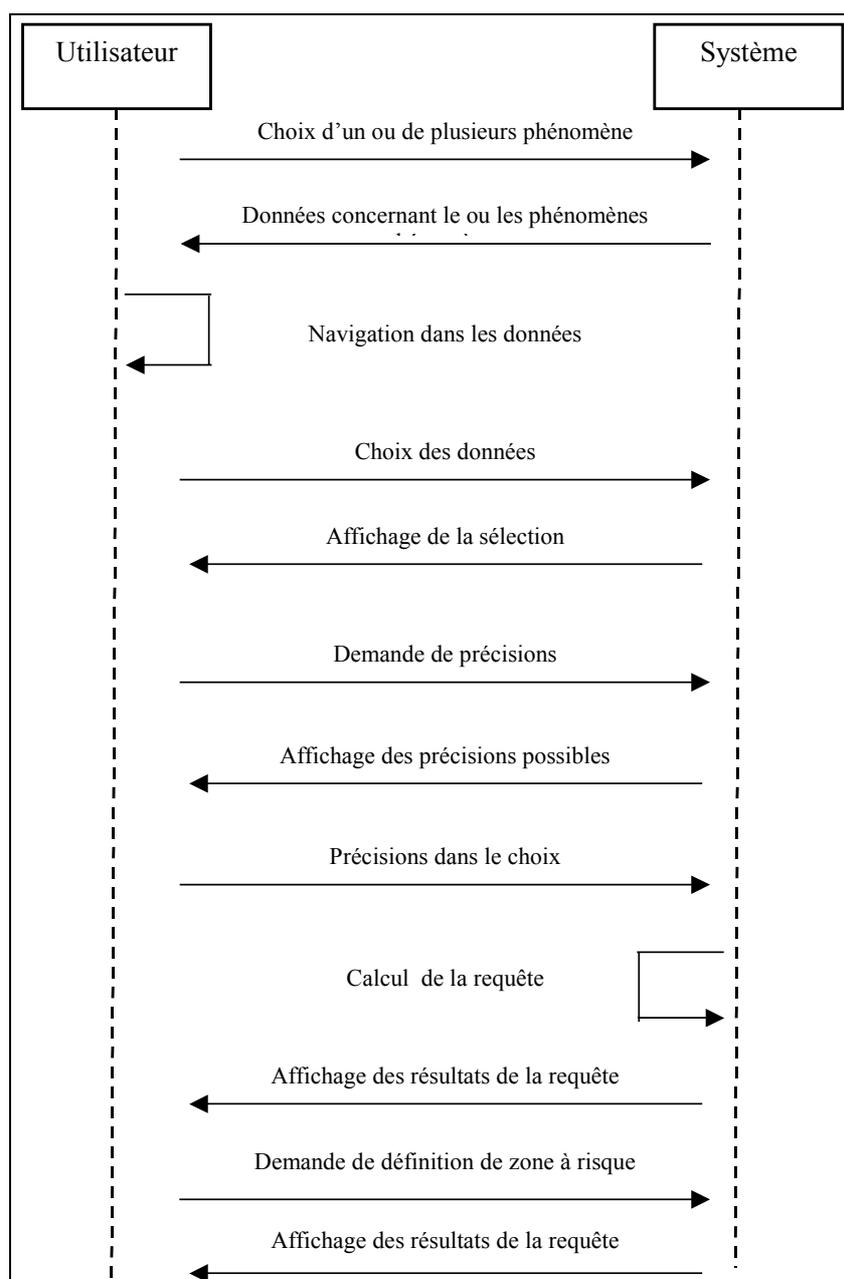


Figure 3.6 : consultation par phénomène naturel

Nous arrêtons là les cas d'utilisation, qui sont, nous le rappelons, des outils d'analyse utilisés pour déterminer ce que l'utilisateur attend du système, c'est à dire le « quoi » et le « quoi faire » du système. Dès lors que la description fait appel au « comment », il ne s'agit plus d'une analyse, mais nous entrons dans la phase de conception.

Nous avons utilisé les diagrammes de séquences selon un axe, celui qui correspond à la documentation des cas d'utilisation. Il s'agit de se concentrer sur la description de l'interaction, dans des termes proches de l'utilisateur sans entrer dans les détails.

3.4 Perceptory : un outil de modélisation conceptuel pour les SIRS

Développé pour la modélisation de la réalité dans la perspective de mettre en place des bases de données spatiales, ce CASE Tools (*Computer-Assisted Software Engineering* ou Atelier de Génie Logiciel), c'est-à-dire un environnement de conception de systèmes, permet d'intégrer la géométrie et l'évolution temporelle des objets dans le modèle conceptuel de données. Ainsi, en utilisant un langage visuel tel qu'UML associé à des pictogrammes représentant la géométrie, le modèle se trouve grandement amélioré, et sa compréhension facilitée. Cet UML « spatial » permet de formaliser notre modèle de l'espace. Par la suite, la construction du prototype utilisera les avancées apportées par ce type de démarche, aidant la modélisation des données spatiales (Bédard, 1999a).

Il s'agit d'un outil de maîtrise d'ouvrage et non de maîtrise d'œuvre.

Pour la géométrie, nous utilisons trois notations graphiques de base, nommées pictogrammes :

- forme à 0 dimension (un point) ;
- forme à 1 dimension (une ligne) ;
- forme à 2 dimensions (un polygone).

Pour que la compréhension visuelle du modèle soit explicite, Perceptory n'accepte qu'un nombre limité de combinaisons de pictogrammes, sachant que les autres sont définies dans le dictionnaire de données associé. Les combinaisons ci-dessous nous en donnent un exemple :

- forme complexe (un télécabine est composé par la ligne et par les pylônes) ;
- forme alternative (un bâtiment peut-être composé par un point pour une petite surface ou par un polygone s'il a une grande surface) ;
- formes multiples pour une instance ;
- toutes les formes possibles ;
- formes complexes (expliquées textuellement dans le dictionnaire) ;
- forme dérivée.

Pour le temporel, les principes sont les mêmes. Pour la gestion de l'existence, de l'évolution et des relations des objets, deux pictogrammes sont utilisés :

- existence instantanée (un bloc chute à un instant donné) ;

- durée avec un début et une fin (un bâtiment a été construit, et il a pu être détruit) ;

La combinaison des pictogrammes spatiaux avec les pictogrammes temporels nous permet de représenter l'évolution spatiale des objets. Retenons aussi que les carrés sont utilisés pour le spatial et les cercles pour le temporel.

Reprenant l'ensemble du formalisme UML, les modèles conceptuels de données sont adaptés à la gestion des informations spatialisées. Ainsi, à chaque classe d'objet est attribué un ou plusieurs pictogrammes comme l'illustre la figure ci-dessous :

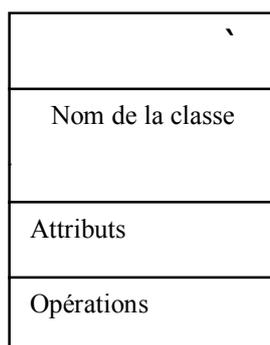


Figure 3.7 : classe d'objet spatiale

Avec ce formalisme, le diagramme de classe d'UML intègre les aspects spatio-temporels, donc permet d'être plus lisible pour les différents acteurs, en vue de mettre en place les principales caractéristiques d'un SIRS.

3.5 Diagramme de classes

Le diagramme de classe exprime de manière générale la structure statique d'un système, en termes de classes et de relations entre ces classes. De même qu'une classe décrit un ensemble d'objets, une association décrit un ensemble de liens (Muller, 1997).

Le diagramme de classe se construit sur des concepts établis. Par ailleurs, il sert de base à la conception de la base de données. Ce n'est pas seulement un outil de schématisation et de représentation du monde réel, mais également un excellent outil suscitant la discussion et le dialogue avec les utilisateurs. Un bon modèle doit être compréhensible et avoir l'aval des différents utilisateurs concernés par la conception de la future base de données, tout comme par les développeurs.

Il s'agit ici d'un modèle de classe du domaine, c'est à dire qu'il décrit le « métier » supporté par le système à concevoir.

Il nous donne une vision générale des éléments du système et des liens qui les unissent pour mettre en place un SIRS gérant les risques naturels. Il ne s'agit pas d'un récapitulatif de l'existant mais d'une première mise à plat des informations qu'ils nous faut organiser pour contribuer à une meilleure gestion des risques naturels en montagne, en intégrant la vulnérabilité en permettant une analyse spatiale pour l'étude des risques.

Les spécifications associées aux classes doivent être décrites de façon indépendante par rapport aux traitements. En effet, ces contraintes techniques ne doivent pas les influencer, leur intégration relève du logiciel d'implantation, et les faire apparaître dans le cahier des charges concernant les données risque de restreindre inutilement le diagramme (Barbaux, 1993). Nous obtenons le modèle de classes suivant :

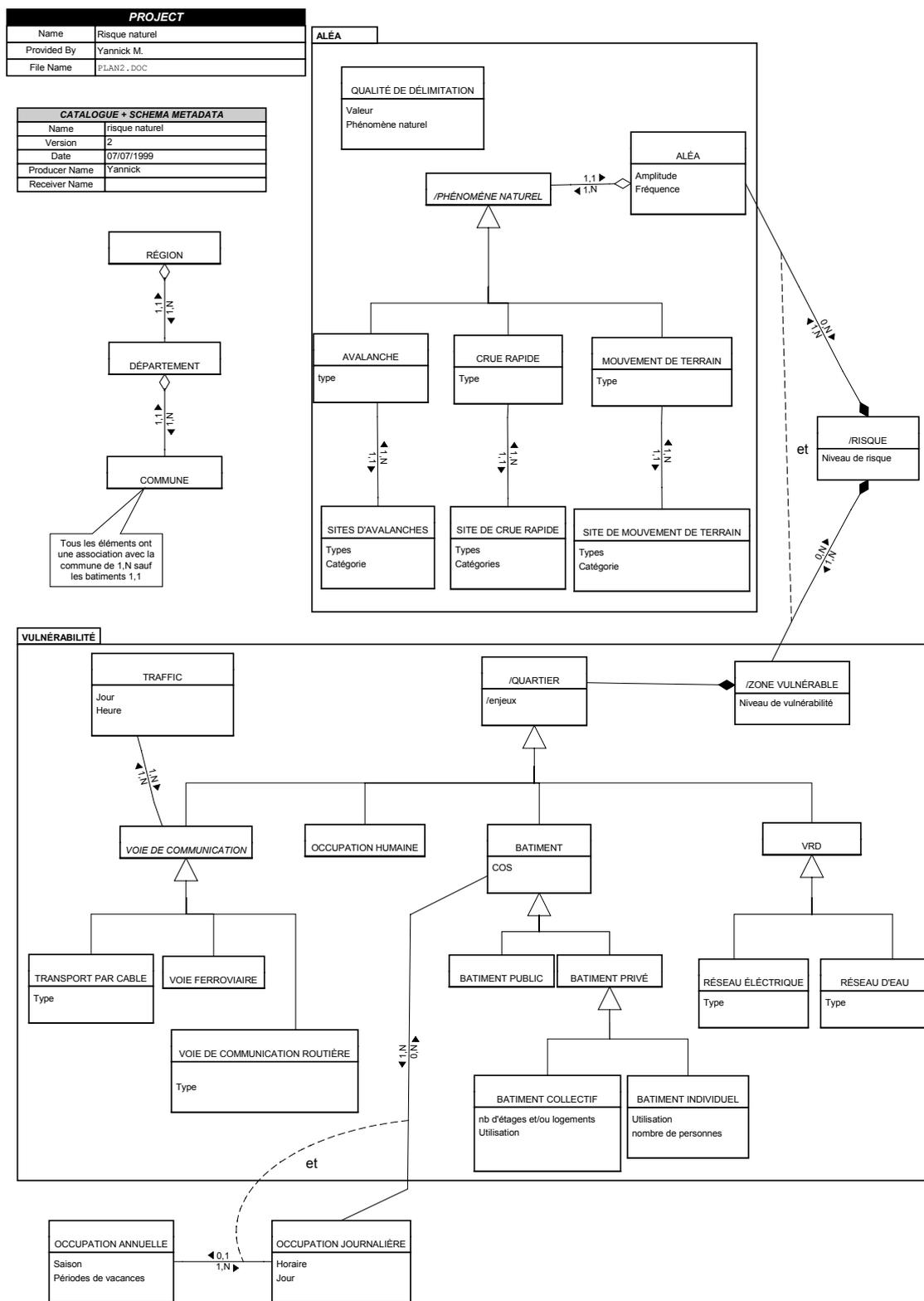


Figure 3.8 : modèle de classes

L'ensemble des spécifications est décrit dans le dictionnaire associé au diagramme. Ainsi, chaque classe est précisée en fonction des contraintes associées. Ce dictionnaire est en annexe A.

A travers les diagrammes de classes, la structure statique du système a été représentée : elle met en scène les classes et les relations existant entre elles. Cela permet de donner une vision générale des éléments du système et des liens qui les unissent. On peut donc voir le diagramme des classes présenté comme un récapitulatif de l'existant. Il permet notamment de comprendre, à l'aide des notions de classes et d'attributs, issus de la modélisation orientée objet, ce que représente tel ou tel objet pour les acteurs intéressés par le projet.

La phase suivante du développement est la création des tables de la base de données, qui est réalisée avec le modèle logique.

3.6 Modèle logique

Le niveau logique est le premier niveau informatique. Il permet d'adapter le modèle de classes aux exigences des Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD). C'est durant cette phase que l'on réalise la première optimisation du futur système. Dans notre cas, cette optimisation n'est pas vraiment utile puisqu'il s'agit surtout pour nous de tester les idées développées autour du modèle de classes, ainsi que de mettre en place des prototypes qui dépendent des données disponibles (ce qui, pour la gestion des risques naturels, pose toujours problème).

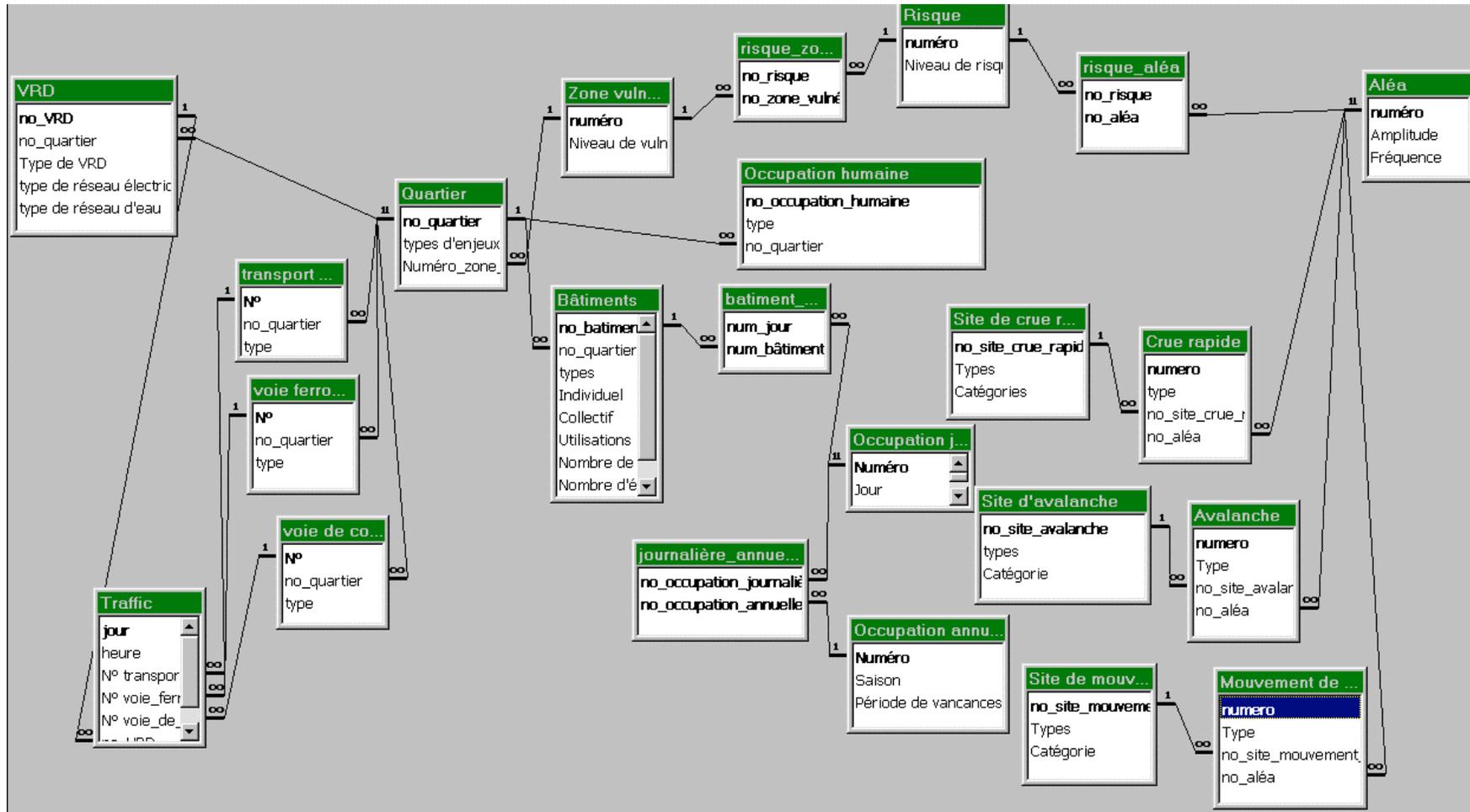


Figure 3.9 : structuration de la base de données

Ce modèle est testé sous Access®, mais d'autres modélisations et tests concernant notre problématique sont en cours sous Oracle 8i® dans le cadre du projet MurMur¹⁴ avec un autre formalisme, celui de MADS (Modélisation d'Applications à Données Spatio-temporelles) (Parent *et al.*, 1998).

Ce schéma relationnel permet la création de la base de données correspondant au système d'information.

3.7 Conclusion

Etant dans une logique de développement selon un cycle en spirale, nous ne montrons ici qu'un des états obtenus au moment de la rédaction de ce travail (qui est, pour la modélisation des systèmes, et surtout pour l'implantation, encore en cours).

Les méthodes classiques de résolution procédurale sont rapidement insuffisantes dans le cas des phénomènes complexes comme les risques naturels. Il est indispensable d'exploiter des connaissances empiriques pour appréhender efficacement un phénomène qui, par sa complexité, échappe à une représentation spatiale déterministe (Bolognesi, 1991). L'espace sert alors de référentiel commun aux différents processus qui entrent en compte, c'est pour cela que la modélisation des informations doit être liée à leur représentation spatiale.

Ce retour théorique nous montre que pour mettre en place un SIRS pour l'analyse des risques naturels en montagne, il nous manque encore des méthodes. Ainsi, cela nous permet d'orienter notre démarche vers des méthodologies d'analyses spatiales ainsi que vers le développement de système à «taille humaine», comme nous allons le voir dans la partie suivante.

¹⁴ MurMur : Multiple Representations – Multiple Resolution, programme européen IST – 1999 - 10723

4. Raisonnement spatial pour les risques naturels en montagne

Nous l'avons vu, la législation et la prise en compte des risques naturels évoluent en permanence. Ainsi, de nouveaux outils sont nécessaires pour accompagner une telle évolution. Logiquement, les SIRS se trouvent bien adaptés aux différentes approches des risques actuelles, que ce soit pour leur connaissance ou pour leur gestion.

La gestion des risques est définie comme étant le processus d'intégration des résultats d'analyse de risque selon des considérations sociales, économiques et politiques, afin de parvenir à une décision. Dans une approche rationnelle du risque, cette décision ne peut être prise qu'après mise en perspective du risque, selon ces mêmes critères sociaux, économiques et politiques. Bien entendu, ces critères, et ces méthodes d'appréciation, doivent être définis avant et non pas au cours de la prise de décision (Leroy, Signoret, 1992).

C'est pour cela que cette partie s'articule autour de l'analyse spatiale. La mise en place de systèmes d'information contribue à l'amélioration de la gestion des risques, comme nous l'avons vu avec le projet SIRVA, mais cela reste insuffisant. L'utilisation des techniques d'analyse spatiale (sur des supports informatiques mis en place grâce aux systèmes d'information) permet d'améliorer la connaissance sur les aléas, mais surtout sur la vulnérabilité et les risques, comme nous le verrons.

4.1 Applications pour une gestion spatiale des risques

Etant donné le nombre de techniques, d'outils, et la diversité des données disponibles dans le cadre de l'étude des risques naturels, nous avons privilégié un travail méthodologique plutôt que d'apporter une « solution miracle » utilisant une partie des outils au service de l'analyse spatiale. Cela, d'une part parce que les outils évoluent en permanence et d'autre part, leur mise en œuvre dépend des moyens que nous mettons pour les développer. A partir d'un raisonnement à plusieurs niveaux, nous donnons un éventail de choix, en fonction des besoins et des ressources disponibles.

4.1.1 Zonage flou et risque flou

Pour illustrer les contraintes informationnelles ainsi que l'approche par le flou, un développement à partir de données géographiques a été mis en place. Au travers de cette application, nous abordons les différentes difficultés expliquées dans les parties précédentes, avec les données disponibles concernant les risques.

Le secteur d'étude concerne un versant avalancheux, comme l'illustre la vue en trois dimensions suivante :

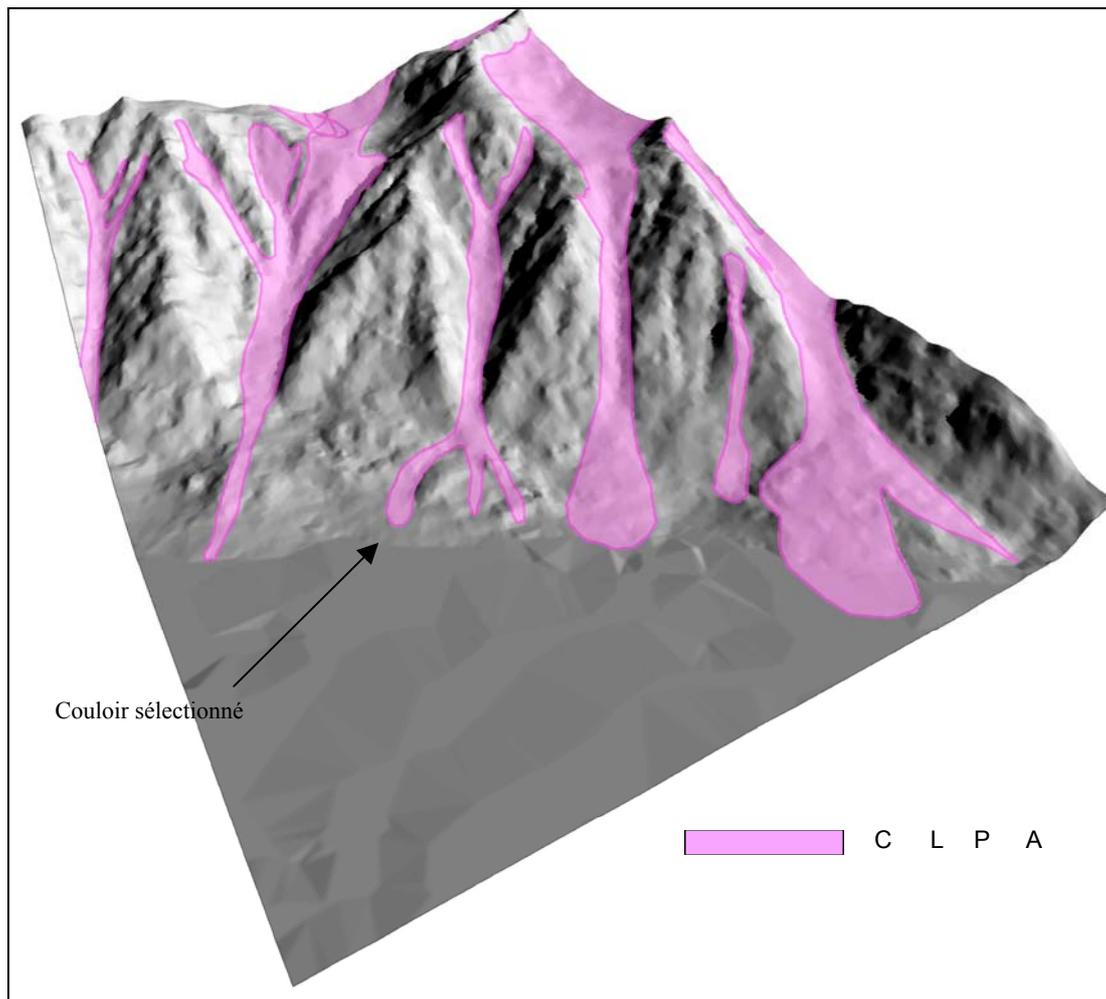


Figure 4.1 : Avalanche concernant notre versant exemple

Un des couloirs a été sélectionné. Il correspond à celui où la topographie convient le mieux au fonctionnement d'un modèle simple d'écoulement d'avalanche (Naaim, 1999).

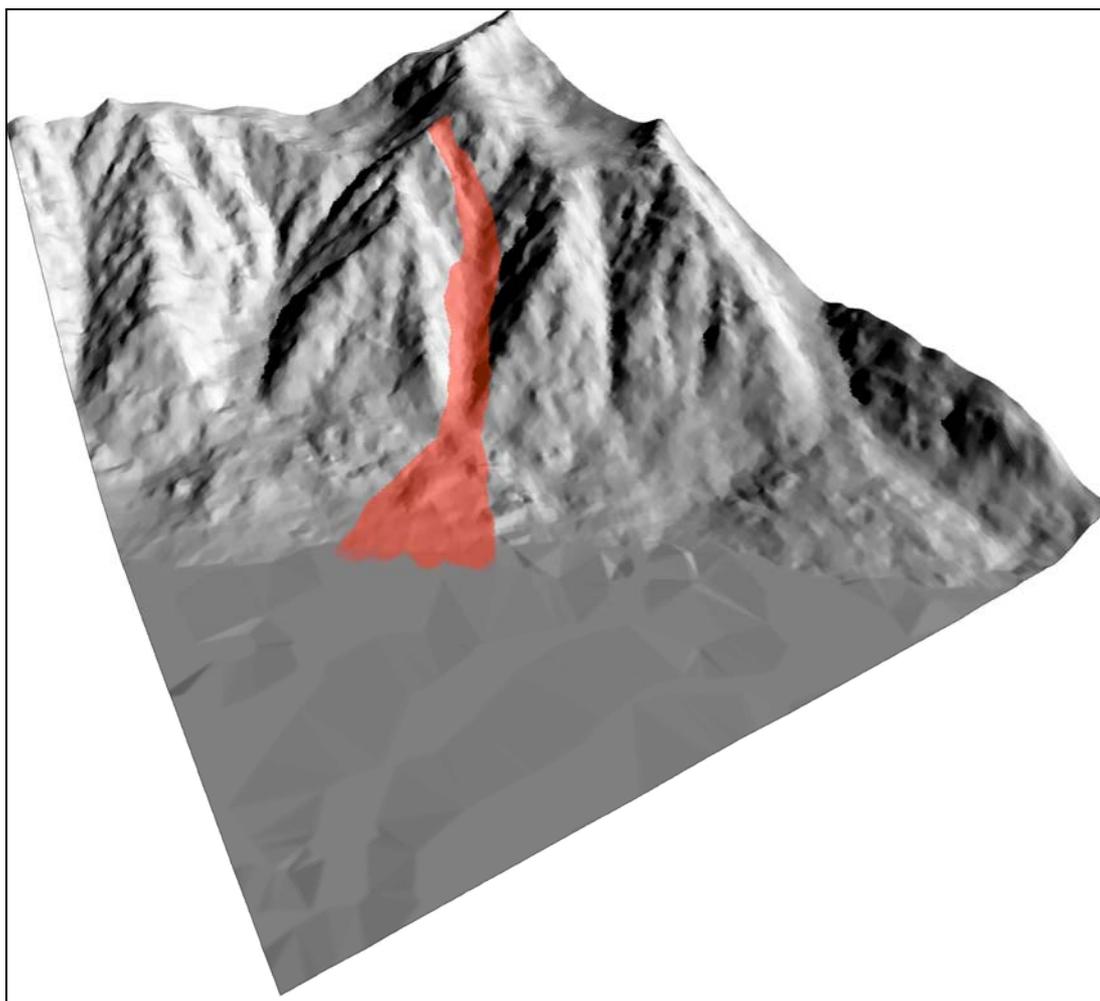


Figure 4.2 : résultat du modèle sur un des couloirs

Ces deux figures nous montrent que les résultats diffèrent sur la zone d'arrêt de l'avalanche entre les résultats d'une modélisation et le contour tracé sur la CLPA, ce qui n'est pas rare puisque la CLPA reste une carte des événements connus, donc ne définit pas un aléa ni un secteur soumis à un risque.

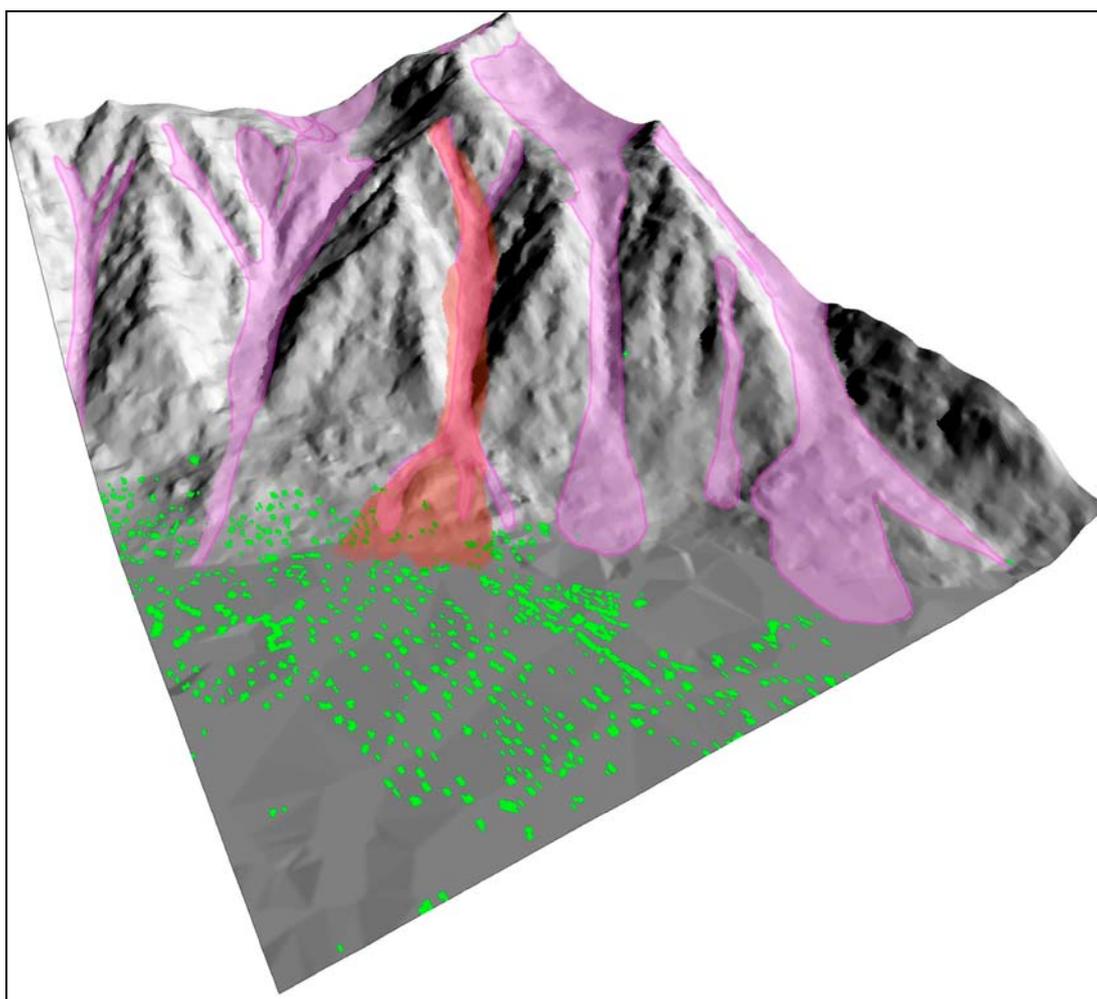


Figure 4.3 : comparaison de la CLPA et d'une modélisation

Nous voyons, sur la figure précédente, que la modélisation englobe des bâtiments, ce qui implique l'existence d'un risque.

Les modélisations numériques maximisent l'aléa par rapport à nos connaissances empiriques des phénomènes. Définir à partir de connaissances historiques un aléa centenaire n'est que rarement possible, alors que numériquement, nous pouvons le « calculer ». Ces résultats demandent à être améliorés, ou plutôt affinés, mais dans l'état actuel des connaissances, voilà le type de résultats que nous obtenons. La figure suivante illustre la différence entre le calcul d'une avalanche et sa connaissance historique.

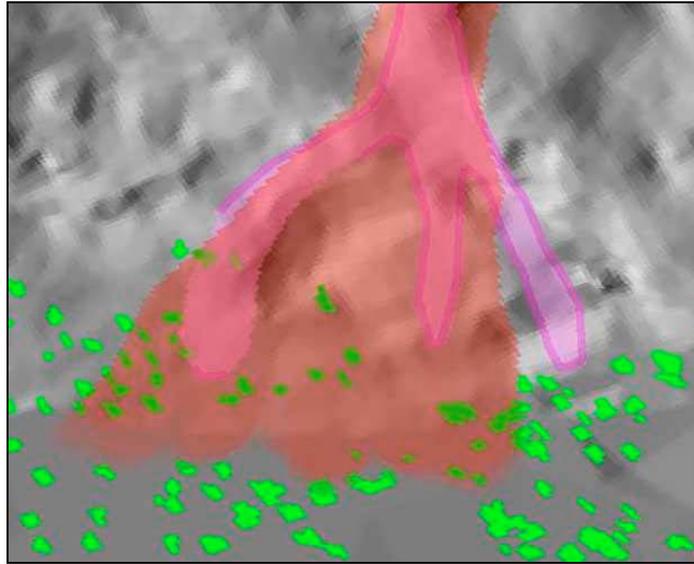


Figure 4.4 : agrandissement de la zone d'arrêt de l'avalanche

La modélisation des avalanches restant du domaine de la recherche, un degré de certitude de la limite d'arrêt doit être utilisé. Il s'agit d'intégrer dans le raisonnement l'incertitude spatiale liée au phénomène et, dans une certaine mesure, l'incertitude des calculs.

Les études à propos de l'incertitude spatiale (De Groeve, 1999) considèrent que l'appartenance d'un objet aux zones d'incertitudes est une fonction décroissante qui dépend de la distance séparant l'objet de la limite du phénomène cartographié.

Pour répondre à cela, un buffer de dix mètres autour des classes de pression est mis en place. Il est pris en fonction de l'erreur du résultat du calcul. Cette erreur est dépendante des paramètres d'entrées du modèle, c'est à dire le type de neige, le volume de neige mobilisé, et la précision de la topographie. Ces paramètres peuvent se cumuler mais pas forcément les erreurs. En moyenne, l'erreur finale du modèle est de l'ordre d'une dizaine de mètres, ce que nous avons retenu pour ce calcul. Cela nous permet de définir des objets aux limites indéterminées. Ainsi, le buffer est-il adapté en fonction d'une carte des pentes selon la méthodologie suivante :

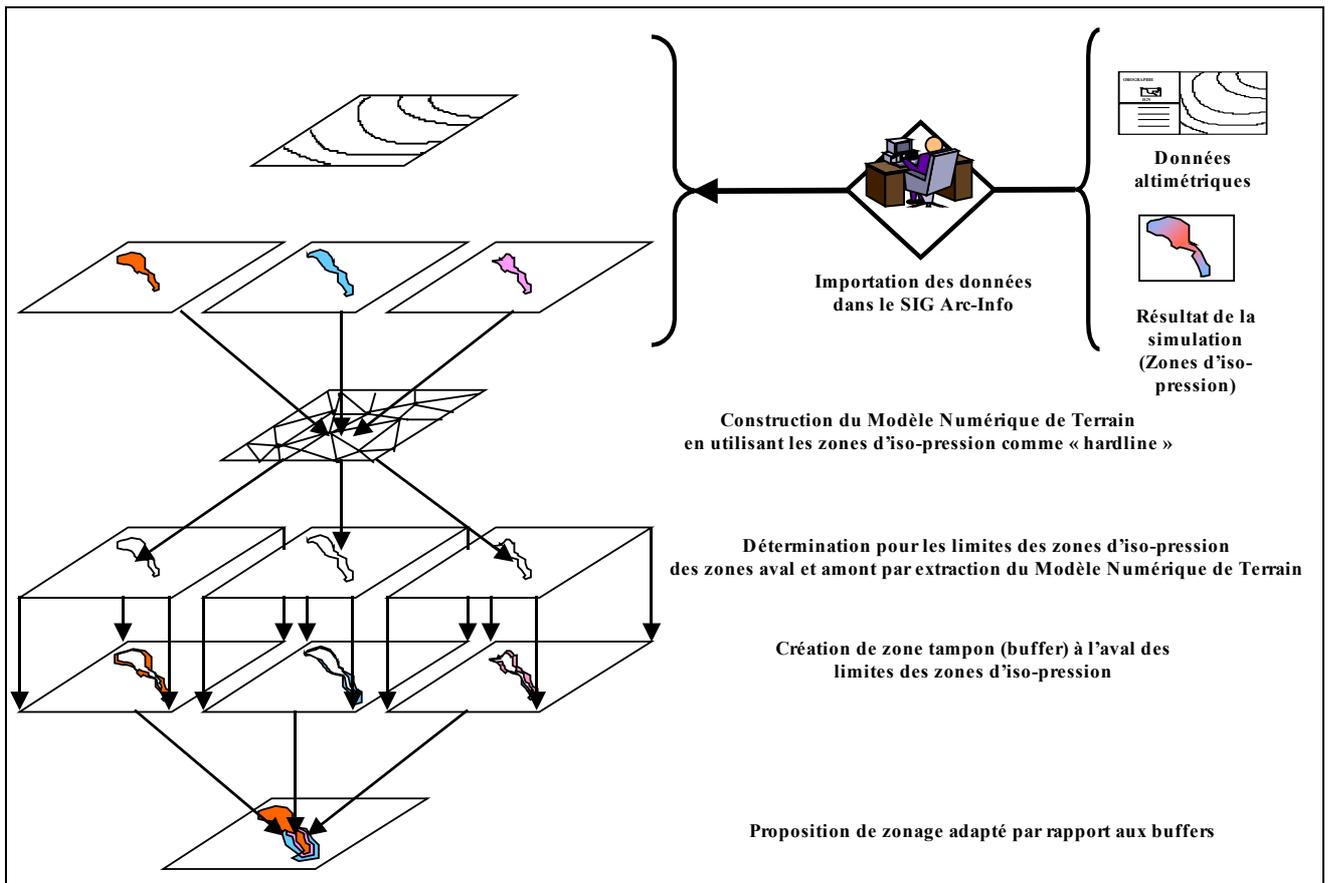


Figure 4.5 : méthodologie de mise en place du buffer sous Arc/info

Les zones tampon sont calculées par extraction de classes de pressions égales ainsi que du modèle numérique de terrain pour tenir compte du relief et de la validité des résultats de la modélisation.

Cela nous permet d'obtenir le résultat suivant :

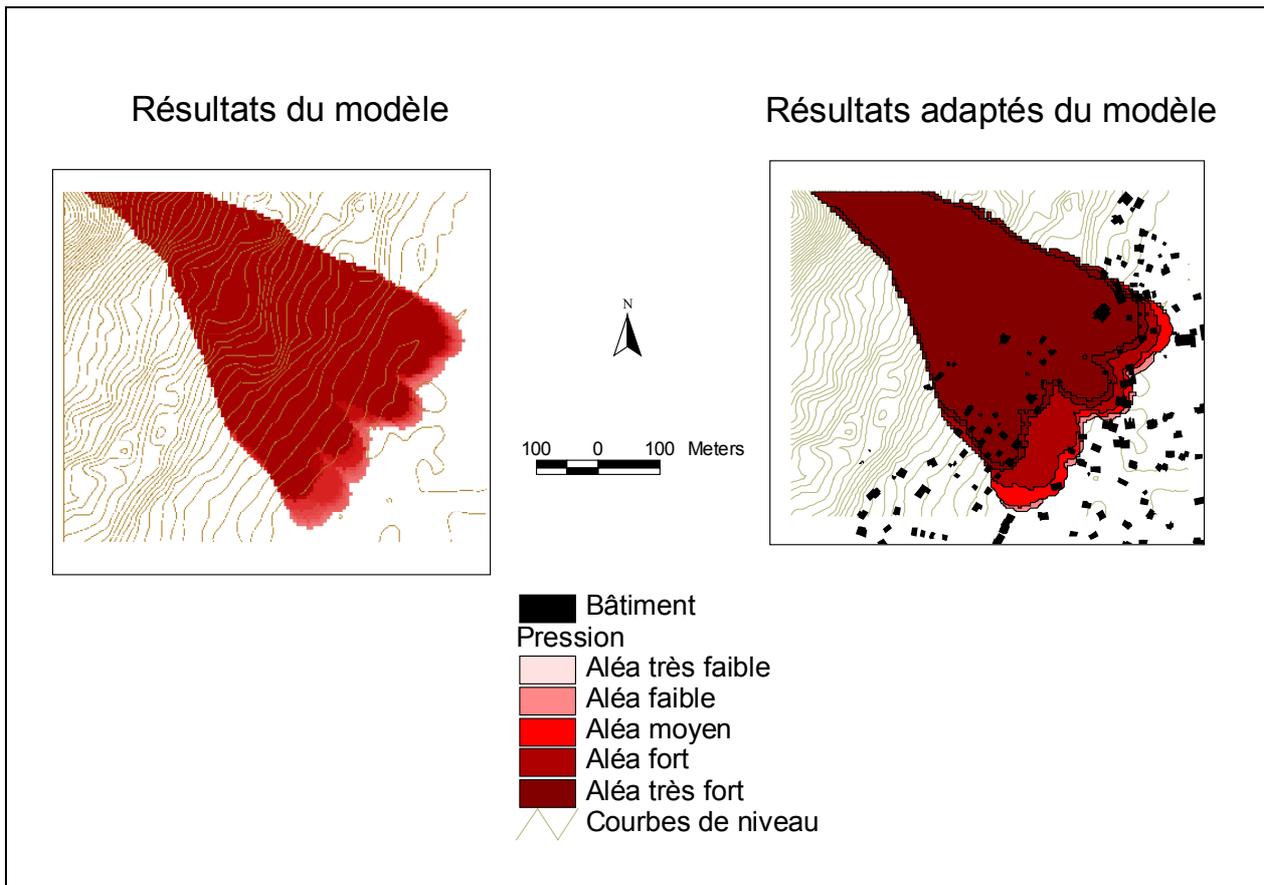


Figure 4.6 : comparaison de la modélisation simple à la modélisation adaptée

Un raisonnement reposant sur la logique floue nous permet de créer une échelle d'endommagement d'ordre qualitatif à partir d'un champ de pression adapté en fonction d'un degré d'incertitude (nous verrons dans la partie 4.2.2 que cet endommagement n'est pas encore clairement défini).

A la condition d'avoir une étude des fréquences, nous pouvons déterminer un zonage d'aléa à partir de cette approche. Cette étude des fréquences couplées aux pressions définit alors un aléa à trois niveaux.

On note T la classe de période de retour du phénomène :

- T_1 : période de retour égale à 100 ans ;
- T_2 : période de retour égale 20 ans
- T_3 : période de retour égale 5 ans
- T_4 : période de retour inférieure à 5 ans.

L'intensité est notée I :

- I_1 : sollicitation inférieure à 5 kN/m^2 ;
- I_2 : sollicitation comprise entre 5 kN/m^2 et 15 kN/m^2 ;
- I_3 : sollicitation comprise entre 15 kN/m^2 et 30 kN/m^2 ;
- I_4 : sollicitation supérieure à 30 kN/m^2 .

la procédure de zonage de l'aléa peut se résumer dans le tableau suivant :

Classe de période de retour				
T_4				
T_3				
T_2				
T_1				
	I_1	I_2	I_3	I_4
	Intensité			

Figure 4.7 : tableau de classification des aléas

Nous obtenons un zonage d'aléas de référence à trois niveaux, fort, moyen faible, comme la réglementation le préconise (ces différentes classes sont données ici à titre d'exemple).

Cette procédure n'est qu'exploratoire et est présentée pour illustrer les capacités du système à générer automatiquement une proposition de zonage d'aléa. Les modèles numériques fournissent ce type de résultats, ce qui facilite grandement le zonage en définissant ainsi un aléa de référence. Cet aléa à trois niveaux peut être comparé à une vulnérabilité définie selon trois niveaux. Cela permettrait de réaliser des cartes de risque, ou plutôt de déficit de protection puisqu'il s'agit de travailler sur l'existant.

4.1.2 Evaluation d'un risque indirect

Un phénomène naturel peut causer des dommages directs ou indirects. Dans le premier cas, le dommage est lié à une atteinte directe à des personnes ou des biens et l'évaluation du risque est assez simple si on dispose d'informations sur la fréquence des phénomènes, la nature des biens et les fonctions d'endommagement. Dans le second cas, l'objet atteint peut ou non subir un dommage, mais la perte économique principale est due à la perte de fonction causée par le phénomène. Un cas classique est celui des réseaux, notamment des réseaux routiers. Prenant en considération que ce type de vulnérabilité indirecte peut être évalué par une analyse de

l'accessibilité (partie 1.3), un développement a été entrepris. Il concerne la haute vallée de l'Arve, autour de la commune de Chamonix en Haute-Savoie.

4.1.2.1 Risque indirect : une perte d'accessibilité

Il s'agit de mesurer, d'une manière qualitative, les effets distants des phénomènes. Rappelons que notre définition de ce risque est (partie 1.3.3.2) : les perturbations fonctionnelles des réseaux qui structurent le territoire. Ces dysfonctionnements, ces impacts liés aux difficultés de fonctionnement (échanges et communications), sont qualifiés d'impacts indirects. Ces perturbations correspondraient à des arrêts d'activités et à des ruptures de circuits économiques.

Par vulnérabilité indirecte, on comprend ce qui n'est pas exposé à des dommages directs (comme les pertes humaines, les dégâts au bâti, aux cultures...) consécutifs à l'action destructrice d'un phénomène naturel.

D'un point de vue spatial, on prendra comme distinction entre les deux types de vulnérabilité (directe et indirecte), le fait que les impacts indirects sont aussi et surtout localisés à l'extérieur du périmètre circonscrit par le phénomène naturel donné. Quelle que soit la cause de la rupture sur le réseau, la perte d'accessibilité s'évalue entre plusieurs points dits « stratégiques » (villes, gares, hôpitaux, passages de cols...) desservis par le réseau.

4.1.2.2 Définition de l'accessibilité

L'accessibilité peut être déterminée comme la quantité de biens, de services, d'emplois, qu'un individu peut joindre à partir d'un point donné, compte tenu des infrastructures routières présentes, de son mode de déplacement et de l'attractivité de la destination. Elle dépend de l'état des moyens de transport et représente un coût : le monde entier est accessible en tous ses points, mais le coût d'accès peut être très élevé (Brunet *et al*, 1992).

Les opportunités qu'offre le territoire ne prennent de sens qu'à travers les conditions de transport qui permettent d'y accéder et inversement : les conditions de transport procurées par le réseau n'ont d'intérêt qu'en fonction des destinations desservies.

Des enquêtes de circulation montrent que le volume des déplacements décroît lorsque le temps de parcours pour atteindre une même destination (lieux de travail, de loisirs, de consommation...) augmente. Ainsi, toute augmentation de ce temps de parcours pour se rendre à une destination diminuera d'autant son attractivité.

L'accessibilité peut se définir selon des temps de parcours. Elle se mesure par des potentiels et par la théorie des graphes, dont on tire des matrices de connectivité.

Dans le cadre de notre étude, l'accessibilité sera définie comme **une distance réseau mesurée en temps de parcours**.

4.1.2.3 Modélisation du réseau routier

Dans le but d'implémenter notre méthode de recherche à travers un Système d'Information Géographique, il est indispensable de réaliser « un modèle » de données du réseau. Cette modélisation permet de visualiser les liens entre tous les composants du réseau.

La base de données saisie se compose d'objets géométriques, nœuds, arcs et surfaces, repérés par des coordonnées en X et Y dans un système de référence. Chaque arc, élément structurant de la base, est délimité par un nœud de début et un nœud de fin.

Les différents types de routes, entités définies et identifiables, sont composés de tronçons de route. Un tronçon de route est toujours un objet linéaire. A ce tronçon sont associés de nombreux attributs :

- les sens de circulation ;
- les restrictions des tronçons ;
- l'aspect physique est un attribut qui donne une information sur les propriétés physiques et de circulation de la section de route. Cela peut-être la qualification de la section en rond-point, en bretelle d'accès, en voie rapide (une route est ainsi définie si elle ne comprend pas de croisement à niveau), en voie à deux chaussées séparées et avec des carrefours, mais également une description de la qualité du tronçon (sinuosité, dénivellation, absence de revêtement...).

Cette classification diffère de la dépendance fonctionnelle de l'élément de route, qui précise, quant à elle, le rôle joué par le tronçon dans la connectivité de l'ensemble du réseau (compose, relie, associe, délimite...). Chaque entité, représentée par une table, possède un ou plusieurs liens hiérarchiques (associations de dépendances fonctionnelles). Chaque association est caractérisée par des cardinalités, qui s'expriment par deux nombres. Ceux-ci indiquent combien, à une entité de la classe de départ, correspondent au minimum et au maximum des entités de la classe d'arrivée (Laurini, Milleret-Raffort 1993).

Dans la figure suivante (figure 4.8), une route est composée de un ou plusieurs segments de route. Un segment de route n'appartient qu'à une route et une seule. Cela nous permet d'effectuer des ruptures sur les segments, et d'avoir le résultat sur l'ensemble d'une route et ainsi de raisonner à plusieurs niveaux : section subissant un ou plusieurs phénomènes (donc touchée par un risque direct) et perte d'accessibilité par rapport à la route complète.

Des attributs qualifient ces objets ou groupes d'objets géométriques. L'ensemble des informations codées s'organise en fonction d'un modèle de données conceptuel. Ce modèle permet d'implanter correctement nos données dans un système pour qu'il réponde à nos besoins (en l'occurrence, effectuer des calculs d'accessibilité).

La modélisation s'appuie sur un formalisme relativement simple. Les classes d'entités sont représentées par des rectangles, les associations par des ovales reliés par des traits aux classes d'entités concernées. Le long de ces traits, on précise les cardinalités des associations comme dans le diagramme suivant :

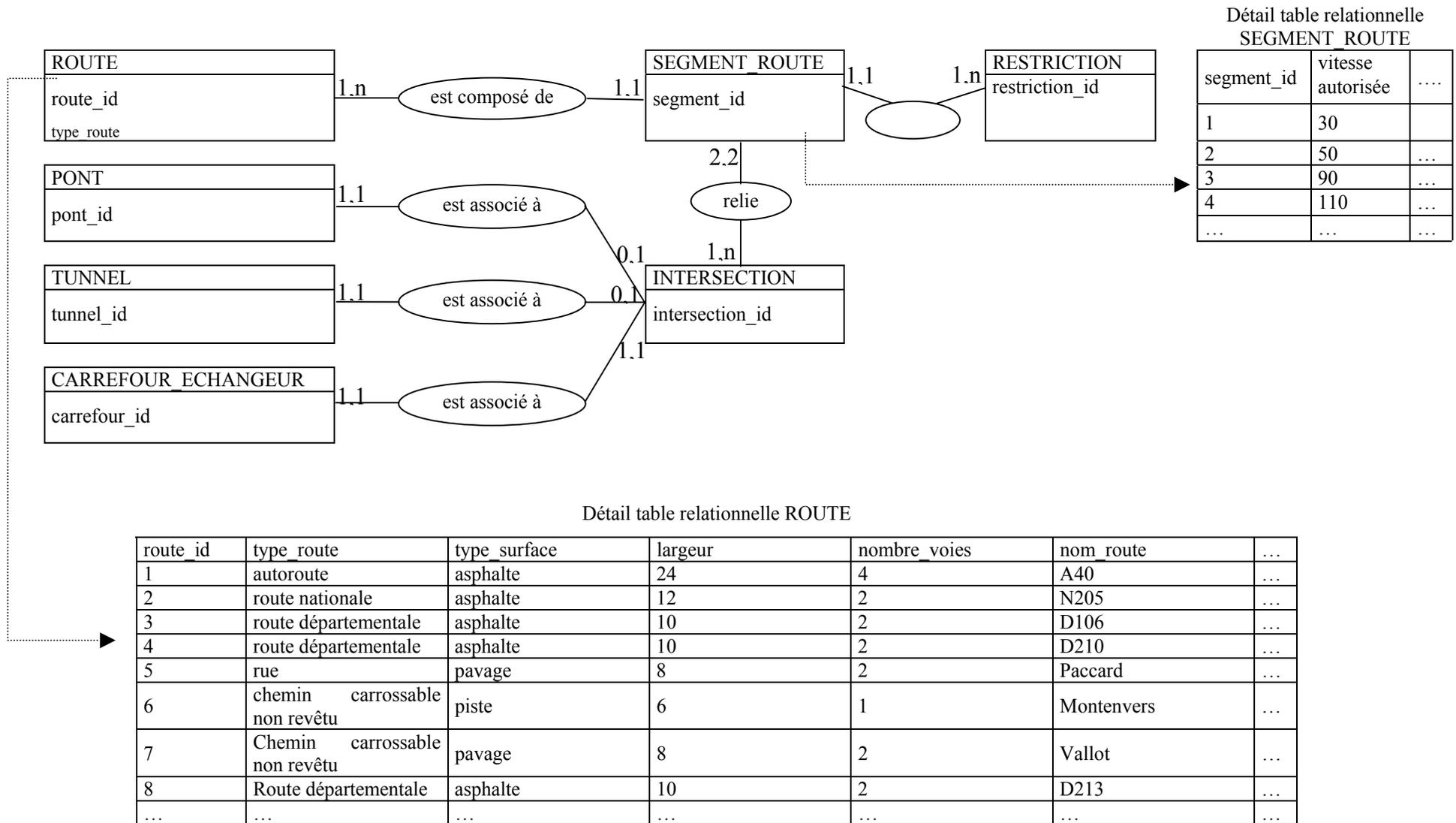


Figure 4.8 : Modèle simplifié du réseau routier

Ce modèle simplifié du réseau routier (nous avons seulement besoin de ce type de données dans le cadre de notre problématique de calcul de l'accessibilité) nous permet ensuite d'implanter correctement nos tables relationnelles dans un système d'information commercial.

4.1.2.4 Représentation du risque indirect

A l'aide des données existantes, c'est à dire concernant le réseau routier et les avalanches (CLPA), une analyse de l'accessibilité et des pertes d'accessibilité a été effectuée pour évaluer le risque indirect.

Le modèle simplifié du réseau routier a été implanté sous Arc View pour le tester. En voici quelques résultats réalisés à partir de la vallée de l'Arve en Haute-Savoie.

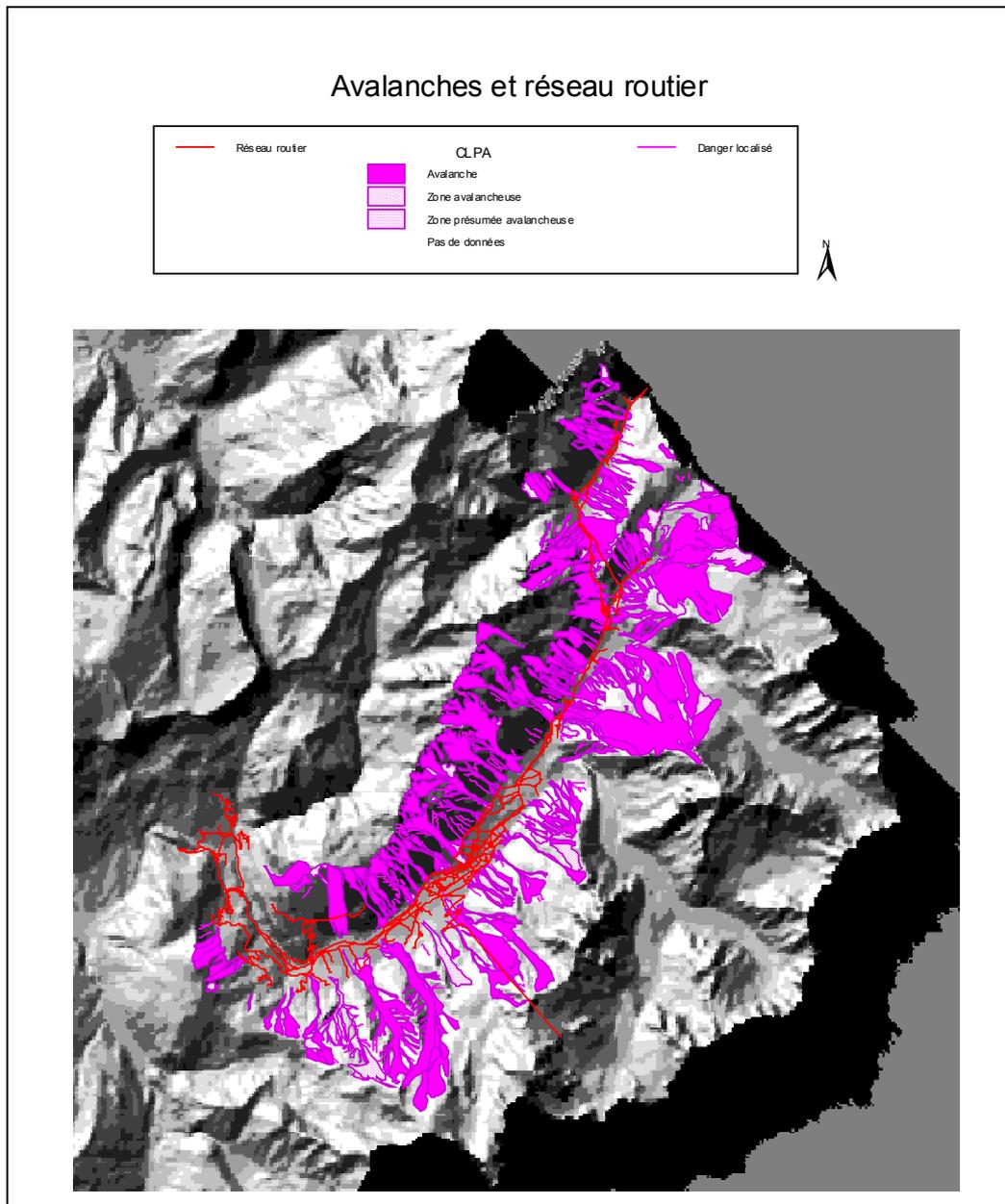


Figure 4.9 : présentation du réseau routier de la vallée de l'Arve et des avalanches connues

La méthodologie employée est simple : l'accessibilité est définie comme le chemin le plus court (en distance) ou le plus rapide (en temps) dans un réseau donné, la perte d'accessibilité est mesurée lors d'une rupture sur une partie du réseau par une redéfinition (comparaison) de l'accessibilité.

Pour rendre compte, à partir d'une représentation du réseau, de la perte d'accessibilité, un outil SIG de type vectoriel reste le plus aisé à utiliser. Cela permet d'utiliser un algorithme largement implanté dans les SIG commerciaux, celui du plus court chemin.

Le calcul d'accessibilité, en partant de la ville de Chamonix est illustré par la figure suivante :

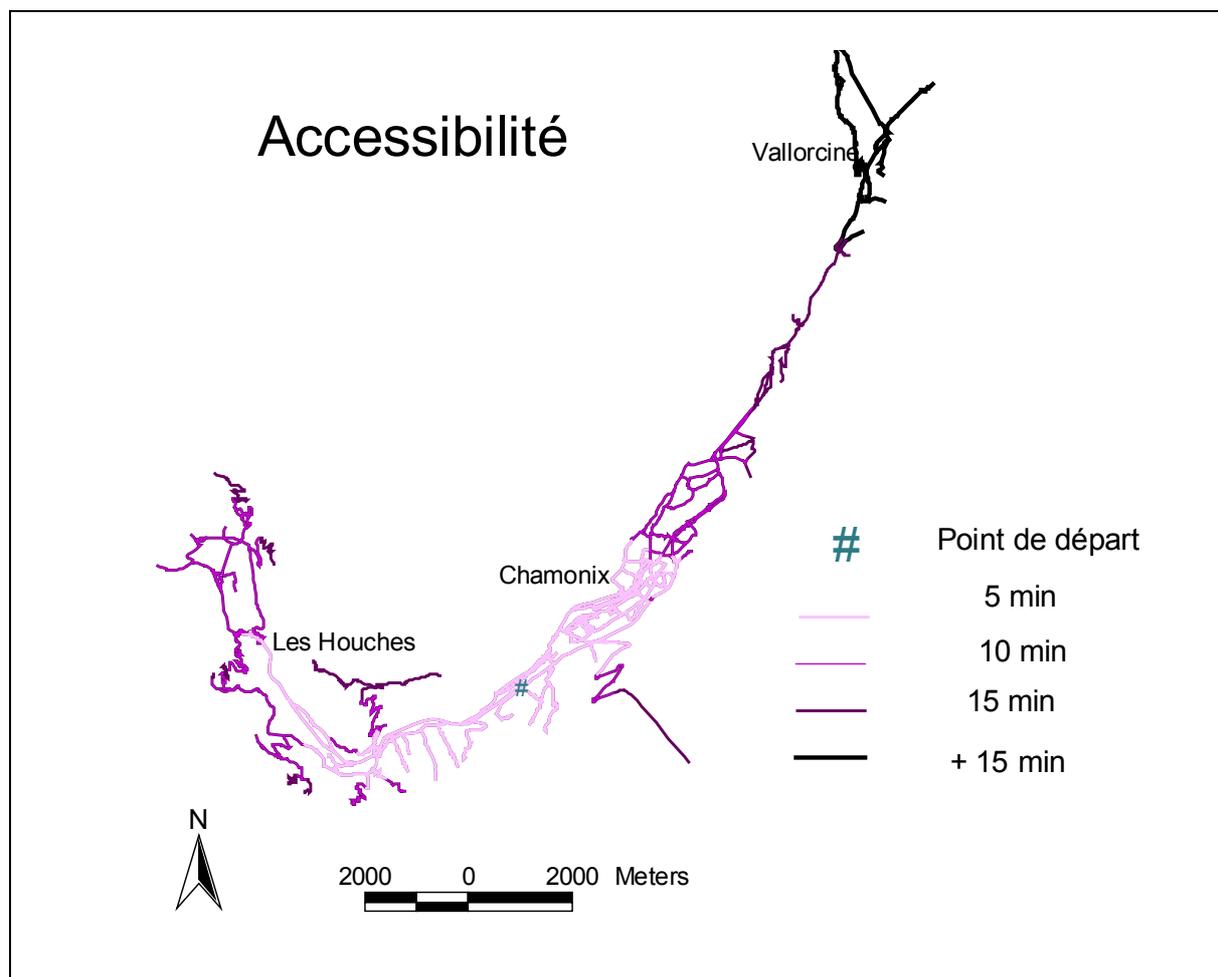


Figure 4.10 : Accessibilité à partir de Chamonix

Ainsi, on obtient les bases d'une représentation de la vulnérabilité indirecte définie comme une perte d'accessibilité due à un événement naturel, mesurée en unité de temps, par exemple une avalanche.

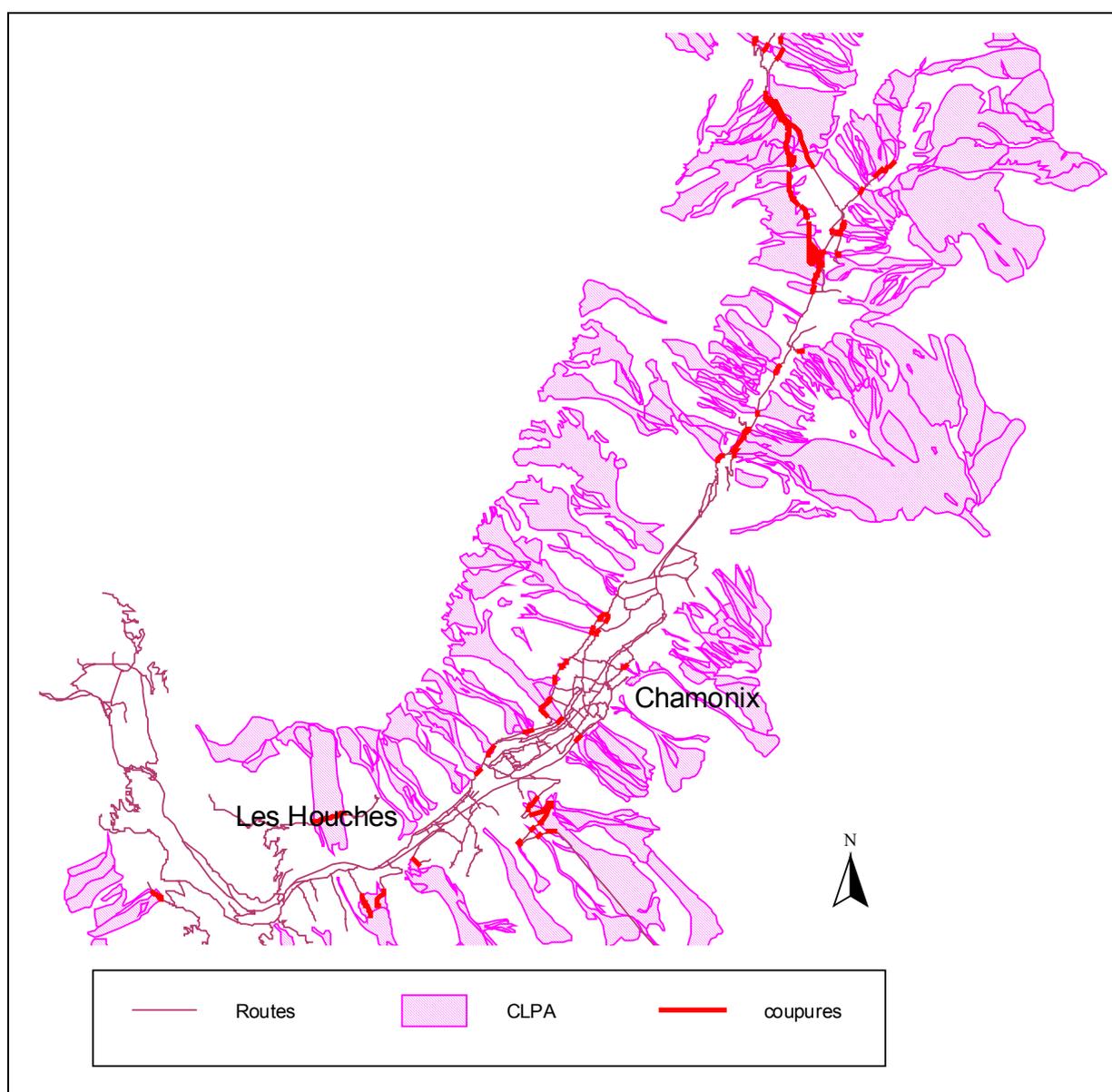


Figure 4.11 : Routes potentiellement coupées

Cette combinaison de paramètres spatiaux nous permet de déterminer une vulnérabilité indirecte par une perte d'accessibilité :

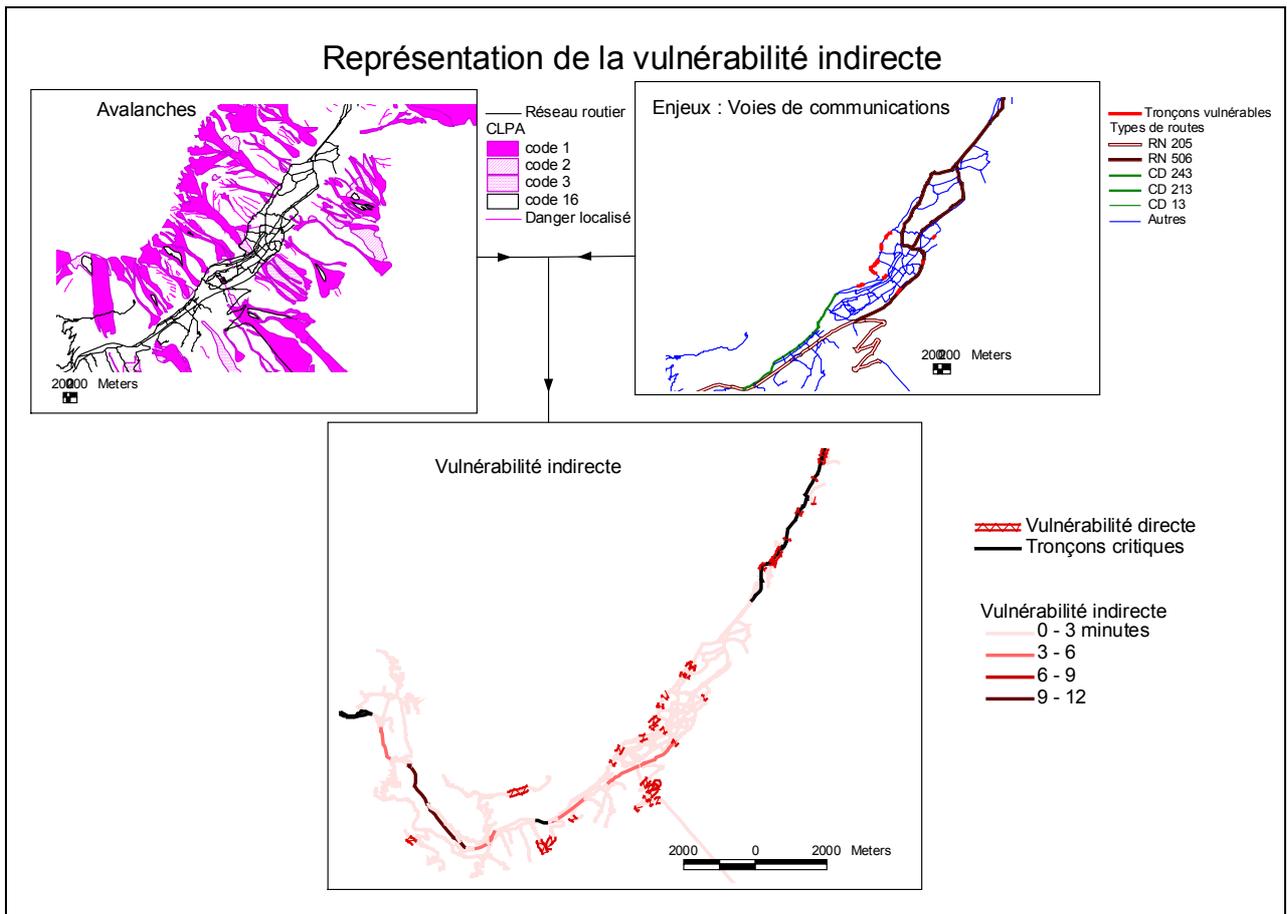


Figure 4.12 : Vulnérabilité indirecte comme une perte d'accessibilité

Cette première approche qualitative de la vulnérabilité indirecte est satisfaisante puisqu'elle répond à la question de savoir quels seront les tronçons de routes dont la fermeture entraînera les conséquences les plus graves.

Même partiel, ce calcul de la vulnérabilité indirecte développé en parallèle à une analyse du risque direct, permet d'améliorer notre approche des risques naturels. On peut l'améliorer ainsi en prenant en compte les flux de circulation ou les destinations.

De plus, cette notion d'accessibilité est indispensable pour la gestion de crise lors des phénomènes de grandes ampleurs comme les séismes. Lors de ces phénomènes, les établissements de gestion de crise doivent rester opérationnels et accessibles. Ce type d'approche peut contribuer à une meilleure localisation de ces établissements.

4.2 Analyse spatiale pour les risques : outils méthodologiques

La notion de vulnérabilité, comme on l'a vu dans la première partie, est vaste. D'un point de vue physique, l'approche que nous avons privilégiée est celle de l'endommagement des structures, même si cela peut paraître limitatif par rapport à la vulnérabilité globale.

L'endommagement est l'étude la plus fine que nous pouvons réaliser, puisque chaque élément de l'espace est étudié. En même temps, cette étude est très difficile à réaliser puisqu'elle demande de connaître précisément la structure de l'ensemble des bâtiments, ce qui est long et très onéreux (donc rarement réalisable). Nous avons donc travaillé sur un niveau moins fin, pour raisonner sur des ensembles homogènes en déficit de protection.

La modélisation théorique des risques naturels doit être adaptée pour fournir des méthodes d'évaluation pertinentes et réalisables. De la sorte, un modèle pratique est abordé.

Ensuite, nous développons une approche avec deux niveaux selon une définition pragmatique : un niveau concernant l'endommagement des bâtiments, l'autre des zones homogènes d'utilisation de l'espace.

4.2.1 *Modèle pragmatique des risques naturels*

Nous l'avons vu, nos apports théoriques concernant la vulnérabilité spatiale se révèlent difficile à étudier en respectant toutes les contraintes théoriques et informatiques. Ainsi, un modèle pragmatique est utilisé pour les développements, prenant en compte les limites de définitions des aléas ainsi que de la vulnérabilité.

Cette vision du réel s'adapte aux différentes méthodes déjà abordées (liées à la définition de la vulnérabilité et des risques, aux contraintes informationnelles et à la mise en place de SIRS), et permet donc une méthodologie complète d'évaluation des risques naturels par l'intermédiaire d'un déficit de protection comme nous le montrons par la suite.

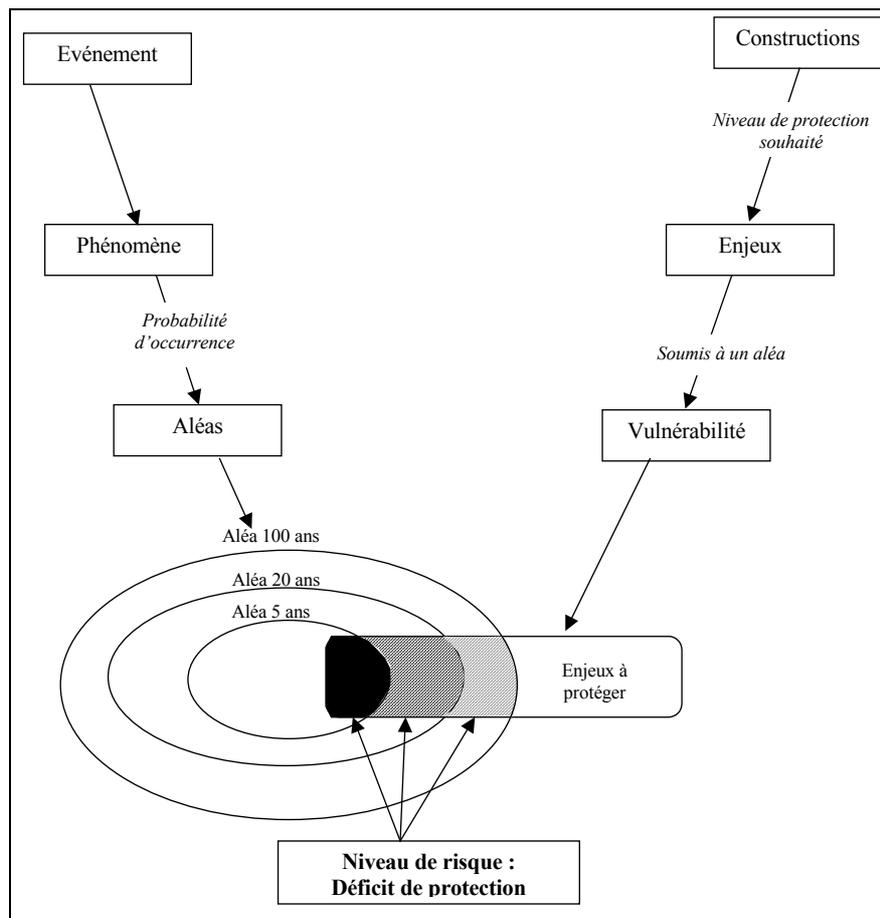


Figure 4.13 : modèle pragmatique des risques naturels

Il manque une définition à partir de ce modèle. Il s'agit des enjeux à protéger. Pour cela, il nous faut déterminer des catégories homogènes de constructions.

Pour déterminer quels types de bâtiments mettre dans chaque classe, il existe en France une réglementation parasismique qui définit des catégories de constructions (article 2 de l'arrêté du 29 mai 1997). L'arrêté définit quatre classes. Pour les bâtiments constitués de diverses parties relevant de classes différentes, c'est le classement le plus contraignant qui s'applique à leur ensemble. Les bâtiments sont classés comme suit :

- **classe A** : les bâtiments dans lesquels est exclue toute activité humaine nécessitant un séjour de longue durée ;
- **classe B** : les bâtiments d'habitation individuelle, les bâtiments dont la hauteur est inférieure à 28 mètres comme les bâtiments d'habitation collective, ceux à usage de bureaux, non classés comme des ERP, les bâtiments destinés à l'exercice d'une activité industrielle pouvant accueillir simultanément un nombre de personnes au plus égal à 300 et les bâtiments abritant les parcs de stationnement ouvert au public ;

- **classe C** : les établissements recevant du public (ERP), les bâtiments dont la hauteur dépasse 28 mètres (à usage de bureaux ou d'habitation collective), les autres bâtiments pouvant accueillir simultanément plus de 300 personnes, les établissements sanitaires et sociaux, et enfin les centres de production collective d'énergie, quelle que soit leur capacité d'accueil ;
- **classe D** : les bâtiments dont la protection est primordiale pour les besoins de la sécurité civile et de la défense nationale ainsi que le maintien de l'ordre public, notamment ceux abritant les moyens de secours (pompiers, ...), les bâtiments contribuant au maintien des communications (centres principaux des réseaux de télécommunications, les centres de diffusion et de réception de l'information, et les tours hertziennes stratégiques), les bâtiments et leurs dépendances fonctionnelles assurant la circulation aérienne, les établissements de santé assurant les soins de courte durée, les lieux de stockage d'eau potable, les centres de distribution publique de l'énergie, et enfin, les centres météorologiques.

Une telle classification peut être reprise pour les risques gravitaires. Cela nécessite quelques adaptations, notamment par rapport aux hauteurs des bâtiments (important pour les séismes, mais bien moins pour les aléas nous concernant) ou pour la classe D demandant une protection absolue. Cela nous concerne moins puisqu'il s'agit de phénomènes de moindre ampleur.

A partir de ce modèle, deux approches ont été approfondies, une pour l'endommagement des bâtiments, l'autre pour les zones homogènes.

4.2.2 Endommagement des bâtiments

Le principe général est simple : globalement, un bâtiment doit répondre à des exigences de sécurité (Baldoche, 1994) soit en termes de fonctionnalité pour répondre aux objectifs de sa conception, soit simplement pour ne pas mettre en danger les biens et les personnes qu'il abrite. Ceci signifie que, par rapport à un aléa donné (dans ce cas, les avalanches), on détermine quel est le niveau de sécurité que doit assurer un bâtiment.

Donc, à partir d'une représentation de la construction et de la sollicitation avalancheuse supposée réellement appliquée, il s'agit de calculer pour chacun des modes de rupture retenus, les caractéristiques de résistance «théorique» qu'il faudrait pour résister à la sollicitation. Ensuite, une idée de l'état du bâtiment résultant de l'action de l'avalanche est obtenue par comparaison avec ses caractéristiques pratiques réelles (sous-entendu celles de son matériau et de son utilisation).

A ce niveau, il faut souligner que le problème n'est plus de considérer un événement réel mais de **choisir un aléa de référence**. Ceci permet de s'affranchir du facteur temporel, car l'aléa de référence n'est pas obligatoirement un événement qui s'est produit, mais une «enveloppe» construite à partir des événements connus, éventuellement avec l'aide de modèles destinés à produire de la cohérence physique.

Pour réaliser les calculs d'endommagement des structures, on procède par palier, c'est à dire selon quatre classes d'endommagement : déformations sans dommages, dommages réparables, dommages non réparables et enfin, destruction.

Pour arriver à mettre au point le modèle d'endommagement, un certain nombre d'hypothèses ont été posées. En effet, chaque bâtiment est plus ou moins unique par sa morphologie et son mode de construction ; or nous devons simplifier les bâtiments pour les comparer et appliquer le modèle à des bâtiments classés selon différents types. De plus, les types de destructions sont très variés, comme nous pouvons le voir grâce aux photographies suivantes :



Figure 4.14 : Bâtiment partiellement détruit - St-Colomban des Villards, 1981 – Cemagref - F. Valla



Figure 4.15 : Partie supérieure d'un chalet déplacée – Montroc, 1999 – Cemagref - F.Rapin

Cette simplification repose sur une notion originale appelée le **motif du bâtiment** (Berthet-Rambaud, 1999). Pratiquement, un motif correspond à une fraction de la façade exposée à l'avalanche arrivant dans une direction considérée comme relativement proche de la normale, ce qui permet de négliger au maximum les efforts tangentiels qui nécessiteraient la connaissance du coefficient de frottement. Il s'agit d'un mur porteur, extérieur, plein, soumis à l'avalanche et appuyé sur le reste de la structure : murs porteurs parallèles à l'écoulement, fondations ou dalles (les cloisons ne sont a priori pas considérées comme des appuis suffisants). La façade exposée à l'avalanche est donc constituée d'une juxtaposition de motifs qui sont autant de cellules de base limitées par les dalles des différents étages et à chaque niveau, par les murs porteurs parallèles à l'écoulement.

Le but est d'obtenir un niveau d'endommagement. Dans ce cadre et même si cela peut être réalisé pour affiner la simulation du passage de l'avalanche et des endommagements engendrés, il n'est plus utile d'examiner tout le bâtiment ni tous les motifs de l'étage le plus sollicité : il suffit de considérer le motif le plus faible c'est-à-dire celui qui, par ses caractéristiques, est le plus fragile vis-à-vis de la sollicitation avalancheuse.

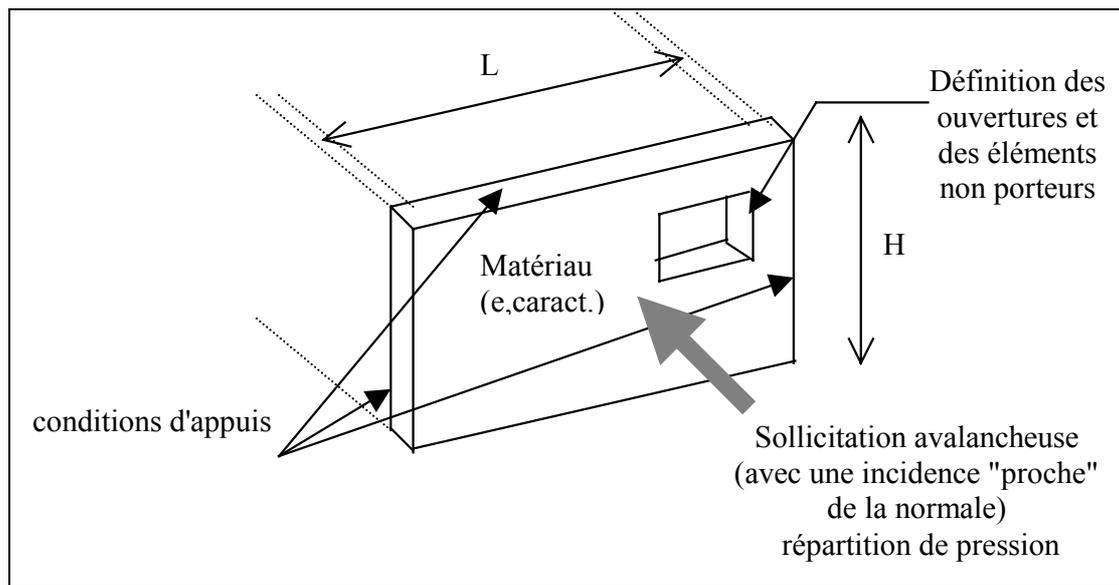


Figure 4.16 : Représentation symbolique du motif

Les bâtiments seront donc analysés au travers des motifs principaux, c'est-à-dire ceux de la façade exposée au phénomène. Les équations de la résistance des matériaux sont ainsi résolues à partir de cette notion de motif (une façade peut comprendre plusieurs motifs).

La notion de motif et en particulier de motif principal est le meilleur compromis entre le besoin de calcul et celui de représentation de la construction. Bien sûr, elle peut paraître insuffisante, mais elle répond parfaitement à la question de l'évaluation de l'endommagement. De plus, il s'agit d'un critère relativement simple qui, surtout, peut s'appliquer et s'adapter à tous les types de construction (selon les hypothèses posées). Il s'agit donc d'une base intéressante de travail pour définir chacune d'elles et également mettre en évidence des catégories ou des classes de bâtiments. Deux types d'endommagement principaux ont été étudiés, l'éventration et le cisaillement :

- l'éventration : cas d'un mur (le motif) plus ou moins perpendiculaire à la direction d'écoulement, en appui sur ses fondations et sur les murs parallèles à l'avalanche (avec éventuellement la dalle supérieure qui peut jouer le rôle d'appui en tête) et qui est éventré sous la sollicitation de l'avalanche (c'est-à-dire qu'il «explose» sous l'impact de l'avalanche alors que ses appuis restent en place) ;
- le cisaillement : les murs porteurs sont cisailés sous l'effort tranchant généré par l'avalanche (en général au niveau d'une dalle ou des fondations) et c'est toute la partie supérieure (et inférieure s'il s'agit de la fondation) qui se déplace.

L'algorithme proposé vise à apporter une réponse numérique au problème de la détermination des caractéristiques théoriques de la structure principale d'un motif donné. Ces caractéristiques correspondent à la résistance à l'éventration et au cisaillement sous un profil de sollicitation a priori quelconque.

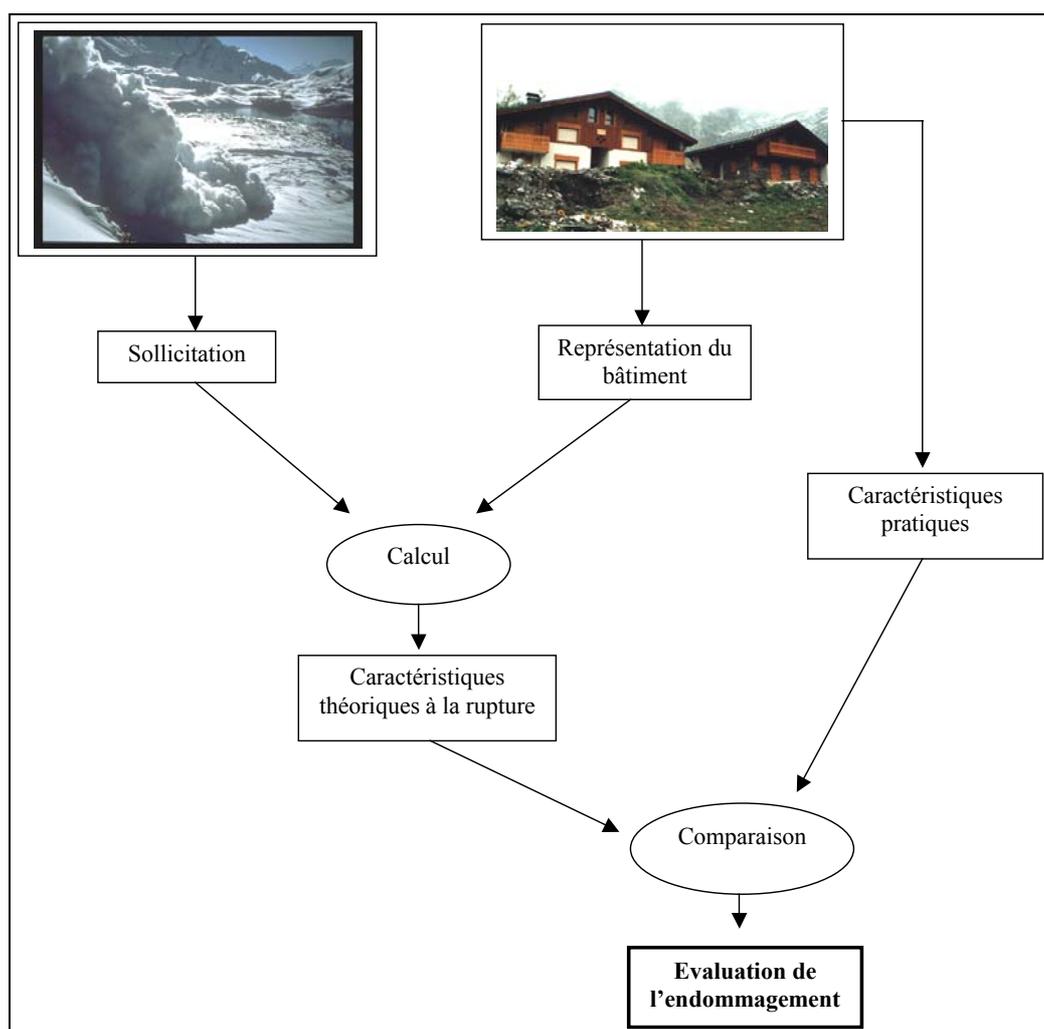


Figure 4.17 : méthodologie générale d'évaluation de l'endommagement

La mise en œuvre numérique a été réalisée et implantée en C++ avec une interface graphique simple d'utilisation :

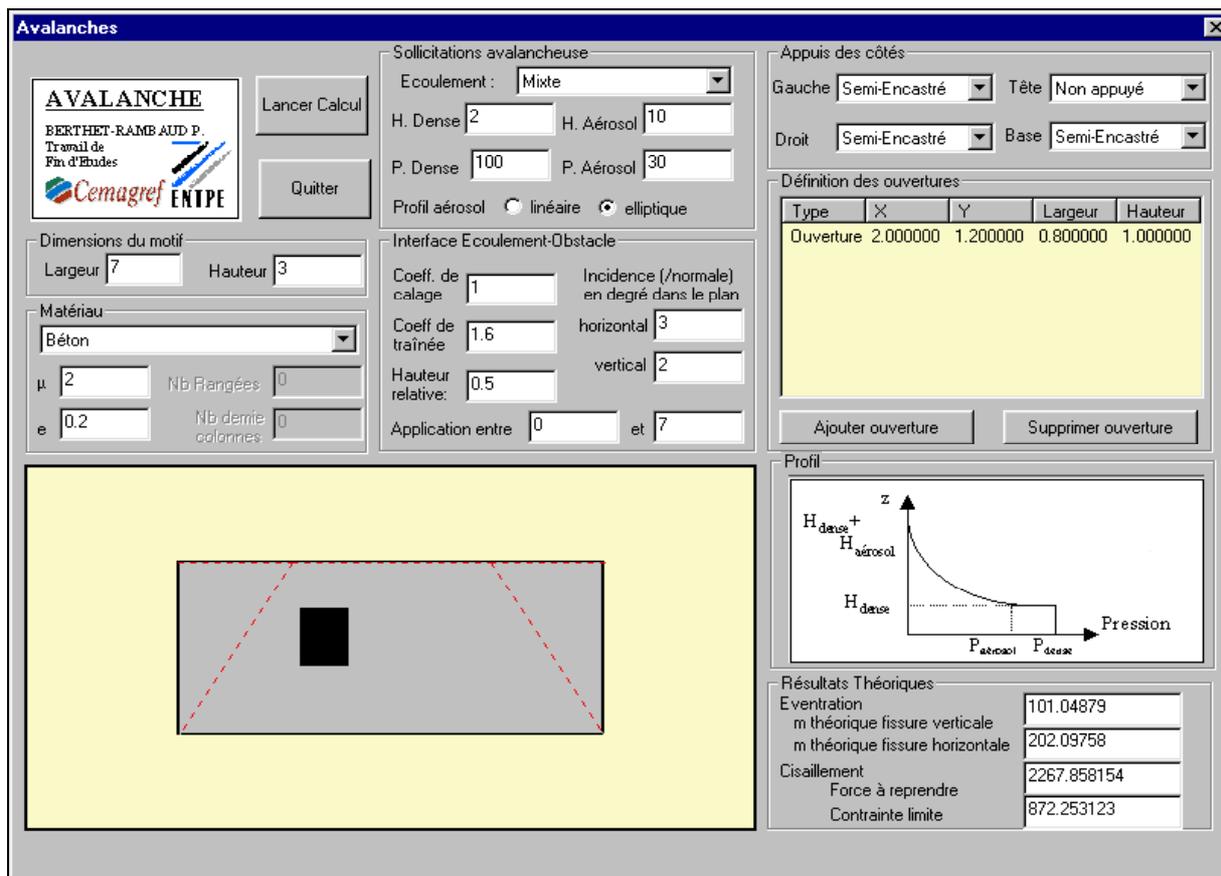


Figure 4.18 : Interface graphique de calcul de l'endommagement

Ce travail reste complexe du fait de la résolution numérique imposée par les phénomènes pris en compte. Pour plus de précisions, se reporter à (Berthet-Rambaud, 1999).

Les outils développés offrent un compromis tout à fait satisfaisant entre précision et rapidité, et permettent à l'utilisateur de se concentrer sur le bâtiment étudié sans se soucier de l'algorithme mis en œuvre pour les calculs. Par ailleurs, avec l'ajout d'une interface graphique, l'utilisation en devient relativement aisée et surtout plus conviviale et agréable.

Dans notre situation, cette partie calcul paraît ainsi être une base de départ tout à fait intéressante puisque les calculs développés permettent de traiter l'essentiel du raisonnement de manière relativement simple et rapide d'où une utilisation pratique possible.

Ensuite, l'outil obtenu est relativement évolutif et général. Par exemple, tout type de profil de pression peut être utilisé et on a un choix de profils prédéfinis dicté par un souci de commodité d'utilisation. A ce titre, des perspectives d'application à d'autres phénomènes naturels comme les laves torrentielles peuvent être entrevues. Bien sûr et notamment dans le cas de l'interface graphique, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices a été effectué. Cependant, il s'agit surtout d'une première version dont le but était de traiter l'essentiel, à savoir l'obtention de valeurs théoriques. Par ailleurs, des aspects supplémentaires pourraient être facilement ajoutés,

comme la possibilité de mener directement les calculs sur les éventuelles portes ou fenêtres sans se limiter à la partie principale du motif ou celle de permettre la comparaison automatique avec les caractéristiques pratiques pour obtenir directement une évaluation de l'endommagement.

La méthode proposée ne se contente pas de traiter techniquement le calcul : dans la mesure du possible, un soin tout particulier a été apporté à l'assistance au raisonnement, depuis la description du contexte et des domaines (avalanche et bâtiment) concernés jusqu'à l'évaluation de la portée de ces travaux et de leurs perspectives. Il en résulte une méthode relativement complète au moins sur le plan théorique.

4.2.3 Risque par zone d'occupation humaine

La mise en œuvre repose sur l'implantation des codes de simulation développés pour les avalanches par (Naaïm, 1999) sous un SIG commercial, pour ensuite les faire fonctionner selon les secteurs qui nous intéressent.

Nous illustrons le travail sur quatre couloirs d'avalanche. Il s'agit d'une méthode encore expérimentale de mesure des risques naturels fondée sur la modélisation, ce qui est relativement nouveau, surtout appliqué à une zone de montagne.

Nous utilisons la CLPA pour définir les zones avalancheuses. Les secteurs proches de zones habitées sont sélectionnés pour y faire fonctionner les modèles de simulation. Dans un premier temps, il s'agit d'un modèle simple, reprenant la modélisation de Voellmy. Ce choix de modèle dépend de deux paramètres : d'une part la rapidité de calcul, et d'autre part les caractéristiques du relief. Dans la plupart des cas, un modèle relativement simple est largement suffisant, ce qui a été privilégié ici, mais il existe d'autres modèles, plus complexes. Les reliefs peu accidentés permettent l'utilisation de ce modèle, qui fonctionne bien et ainsi la rapidité est privilégiée pour fournir des résultats aux experts, ou aux techniciens.

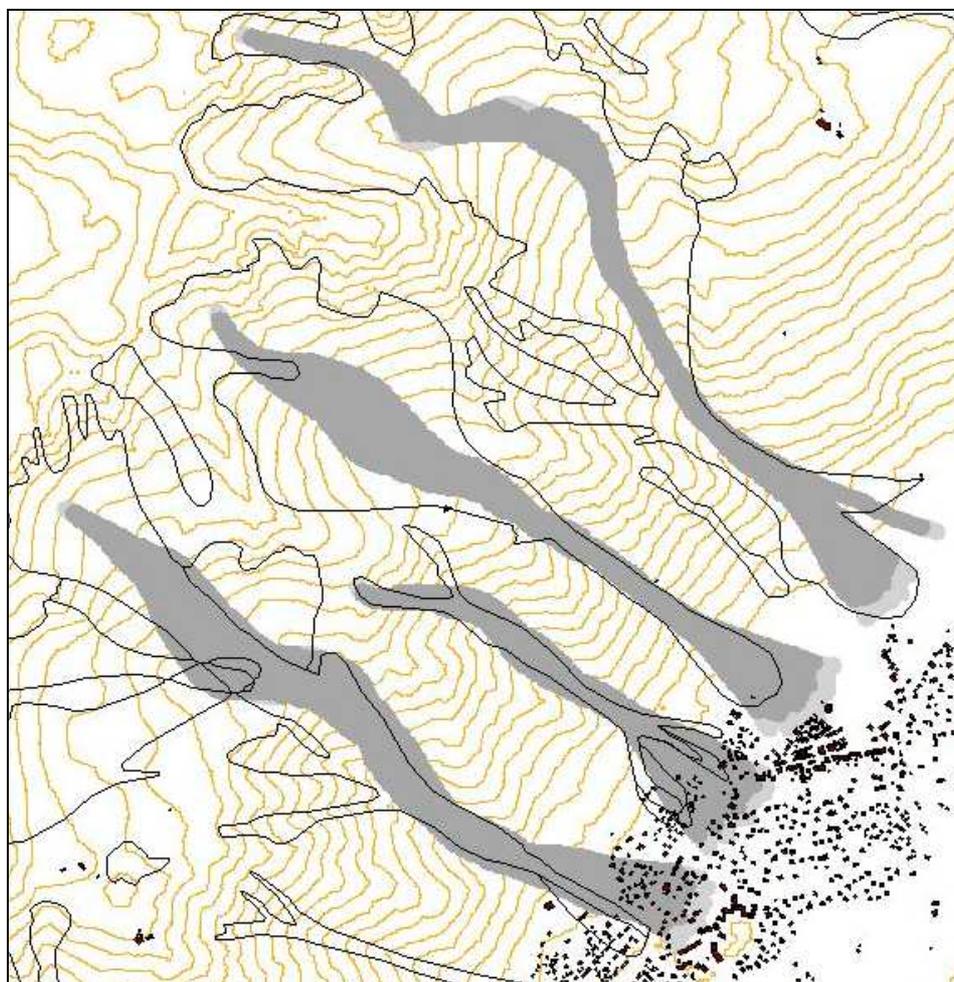
Un modèle de propagation est utilisé pour déterminer l'extension de l'avalanche. Ses données d'entrée sont : les caractéristiques de la neige dans la zone de départ (hauteur de déclenchement, densité etc..), la géométrie de la zone de départ et d'écoulement obtenue grâce à un modèle numérique du terrain. Mais plusieurs types de modèles mécaniques peuvent être utilisés en fonction de la complexité du couloir.

Dans les couloirs simples, un modèle centre de masse (Naaïm, 1998) est suffisant (comme dans le cas suivant). Par contre, pour les couloirs à géométrie complexe, a été développé un modèle d'écoulement qui traite l'avalanche depuis son déclenchement jusqu'à son arrêt. L'avalanche est assimilée à un matériau granulaire. Dans notre cas, ce type de modèle n'a pas été utilisé du fait de la difficulté de sa mise en place sur des ordinateurs de bureau.

En plus du modèle numérique de terrain, ce modèle nécessite un paramètre descriptif de la rhéologie. Dans l'hypothèse d'un matériau granulaire, la détermination de l'angle de frottement pour la neige sèche est nécessaire. On a retenu l'hypothèse que les avalanches majeures

mobilisent essentiellement de la neige sèche pour laquelle il a été possible de procéder grâce à un banc expérimental, à la détermination directe de l'angle de frottement (Naaïm, 1998).

Ce premier modèle permet de se rendre compte de l'extension du phénomène et de distinguer les zones potentiellement dangereuses, comme cela est illustré par la figure suivante :



**Figure 4.19 : Analyse grossière de plusieurs couloirs -
Les enveloppes en noir représentent la CLPA ;
le grisé, les résultats du modèle ; les polygones
noirs, les bâtiments et en fond les courbes de
niveaux**

Le couloir le plus au Nord ne sera pas étudié puisqu'il ne concerne aucune zone construite, donc ne représente pas un risque. La trajectoire modélisée pour le couloir le plus au sud est différente de celle de la CLPA. Cela vient de la qualité des représentations topographiques utilisées, sujet qui ne concerne pas cette partie de notre travail, donc nous ne l'étudierons pas. Par ailleurs, ce couloir représente un risque important, mais connu grâce aux avalanches historiques, donc une modélisation n'apporterait pas forcément d'éléments nouveaux. Par contre, les deux autres couloirs se révèlent «intéressants», car dangereux pour les bâtiments, ainsi que le montre l'agrandissement ci-après :

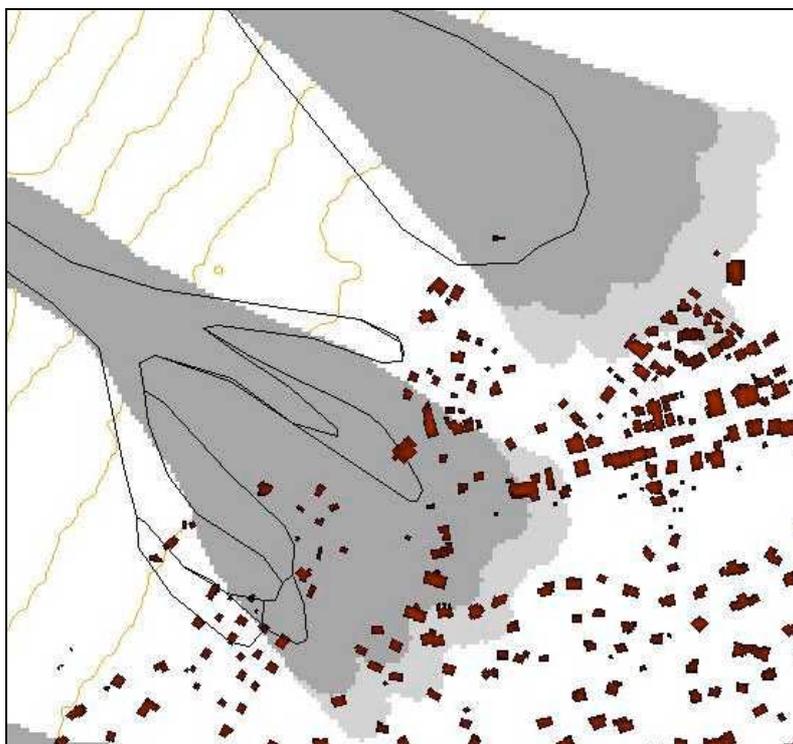


Figure 4.20 : Zoom de la zone d'arrêt de deux avalanches

Il s'avère que la modélisation fournit un résultat qui diffère des événements connus. Le phénomène modélisé dépasse largement la limite basse connue. Ainsi, il s'agit d'une zone soumise à risque que l'on ne peut négliger vu le nombre de bâtiments concernés.

Le modèle donne comme résultat des zones de pression. Comme nous l'avons vu au travers de l'endommagement (partie précédente), cela nous permet de définir des zones de risque tenant compte de la vulnérabilité.

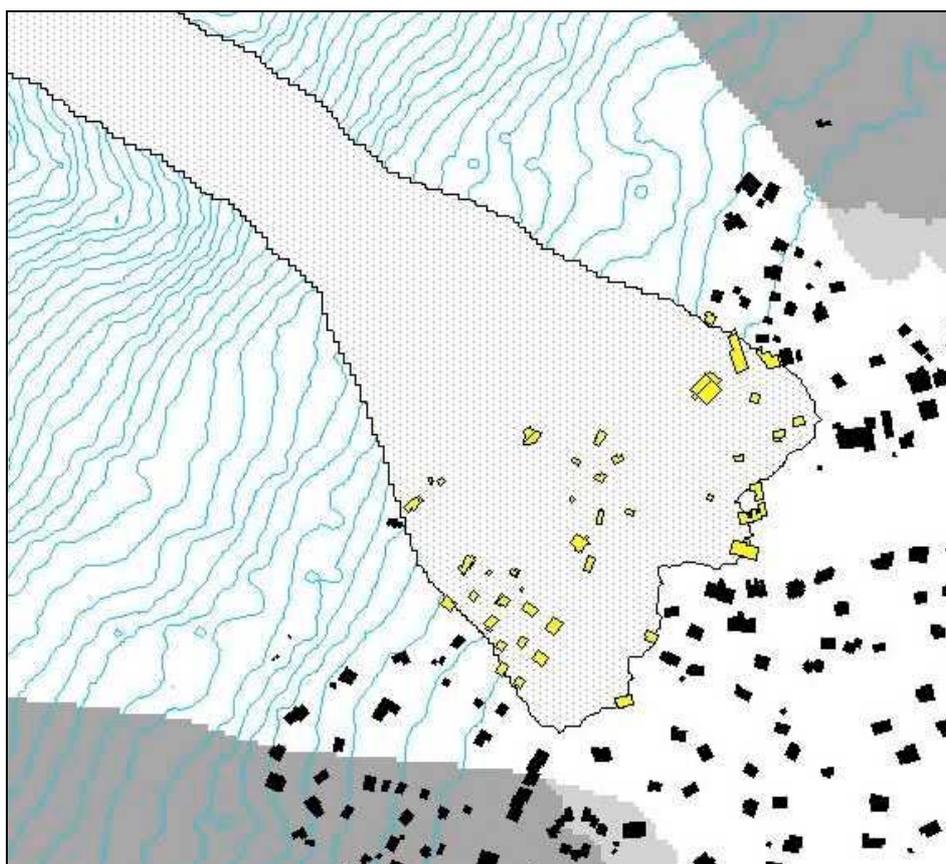


Figure 4.21 : Zone soumise à une pression dans l'intervalle 15-30k N.m⁻² ou plus (bâtiments en jaune)

La figure précédente nous donne les bâtiments touchés par une pression de l'ordre de 15 à 30 kN.m⁻², c'est à dire la zone de « déformation », sachant que cela dépend précisément de chaque motif.

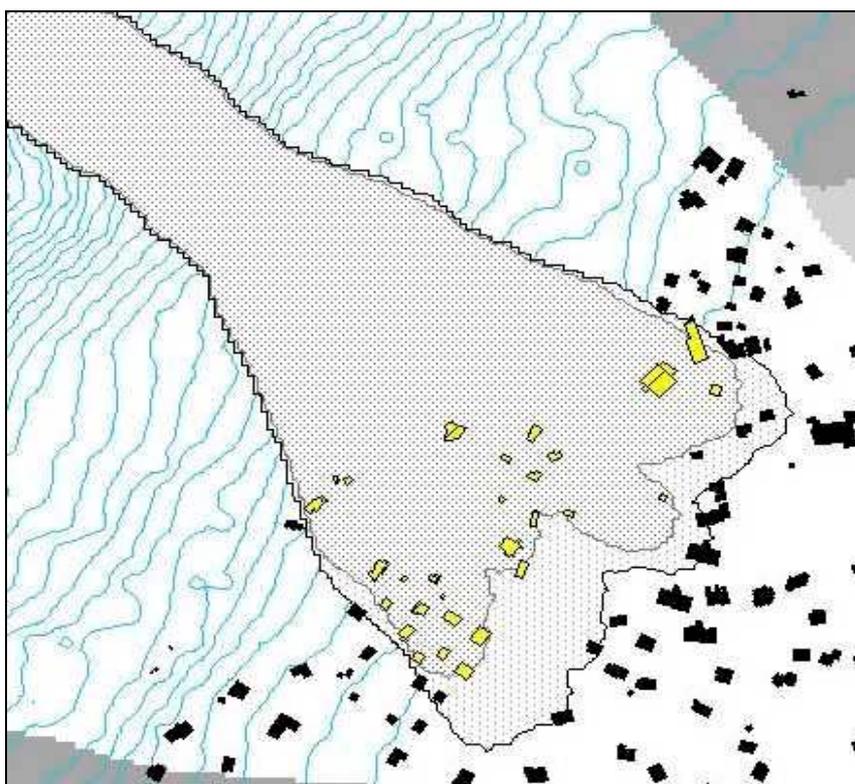


Figure 4.22 : Zone soumise à plus de 30 kN.m²
(bâtiments en jaunes)

La zone soumise à 30 kN.m² représente la zone de destruction certaines des bâtiments (figure précédente).

Cette distinction en classes de pression relève d'une information sur l'aléa, mais puisque l'effet du phénomène va dépendre de la qualité de chaque construction, il faudrait donc raisonner construction par construction. Ces classes de pression, associées à des indications de fréquence sont théoriquement la base du zonage des avalanches. Elles doivent être menées parallèlement à une étude de la vulnérabilité de l'existant.

Pour cela, la vulnérabilité est vue au travers d'un objectif de protection (BUWAL, 1999b). Il s'agit alors de contrôler les objectifs de protection définis pour différentes catégories d'objets (c'est-à-dire des catégories requérant une protection semblable) pour déterminer les déficits de protection et identifier les secteurs de conflits.

Le résultat permet d'attribuer des priorités d'intervention aux zones de danger et de les prendre en compte dans l'aménagement du territoire et dans la planification de mise en place de mesures de protection ainsi que les mesures d'urgence (notamment par les plans d'urgence).

La mise en place reste simple puisqu'il s'agit surtout d'avoir des résultats qualitatifs sur le déficit de protection.

La vulnérabilité se définit alors par quatre objectifs de protection (eux mêmes divisés en trois sous-types) :

- niveau 3 : absolu (protection totale)
- niveau 2 : moyen ;
- niveau 1 : faible ;
- niveau 0 : aucune protection demandée.

Les sous-types sont 1.1 ; 1.2 ; 1.3 ; 2.1 ; 2.2 ; etc. Ainsi, les objectifs de protections peuvent être précisés en fonction des enjeux à prendre en compte.

Les aléas sont définis de même (en sollicitation) :

- nul ; I_0 , c'est à dire aucun aléa ;
- très faible ; I_1 inférieure à 5 kN/m² ;
- faible ; I_2 comprise entre 5 et 15 kN/m² ;
- moyen ; I_3 comprise entre 15 et 30 kN/m² ;
- fort ; I_4 supérieure à 30 kN/m².

Cela est mesuré pour chaque fréquence f (puisqu'il s'agit d'avoir un aléa de référence) :

- $f_1 = 1$ ans ;
- $f_2 = 5$ ans ;
- $f_3 = 20$ ans ;
- $f_4 = 100$ ans.

Nous obtenons le tableau suivant, donnant le niveau de protection accepté en niveau d'aléa selon le type d'objet et les fréquences :

Type d'objet	Objectif de protection			
	$f_1 = 1 \text{ an}$	$f_2 = 5 \text{ an}$	$f_3 = 20 \text{ an}$	$f_4 = 100 \text{ an}$
1	$I_4 = 4$	4	4	4
2.1	$I_3 = 3$	4	4	4
2.2	$I_2 = 2$	3	4	4
2.3	$I_2 = 2$	1	3	3
3.1	$I_1 = 1$	1	2	2
3.2	$I_0 = 0$	0	1	1
3.3	0	0	0	0

Figure 4.23 : objectifs de protection selon la fréquence des phénomènes

Dans cet exemple, les objets sont répartis en 7 classes, de la vulnérabilité la plus faible (1 = terres agricoles) à 3.3 (ERP particulièrement sensibles ex. hôpital, école etc.) (BUWAL, 1999b). La donnée résultant du tableau est le niveau d'aléa supporté par l'objet selon son type et la fréquence de l'aléa. Ainsi, un objet de type 1 supporte tout niveau d'aléa (donc un aléa de type I_4) alors qu'un objet de type 3.3 n'en supporte aucun, du moins dans la gamme des fréquences retenues. Entre les deux, un objet de type 2.2 supporte un aléa de niveau 2 (I_2) à un rythme annuel, ou encore de niveau 3 avec une période de retour de 5 ans.

Le calcul du risque par déficit de protection se réalise ainsi :

- On divise la zone en objets élémentaires, en utilisant les outils d'analyse spatiale.
- On groupe les objets élémentaires en classes d'objet, **les objets de chaque classe étant supposés requérir un niveau de protection identique.**
- **Pour les classes d'objets, on compare, pour une fréquence donnée, l'objectif de protection et le niveau d'aléa ;**
- **Si le niveau d'aléa est supérieur à l'objectif de protection, il existe un déficit de protection**, fonction du niveau d'aléa, de l'objectif de protection et de la fréquence ;
- **On réalise la somme des déficits de protection des objets élémentaires d'une zone donnée.** On peut aussi réaliser une analyse multirisque en sommant les déficits de protection des objets élémentaires vis à vis de divers phénomènes naturels (avalanches, mais aussi chutes de blocs, crues etc.).

Cet outil, assez grossier, est la première étape d'une étude économique plus sophistiquée. Il permet d'établir une première comparaison qualitative entre diverses zones exposées à des risques naturels. Cela nous permet d'obtenir des cartes de risques au travers du déficit de protection comme cela est illustré par la figure suivante :

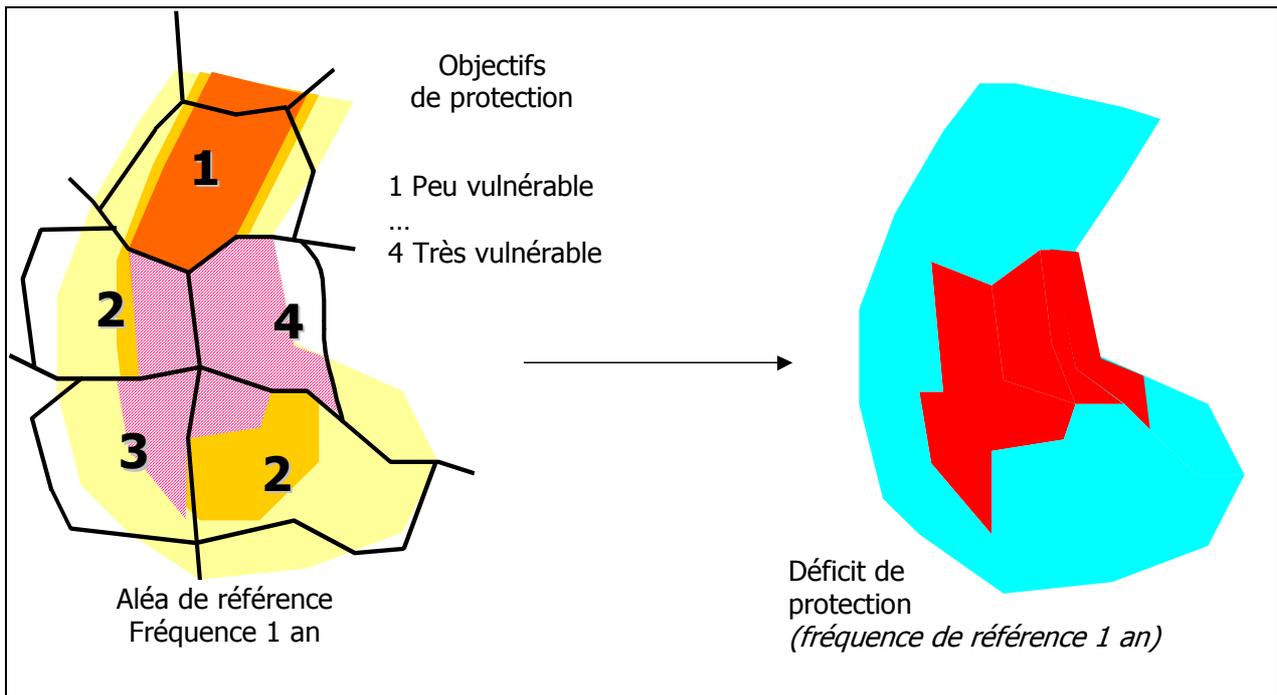


Figure 4.24 : représentation synthétique du déficit de protection

Par ailleurs, l'analyse peut être améliorée en faisant appel à d'autres modèles de simulation d'écoulement, plus complexes que celui mentionné ci-dessus. Ainsi, on peut étudier chaque couloir d'avalanches, en utilisant des données plus précises et des modèles de simulation d'écoulement plus complexes (les temps d'exécution vont croître de façon significative).

Après ce travail, il nous faut analyser individuellement le comportement des bâtiments situés dans la zone d'avalanche en étudiant leur stabilité, définie en quatre classes : déformations sans dommage, déformations réparables, déformations non réparables, et enfin, destruction. Nous obtenons une échelle de risques des différentes zones tenant vraiment compte de la vulnérabilité.

Conclusion générale

La lutte contre les risques naturels est souvent intitulée mitigation, terme générique anglais (sans équivalent en français) défini comme : « sustained action taken to reduce or eliminate the long-term risk to people and property from hazards and their effects » (FEMA, 1996). Nous avons, au long de ce travail, orienté les différents axes de recherches vers cette définition. En cela, l'approche fondée sur l'analyse spatiale permet de répondre à différentes questions, celle d'une meilleure connaissance de la vulnérabilité, ou celle de la mise en place d'outils de gestion comme les SIRS (au sens plus large que celui de la simple cartographie). Il ne s'agit pas d'une réponse générale, il s'agit d'une partie de la solution pour obtenir une gestion raisonnée des risques naturels en montagne. Ces développements s'intègrent dans une analyse la plus fine possible des risques, en répondant aux questions des recherches (pour une meilleure définition de la vulnérabilité, donc un modèle de compréhension du concept de risque naturel) et aux besoins de l'expertise (pour une mise en place d'outils de gestion). Cela donne aussi une justification au chemin tortueux suivi le long de cette thèse. La question de départ était d'améliorer la prise en compte de la vulnérabilité grâce à une approche géographique, au travers de l'analyse spatiale. Nous avons répondu à cette question tout en la redéfinissant.

La recherche vise à augmenter progressivement le stock de savoir. L'expertise, elle, travaille à la hâte sur la base des connaissances disponibles au moment précis où elle doit intervenir. Elle peut, certes, se conclure par des recommandations pour entreprendre telle ou telle recherche (Roqueplo, 1997). Ce travail fait clairement partie du domaine de la recherche, sans se désintéresser de l'expertise, puisqu'il s'agit d'une demande pressante de la société. Le développement des outils opérationnels peut vraiment se mettre en place, en se fondant sur ces contributions aux connaissances du domaine.

Les différents moyens que nous utilisons pour théoriser le monde nous entraînent dans un processus de découverte ininterrompu, dont nous ne pouvons connaître *a priori* le résultat. Tout point de vue sur la relation entre les théories et le monde ne devrait pas être de nature à gêner un développement à venir. Par conséquent, il est essentiel qu'il reste une part de vague (Chalmers, 1987).

De ce bilan et de ses perspectives, il apparaît qu'il reste des points à développer. L'endommagement demande à être approfondi. Cela est indispensable, puisque sur l'existant, il est très difficile de raisonner en dissociant vraiment l'aléa de la vulnérabilité. On est vulnérable à quelque chose, à un phénomène en particulier. Ce problème se retrouve dans la mise en place des PPR. Il y a toujours des bâtiments dans des zones considérées à risque fort, autrement dit, en zone rouge ce qui, du point de vue du législateur, est inacceptable. L'analyse de l'endommagement permet d'améliorer notre connaissance et peut permettre d'améliorer la structure de ces

bâtiments, mais ne résout pas ce problème. Par contre, un « calcul » de déficit de protection permet de donner des priorités d'intervention. La politique actuelle qui préconise des aléas de référence de plus en plus forts, pour essayer d'éviter de nouvelles catastrophes, entraîne forcément la mise en zone rouge de nombreux lieux utilisés par l'homme. Ce sont des zones où l'on ne peut pas réaffecter les vulnérabilités lorsqu'il s'agit des aléas de montagne, donc généralement rapides, comme cela se fait pour les phénomènes de plaine, où l'on peut plus facilement « déplacer » le risque. De plus, les terrains protégés par des ouvrages de protection existants seront toujours considérés comme restant soumis aux phénomènes étudiés, et donc vulnérables, en particulier pour ce qui est des constructions permanentes (MATE, 1999). On ne peut en effet avoir de garantie absolue sur l'efficacité de ces ouvrages. On ne peut préjuger de leur gestion et de leur tenue à terme. Qui plus est, il peut toujours se produire un aléa plus important que l'aléa pris en compte pour dimensionner ces ouvrages. La réglementation préconise d'appliquer les mêmes prescriptions, qu'il y ait des ouvrages ou pas, l'intérêt de ces derniers devant rester la réduction de la vulnérabilité de l'existant. L'analyse spatiale des risques nous apporte une meilleure connaissance des risques encourus, et permet de définir des priorités.

Ce travail nous permet de proposer des méthodes d'analyse spatiale pour mieux appréhender la vulnérabilité tout comme les risques. Ces méthodes restent sujettes à la mise en œuvre des outils techniques liés aux SIRS. Nous l'avons vu, cela reste encore souvent du domaine de la recherche. Techniquement, la majorité des problèmes sont solubles, tout dépend des moyens mis en œuvre, mais ce qui justifie de continuer dans cet axe, ce sont les difficultés de modélisation et de mise en place de SIRS, puisque peu de développements ont été menés à bien à ce jour.

La disponibilité des données est aléatoire, donc nous avons construit une réflexion reposant sur la logique d'un outil à tiroirs, avec une perspective d'une évolution vers plus d'accès aux bases de données spatiales. Cela représente donc une contribution à l'amélioration de la gestion des risques naturels, en montagne ou non.

L'analyse fréquentielle, couplée avec une analyse économique, est un outil très efficace pour effectuer une allocation optimale des moyens financiers à la protection contre les risques naturels. Un tel outil est utilisé de façon opérationnelle en Suisse depuis cette année. Son adaptation en France paraît souhaitable. Elle permettrait d'établir un ordre de priorité dans les opérations de réduction de vulnérabilité (zonage, expropriation, travaux etc.), étant entendu que la définition précise des mesures adoptées nécessiterait une étude plus précise et surtout que le choix final est d'ordre politique. Cet outil reste ouvert, c'est à dire qu'il est facilement adaptable. Il s'agit ici d'établir une méthodologie servant de base à une discussion, principalement pour choisir les objectifs de protection (question qui soulèvera le plus de conflits).

L'intégration de modèles de simulation dans les SIG dépend des données d'entrée et de sortie des deux outils. Les rendre compatibles pour ensuite réaliser leur intégration est une tâche laborieuse, puisque faisant appel à plusieurs disciplines. Les risques naturels se prêtent tout à fait à ce genre d'approche puisque leur étude se doit d'être interdisciplinaire, pour aborder parallèlement les aléas et la vulnérabilité. L'approche par analyse spatiale permet d'aborder les risques globalement, et dans ce cadre, le couplage des modèles avec les systèmes d'information est indispensable, comme nous l'avons montré.

Ce travail est une première approche dans la définition spatiale des risques en montagne. Il s'agit de l'intégration des modèles et de l'analyse spatiale. Cela implique d'intégrer les modèles de simulation au sein des SIRS du type de SIRVA pour réaliser des traitements et donc produire de la connaissance, plutôt que seulement la rassembler. A partir des outils d'analyse spatiale, et en se servant de notre approche par déficit de protection, cette intégration est possible puisqu'elle est relativement simple à mettre en oeuvre et adaptée aux outils de type SIG. Mais pour mieux définir les risques encourus par la société, il reste encore bien des recherches à mener dans ce domaine, notamment pour évaluer les dommages indirectes, et/ou non marchands.

Lexique des abréviations et des acronymes

Un dictionnaire est inutile si on ne connaît pas déjà le sens de nombreux mots (Chalmers, 1987)

ADRGT	Association pour le Développement de Recherche sur les Glissements de Terrain
AGL	Atelier de Génie Logiciel
ARSEN	Aide à la Représentation Spatiale pour l'Environnement
BD	Base de Données
BDG	Base de Données Géographique
BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
CASE Tools	Computer-Assisted Software Engineering (<i>cf</i> AGL)
CATEX	CABle Transporteur d'EXplosif
CATNAT	système français d'indemnisation des CATastrophes NATurelles
CCR	Caisse Centrale de Réassurance
CLPA	Carte de Localisation Probable des Avalanches
COS	Coefficient d'Occupation du Sol
CRG	Centre de Recherche en Géomatique
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DDE	Direction Départementale de l'Équipement
DDRM	Dossier Départemental des Risques Majeurs
DCS	Dossier Communal Synthétique
DICRIM	Dossier d'Information Communal des RISques Majeurs
DPPR	Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (du MATE)
ELSA	Étude des Limites de Sites Avalancheux
ENGREF	École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
ENTPE	École Nationale des Travaux Publics de l'État
EPA	Enquête Permanente sur les Avalanches
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne

ERP	Etablissement Recevant du Public
ETNA	unité de recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanche
FEMA	Federal Emergency Management Agency
GAZEX	EXploseur à GAZ
HTML	Hyper Text Markup Language
IGN	Institut Géographique National
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MADS	Modélisation d'Applications à Données Spatio-temporelles
MATE	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MISE	MIssion Spécialisée d'inspection Environnement
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MurMur	Programme européen MUltiple Representations – MUltiple Resolutions
NGI	Norwegian Geotechnical Institute
OFEFP	Office Fédéral pour l'Environnement, la Forêt et le Paysage
ONF	Office National des Forêts
OWAS	Oracle Web Application Server
PER	Plans d'Expositions aux Risques naturels prévisibles
PIG	Projet d'Intérêt Général
PIR3D	Petite Interface d'étude de rebonds Rocheux en 3D
POS	Plan d'Occupation du Sol
PPR	Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles
PSS	Plans des Surfaces Submersibles
PZEA	Plans des Zones Exposées aux Avalanches
RGD'74	Régie de Gestion des Données du département de la Haute-Savoie
RTM	service de Restauration des Terrains de Montagne
SGBD	Systèmes de Gestion de Bases de Données
SI	Système d'Information
SIG	Système d'Information Géographique
SIRS	Système d'Information à Référence Spatiale
SIRVA	Système d'Information sur les Risques naturels de la haute Vallée de l'Arve
SQL	Structured Query Language
UML	Unified Modeling Language
USD	United States Dollars
WEB	World Wide Web
ZERMOS	Zones Exposées aux Risques de Mouvements du Sol et du sous-sol

Bibliographie

- **Abrassart E.** (1997) – « Qui assume vraiment les risques ? Système d'indemnisation des inondations en France et dans le monde. » - Actes du colloque *Eaux dans la ville*, Bordeaux, 13-14 mars 1997, pp 26-33.
- **Adjel G.** (1996) – *Méthodes statistiques pour la détermination de la distance d'arrêt des avalanches.* – Thèse de doctorat, Division Nivologie – Cemagref, Université Joseph Fourier – Grenoble. – 156 p.
- **Arnal C., Masure P.** (1996) – *Approche intégrée des risques dus aux aléas naturels et leurs impacts potentiels sur les établissements humains, industriels, infrastructures sensibles.* – Rapport du BRGM n° R 38609 – Ministère de l'Environnement. – 31 p.
- **Aubert J.-P., Dixneuf P.** (1991) – *Conception et programmation par objet, techniques, outils et applications.* – Paris : Masson. – 172 p.
- **Badard T.** (1996) – *Etablissement d'un système transactionnel relationnel/objet pour longues transactions.* – Rapport de DEA Image, Université Jean Monnet, St Etienne, ENTPE. – 81 p.
- **Baldoche C.** (1994) – *Principes relatifs à la sécurité des structures.* – Cahier du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, livraison 349, n°2717. – 19 p.
- **Barbaux A.** (1993) – *La qualité des données dans les SIG.* – Mémoire de diplôme d'ingénieur ESGT. – 84 p.
- **Barraqué B.** (1998) – « The common property issue in flood control through land use » - *Transnational seminar on spatial planning and integrated water management, EU DGXVI*, Thessaloniki, 2-3 July 1998, 11 p.
- **Bédard Y.** (1999a) – « Visual Modeling of Spatial Databases : Towards Spatial PVL and UML. »- *Geomatica*, Vol. 53, No. 2, pp 169-186.
- **Bédard Y.** (1999b) – « Principles of spatial database analysis and design. » - in *Geographical Information Systems : Principles, Techniques, Application and Managements*, 2e ed. Edited by Paul A. Longley, Michael F. Goodchild, David J. Maguire, and David W. Rhind, New York: Wiley. pp 413-424.

-
- **Bédard Y., Vallière D.** (1995) – *Qualité des données à référence spatiale dans un contexte gouvernemental.* – Rapport final de recherche, Centre de Recherche en Géomatique, Université Laval, Québec, Canada. – 53 p.
 - **Beghin P.** (1980) – « Modélisation en canal noyé de l'écoulement des avalanches de neige poudreuse à la résolution sur maquette d'un cas réel. » - *Neige et Avalanches*, n°24, pp 42-57.
 - **Bakkehoi S., Domaas U., Lied K.** (1980) – « Calculation of snow avalanche runout distance. » - *Annals of Glaciology*, Vol 4, pp 24-29.
 - **Bennett B., Isli A., Cohn A.-G.** (1998) – « A system handling RCC-8 queries on 2D regions representable in the closure algebra of half-planes. » - *11th International Conference on Industrial and Engineering Application of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA-AIE)*, Springer Verlay, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1415. – pp 281-290.
 - **Berger F.** (1997) – *Interactions forêt de montagne – risques naturels. Détermination de Zones d'Interventions Forestières Prioritaires, l'exemple du département de la Savoie.* – Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts – Cemagref de Grenoble, Paris. – 473 p.
 - **Bernard I. et al.** (1993) – *La prévention des risques naturels : échec ou réussite des Plans d'Exposition aux Risques ?* – Université de Nice Sophia Antipolis, Centre de Recherche de Droit Economique.- 207 p.
 - **Berthet-Rambaud P.** (1999) – *Endommagement des bâtiments soumis aux avalanches : réflexions sur un modèle d'évaluation pour la gestion des risques naturels.* – Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Cemagref ETNA. – 152 p.
 - **Bertin J.** (1967) – *Sémiologie graphique.* – Paris : Editions Gauthier-Villars. – 431 p.
 - **Besson L.** (1996) – *Les risques naturels en montagne. Traitement, Prévention, Surveillance.* – Grenoble : Artès – Publialp. – 437 p.
 - **Bolmont A.** (1992) – *Vers une modélisation statistique d'évaluation des limites d'arrêt des avalanches.* – Mémoire de maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble I. – 100 p.
 - **Bolognesi R.** (1991) – *L'analyse spatiale des risques d'avalanches. Premiers développements d'un environnement informatique d'aide à la décision.* - Thèse de doctorat, Cemagref – division Nivologie - Laboratoire de la Montagne Alpine, Université Joseph Fourier – Grenoble, 1991. - 218 p.
 - **Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I** (1999) – *The Unified Modeling Language user Guide.* – Reading : Addison-Wesley. - 482 p.

-
- **Borrel G.** (1994) – « La Carte de Localisation Probable des Avalanches. » - *Mappemonde*, n°4, pp 17-19.
 - **Bouleux P.** (1999) – *Etude de la vulnérabilité indirecte liée aux risques naturels en montagne. Accessibilité et risque.* – Mémoire de DEA Evaluation et modélisation des territoires, Institut de Géographie Alpine, Cemagref UR ETNA. – 26 p.
 - **Bouzit M.** (1999) – *L'évaluation économique de la prévention des risques naturels : l'analyse coûts-bénéfices (ACB).* – Montpellier : Cemagref. – 34 p.
 - **Braesch C., Haurat A.,** (1995) – *La modélisation systémique en entreprise.* – Paris : Hermès – 288 p.
 - **Brugnot G, Manche Y., Burnet R., Strazzeri D., Martin H., Villanova M, Cassayre H.** (1998) – *Système d'Information pour les Risques naturels de la haute Vallée de l'Arve, rapport final.* – Rapport pour le Contrat de Plan Etat Région Rhône-Alpes, Cemagref UR ETNA, IMAG LSR, service RTM Haute-Savoie. – 34 p.
 - **Brunet R., Ferras R., Théry H.** (1992) – *Les mots de la géographie ; dictionnaire critique.* – Paris : GIP RECLUS, La Documentation Française. - 470 p.
 - **Buisson L.** (1990) – *Le raisonnement spatial dans les systèmes à base de connaissances, application à l'analyse de sites avalancheux.* – Thèse de doctorat, IMAG – Université Joseph Fourier – Grenoble. - 176 p.
 - **Buisson L., Cligniez V.** (1994) – « Bases de connaissances pour l'environnement : le projet ARSEN » - *Revue Internationale de Géomatique*, volume 4-n°3-4/1994. - pp 385-401.
 - **Bundesamt für Umwelt, Walt und Landschaft** (1999a) – *Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren, Methode.* – Bern : BUWAL. – 115 p.
 - **Bundesamt für Umwelt, Walt und Landschaft** (1999b) – *Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren, Fallbeispiele und Daten.* – Bern : BUWAL. – 129 p.
 - **Caron C.** (1991) – *Nouveau formalisme de modélisation conceptuelle adapté au SIRS.* - Mémoire de maîtrise, Centre de Recherche en Géomatique, Faculté de Foresterie et de Géomatique, Université de Laval, Sainte-Foy, Québec. – 247 p.
 - **Cattiau V.** (1994) – *Interactions forêt / chutes de blocs. Etude du versant de la Raie, Sainte Foy Tarentaise (Savoie).* – Mémoire d'Ingénieurs Forestiers, Cemagref Grenoble – Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des forêts de Nancy. – 43 p.
 - **Chalmers A.-F.** (1987) – *Qu'est-ce que la science ?* – Paris : La Découverte. – 287 p.
 - **Chambolle T** (1988) – « Le fléau des dieux ». » - *Aménagement et Nature*, n°88, pp 1
 - **Charre J.** (1995) – *Statistique et territoire.* – Montpellier : GIP Reclus. – 119 p.

-
- **Charron J.** (1995) - *Développement d'un processus de sélection des meilleures sources de données cartographiques pour leur intégration à une base de données à référence spatiale.* - Mémoire de maîtrise, Centre de Recherche en Géomatique, Université Laval, Québec, Canada. - 210 p.
 - **Chastan b., Gilard O., Givone p., Oberlin G.** (1995) - « La prise en compte du risque d'inondation. » - *Ingénieries – EAT*, n°2, p. 13-20.
 - **Chatelain 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*, t. LXXXII, n°4, pp 131-150.
 - **Chevallier J-J.** (1994) – « De l'information à l'action : vers des systèmes d'aide à la décision à référence spatiale (SADRS). » - *European Conference on Geographical information Systems*, Paris, pp 9-21.
 - **Cicéri M.-F., Marchand B., Rimbert S.** (1977) – *Introduction à l'analyse de l'espace.* – Paris : Masson. – 173 p.
 - **Claramunt C., Coulondre S., Libourel T.** (1997) – « Autour des méthodes orientées objet pour la conception des SIG » - *Revue Internationale de Géomatique*, volume 7-n°3-4 - pp 233-257.
 - **Cligniez V.** (1998) – *Un outil de représentation générique de l'espace pour l'étude des risques naturels.* – Thèse de doctorat, Cemagref - division ETNA – Université Jean Monnet – Saint Etienne. – 149 p.
 - **Cligniez V., Manche Y.** (1997) – « Risk analysis for natural hazards in mountain regions : application to snow avalanches. » – *Proceedings of European Conference on Environmental and Societal Change in Mountain Regions*, Oxford. London : Parthenon Publishing. – pp 34-39.
 - **Mc Clung D.M., Shaerer P.A.** (1993) – *The avalanche handbook.* – Seattle : The Mountainers. – 271 p.
 - **Mc Clung D.M., Lied K** (1987) - « Statistical and geometrical definition of snow avalanche runout distance. » - *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 13, pp 107-119.
 - **Crécy (de) L.** (1988) - « L'histoire des risques en montagne. »- dans Decrop G., Galland J.-P. (sous la direction de). *Prévenir les risques : de quoi les experts sont-ils responsables.* – Paris : Editions de l'Aube. – pp 30-42.
 - **Codd E.-F.** (1970) - « A relational model for large shared data banks. »- *Proceedings of the ACM*, Vol. 13, n°6. – pp 337-387.
 - **Cœur D., Lang M., Naulet R., Burnet R., Strazzeri D.** (1998) – « Histoire et connaissance des phénomènes naturels extrêmes. » - *Ingénieries - E A T*, n° spécial Risques naturels - pp 15-26.

-
- **Combris P, Michal Ch.** (1977) – *L'évaluation économique des projets d'aménagement : le cas des zones de montagne.* – Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, Université Paris IX Dauphine. – 82 p.
 - **Cohn A.-G., Gotts N.-M.** (1996) – « The « Egg-Yolk » representation of regions with indeterminate boundaries. » - *Proceeding of GISDATA Specialist Meeting on Spatial Object with Undetermined.* – P. Burrough and A.-M. Frank (eds). – pp 171-187.
 - **Commissariat Général du Plan** (1997) – *La prévention des risques naturels – Rapport d'évaluation.* – Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques. - Paris : La documentation française. – 702 p.
 - **Coussot P.** (1996) – *Les laves torrentielles ; connaissances à l'usage du praticien.* – Cemagref, Série Etudes Equipements pour l'Eau et l'Environnement, n°23. – 177 p.
 - **Cui Z., Cohn A.-G., Randell D.-A.** (1992) – « Qualitative simulation based on logical formalism of space and time. » - *Proceeding AAAI-92*, AAAT Press, Menlo Park, California. – pp 679-684.
 - **Cui Z., Cohn A.-G., Randell D.-A.** (1993) – « Qualitative and topological relationships. » - *in Lecture Notes in Computer Science n°692*, ed. D. Abel and B. C. Ooi, Springer verlay, Berlin. – pp. 296-315.
 - **Dana P-P.** (1995) – « Risques naturels et gestion de l'espace. » - *Revue juridique de l'Environnement*, vol. 3. – pp 419-425.
 - **David B.** (1991) – *Modélisation, représentation et gestion d'information géographique. Une approche en relationnel étendu.* – Thèse de doctorat, Université Paris 6, Informatique, Institut Géographique National – COGIT. - 215 p.
 - **Decrop G, Charlier C.** (1997) – *De l'expertise scientifique au risque négocié.* – Paris : Cemagref Editions. – 102 p.
 - **De Groeve T.** (1999) – *L'incertitude spatiale dans la cartographie forestière.* – Thèse de doctorat, Centre de Recherche en Géomatique – Faculté de Foresterie et de Géomatique, Université de Laval, Québec. – 202 p.
 - **De La Losa A.** (2000) – *Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques.* – Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée, IGN-COGIT. – 174 p.
 - **Denègre J., Salgé F.** (1996) – *les Systèmes d'Information Géographique.* – Paris : Presse Universitaire de France. – Collection Que sais-je ?, n°3122.
 - **Denis H.** (1998) – *Comprendre et gérer les risques sociotechnologiques majeurs.* – Montréal : Edition de l'Ecole Polytechnique de Montréal. – 342 p.

-
- **Desbos E.** (1995) - *Qualification de la vulnérabilité du territoire face aux inondations.* - Mémoire de D.E.A. « Techniques urbaines », Institut National des Sciences Appliquées-Cemagref, Lyon. – 44 p.
 - **Devoгле T.** (1997) – *Processus d'intégration et d'appariement de Bases de Données Géographiques. Application à une base de données routières multi-échelles.* – Thèse de doctorat, Université de Versailles – Institut Géographique National, COGIT. – 206 p.
 - **Devoгле T., Trevisan J., Raynal L.** (1996) – « Processus de constitution d'une base de données multi-échelles. » - *Revue Internationael de Géomatique*, Vol. 6 - n°2-3, pp 249-263.
 - **Duby J-J** (1995) - « L'impossible maîtrise du risque. » - *Pour la science*, n°207, pp 10-12.
 - **Duclos P.** (1999) – *Evaluation économique par l'analyse coûts-bénéfices des dispositifs de protection contre les risques naturels en montagne. Application au torrent de Manival.* – Rapport de stage de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Cemagref – Unité de Recherche ETNA. – 106 p.
 - **D'Ercole R.** (1994) - « Les Vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. »- *Revue de Géographie Alpine*, t. LXXXII, n°4, 1994, pp 87-96.
 - **Faure R.-M.** (1994) – *Système d'aide pour la gestion des risques naturels. Exemple de système expert XPENT en stabilité des pentes.* – Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, département de mécanique et informatique, Vaulx-en-Velin. – 8 p.
 - **Federal Emergency Management Agency** (1996) – *Report on costs and benefits of natural hazard mitigation.* – Washington, DC : Government Printing Office. – 50 p.
 - **Finlay P.J., Fell R.** (1997) – « Landslides : risk perception and acceptance. » – *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 34, 1997, p 169-188.
 - **Flageollet J.-C.** (1989) – *Les mouvements de terrains et leur prévention.* – Paris : Ed Masson, Collection Géographie. – 224 p.
 - **Gache S.** (1995) – *Typologie des sources anciennes sur les catastrophes et déséquilibres naturels en Savoie au Petit Age Glaciaire.* - Mémoire de D.E.A. Interface homme-nature, Université Lyon II. – 183 p.
 - **Gagnon P.** (1993) – *Concepts fondamentaux de la gestion du temps dans les SIG.* – Mémoire de maîtrise, Centre de Recherche en Géomatique, Faculté de Foresterie et de géomatique, Université de Laval, Sainte-Foy, Québec. – 160 p.
 - **Gardarin G.** (1982) – *Bases de données : les systèmes et leurs langages.* – Paris : éditions Eyrolles. – 265 p.

-
- **Gilard O., Gendreau N** (1998) – « Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants. » - *Revue des Sciences de l'Eau*, n°3 – 1998 , pp 429-444.
 - **Godard N.** (1994) – « Les inondations en France métropolitaine » - *La Houille Blanche*, n°3-1994, pp 5-7.
 - **Golliet C.** (1998) – « Pour une sélection intelligente des efforts de prévention : une analyse économique du danger. » – in *Introduction aux cindyniques*, ouvrages collectifs, sous la dir. Wybo J-L. Paris : éditions ESKA. – pp 109-125.
 - **Gominet S.** (1999) – *L'information de la population en matière de risques naturels : intérêts, limites et perspectives dans le département de Haute-Savoie. Le cas de Chamonix Mont-Blanc.* – Mémoire de maîtrise – Institut de Géographie Alpine, université Joseph Fourier – Grenoble I. – 100 p.
 - **Guarnieri F.** (1992) – *Modèles de systèmes et systèmes de modèles dans les systèmes à base de connaissances.* – Thèse de doctorat, CEMEF – Ecole des Mines de Paris – Sophia Antipolis, Laboratoire de la Montagne Alpine, université Joseph Fourier – Grenoble. - 219 p.
 - **Guesgen H., Albrecht J.** (1998) – « Qualitative Spatial Reasoning with a Fuzzy distance Operator. » - *Proceedings of Spatial Data Handling (SDH) 98*, pp 76-87.
 - **Gumuchian H., Marois C.** (2000) – *Initiation à la recherche en géographie ; aménagement, développement territorial, environnement.* – Paris : Anthropos Economica. – 425 p.
 - **Haggett P.** (1973) – *L'analyse spatiale en géographie humaine.* – Paris : Armand Colin. – 390 p.
 - **Hausmann. P., Perils C.** (1999) – *Les inondations : un risque assurable ?* – Zurich : Swiss Re Publishing. – Compagnie Suisse de Réassurance – 52 p.
 - **Hubert G., Ledoux B.** (1999) – *Le coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations.* – Paris : Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. – 232 p.
 - **Jacobson I, Christerson M., Jonsson P., Overgaard G.** (1993) – *Le génie logiciel orienté objet.* – Paris : Editions Addison-Wesley France. – 536 p.
 - **Jarrosson B.** (1992) – *Invitation à la philosophie des sciences.* – Paris : Edition du Seuil. – 233 p.
 - **Johnson Glenn O., Reynolds Larry A.** (1994) - « Using GIS for Hazards Vulnerability Analysis » - *Proceedings of The International Emergency Management and Engineering Conference (TIEMEC)*, Hollywood Beach, Florida, April 18-21 1994, pp 3-8.

-
- **Jones C.** (1997) – *Geographical information System and Computer cartography*. – Harlow : Longman.- 318 p.
 - **Jourdan J.-P.** (1997) – « Stratégie de protection » - *Université européenne d'été sur les risques naturels*, St Niklaus, Suisse. 13 p.
 - **Journel A. G., Huijbregts CH. J.** (1991) – *Mining Geostatistics*. – London : Academic Press Limited. – 600 p.
 - **Kant E.** (1987) – *Critique de la raison pure*. – Paris : Flammarion. – 725 p.
 - **Kaufmann A** (1968) – *Des points et des flèches, la théorie des graphes*. – Paris : Editions Dunod. – 153 p.
 - **Kaufmann A., Dubois T., Cools M.** (1975) – *Exercices avec solutions sur la théorie des sous-ensembles flous*. – Paris : Masson. – 166 p.
 - **Keylock C., Mc Clung D., Magnusson M.** (1999) – « Avalanche risk mapping by simulation. » - *Journal of Glaciology*, Vol 45, N°150, pp 303-314.
 - **Keylock C., Choquet A.** (1997) – *Study of avalanche dynamics with the aim of mapping risk areas, training in the construction of models of natural phenomena*. – Report for the human Capital and Mobility meeting. – Reykjavik, march 1997. – 21 p.
 - **Kosko B., Isaka S.** (1993) – « La logique floue. » - *Pour la science*, n°191. – pp 62 – 68.
 - **Laigle D.** (1998) – « La modélisation des écoulements de laves torrentielles boueuses. De la validation en laboratoire au zonage des risques sur le terrain. » - *Ingénieries – EAT*, n°15. – pp 79-88.
 - **Lambert R.** (1995) – « Avalanches : prévisibles ou imprévisibles ? » – Actes du colloque *Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche*, Chamonix, 30 mai-3 juin 1995. – pp 183-186.
 - **Lang T.-E., Dawson K.-L., Martinelli M.-J.** (1979) – « Application of numerical transient fluid dynamics to snow avalanche flow – Part I – Developpment of computer program AVALANCH. » - *Journal of Glaciology*, Vol. 22, n°86. pp 107-115.
 - **Latour B.** (1995) – *Le métier de chercheur, regard d'un anthropologue*. – Paris : INRA éditions. – 94 p.
 - **Laurini R., Milleret-Raffort F** (1993) – *Les Bases de données en géomatique*. – Paris : édition Hermès.- 340 p.
 - **Ledoux B.** (1995) - *Les catastrophes naturelles en France*. - Paris : Document Payot. – 445 p.
 - **Legard B** (2000) – *Prévention des inondations torrentielles méditerranéennes, approche multi-agents pour l'aide à la gestion spatialisée de crise*. - Thèse de doctorat, université Joseph Fourier – Grenoble I. – 159 p.

-
- **Leroy A., Signoret J.-P.** (1995) – *Le risque technologique*. – Paris : Presse Universitaire de France - collection Que sais-je ? n°2669. – 127 p.
 - **Leone F.** (1996) – *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain*. – Thèse de doctorat, BRGM – Marseille, Laboratoire de la Montagne Alpine, Université Joseph Fourier – Grenoble. - 274 p.
 - **Lockman D.** (1997) – *Oracle 8, développement de bases de données*. – Paris : Simon & Schuster Macmillan. – 666 p.
 - **Manche Y.** (1999) – « Analyse spatiale pour la prise en compte de la vulnérabilité dans l'étude des risques naturels. » - *Les quatrièmes rencontres de Théo-Quant*, Besançon, 11-12 février 1999. – 8 p.
 - **Manche Y.** (1998a) – « Cartographie multi-risques : une méthode semi automatique. » - *Ingénieries - E A T, n° spécial Risques naturels* - pp 115-119.
 - **Manche Y.** (1998b) – « Modélisation spatiale pour les risques naturels » - *Actes du colloques Géopoint 98 « Décision et analyse spatiale »*, Avignon, 28-29 mai 1998. – 5 p.
 - **Manche Y.** (1997) – « Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles. » - *Revue de Géographie Alpine*, n°2, t. 85, pp 49-62.
 - **Manche Y.** (1997b) – « Vers une cartographie spatio-temporelle et multi-échelle des risques naturels en montagne. » - *Actes Les Journées du Programmes Environnement, Vie et Sociétés PIREVS*, Toulouse, 5-7 novembre 1997, pp 305-310.
 - **De Marcellis N.** (1996) – *Conditions et limites de l'assurabilité des risques*. - Note de recherche du Groupe de Recherche sur le Risque, l'Information et la Décision n°96-19, Ecole Normale Supérieure, Cachan. – 30 p.
 - **Mariel A., Jappiot M.** (1997) – *Evaluation et cartographie du risque d'incendie de forêt dans le massif des Maures*. – Rapport d'étude, Cemagref, division Agriculture et Forêt Méditerranéennes, Aix en Provence. – 66 p.
 - **Marco O** (1994) – *Instrumentation d'un site avalancheux*. – Thèse de doctorat, Cemagref Division Nivologie, Université Joseph Fourier, Grenoble I. – 220 p.
 - **Marnezy A.** (1999) – *L'Arc et sa vallée. Anthropisation et géodynamique d'une rivière alpine dans son bassin versant*. – Thèse de doctorat d'Etat en Géographie, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble I. – 682 p.
 - **Mases M.** (1997) – *Analyse et modélisation de la répartition spatiale de la neige transportée par le vent sur des sites d'avalanches et sur des domaines skiables*. - Thèse de doctorat, Cemagref division Nivologie, université joseph Fourier, Grenoble I. – 180 p.

-
- **Martel C.** (1999) – *Développement d'un cadre théorique pour la gestion des représentations multiples dans les bases de données spatiales.* – Mémoire de maître ès sciences (M.Sc.), Centre de Recherche en Géomatique, Faculté de Foresterie et Géomatique, Université Laval, Québec – Canada. – 127 p.
 - **Martin G.** (1994) – *Cartographie automatique des zones de départ d'avalanches.* – Rapport de DESS de Cartographie Numérique, Ecole Nationale des Sciences Géographiques – Cemagref, Division Nivologie. – 85 p.
 - **Martinet G.** (1992) – *Contribution à la modélisation numérique des avalanches de neige dense et des laves torrentielles.* – Thèse de doctorat, Cemagref division Nivologie et Protection contre les Erosions, université Joseph Fourier, Grenoble I. – 218 p.
 - **Meunier M.** (1994) – *Eléments d'hydraulique torrentielle.* – Cemagref, Collection Etudes, série Montagne n°1, 278 p.
 - **Michon J.** (1999) – *Conception et création d'une base de données recensant toutes les études menées par les experts sur les risques naturels, avec une application SIG sur la France.* – Rapport de stage DESS Cartographie, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, MATE-DPPR. – 35 p.
 - **Ministère de l'environnement et de la prévention des risques technologiques et naturels majeurs** (1990) - *Eléments d'information sur les risques technologiques et naturels majeurs.* – Paris : La Documentation française. – 72 p.
 - **Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement** (1997) – *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), guide général.* – Paris : La Documentation française. – 76 p.
 - **Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement** (1999) - *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), guide méthodologiques pour les risques d'inondation.* - Paris : La Documentation française. – 123 p.
 - **MISE** (1999) – *Mission d'inspection relative à l'autorisation de construire dans un secteur protégé en zone de montagne.* - Rapport de la mission spécialisée d'inspection environnement (MISE), Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Sous-Direction de la prévention des Risques Majeurs. – 31 p.
 - **Mocellin F., Martin H** (1999) – « Modelling behavioral aspects of multimedia presentations using an active object DBMS. » - *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing, San Antonio, Texas, USA.*
 - **Muller P.-A.** (1997) – *Modélisation objet avec UML.* – Paris : Editions Eyrolles. – 421 p.
 - **Munier B., Hautin N., Muzet S., Placer V.** (1997) – *Rapport sur les méthodes coûts-bénéfices de la prévention des risques naturels.* - Groupe de Recherche sur le Risque, l'Information et la Décision, Ecole Normale Supérieure, Cachan. – 293 p.

-
- **Naaim M.** (1999) - *Application de la modélisation numérique à l'étude des risques naturels liés à la neige et aux avalanches.* - Habilitation à Diriger des Recherches en mécanique, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 180 p.
 - **Naaim M.** (1998) – « Modélisation des avalanches de neige en France, application au cas d'Arinsal. » - *Journées d'étude des avalanches, du phénomène à la maîtrise du risque*, Grenoble. – 10 p.
 - **Naaim-Bouvet F.** (1997) – *Contribution à la modélisation physique et numérique du transport de la neige par le vent.* – Thèse de doctorat, Cemagref Division Nivologie, Université Joseph Fourier, Grenoble I. – 339 p.
 - **National Research Council** (1990) – *Snow Avalanche Hazards and Mitigation in the United States.* – Washington D.C. : National Academy Press. – 84 p.
 - **Normand P.** (1999) – *Modélisation des contraintes d'intégrité spatiale, théorie et exemples d'applications.* – Mémoire de Maîtrise, Centre de Recherche en Géomatique, Département des Sciences Géomatiques, Université Laval, Québec, Canada. – 95 p.
 - **Oberlin G., Gautier J-N, Chastant B., Farrisier P., Givone P.** (1993) – « Une méthode globale pour la gestion rationnelle des zones inondables : le programme inondabilité du Cemagref. » - *Sécheresse*, n°3, vol. 4, pp 171-176.
 - **Pantazis D.N., Donnay J.P.** (1997) – « Objets géographiques à limites indéterminées. Modélisation et intégration dans un modèle conceptuel de données. » – *Revue Internationael de Géomatique*, volume 7 – n°2/1997, pp 159-186.
 - **Parent C. et al** (1998) – « Modelling Spatial Data in the MADS Conceptual Model. » - *Proceedings of Spatial Data Handling (SDH) 98*, pp138-150
 - **Penniman D., Boisselle R.** (1996) – « Decision-making on Variable Risk Terrain. » - *Proceedings of International Snow Science Workshop*, Banff, Canada, pp 67-72.
 - **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, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier - Grenoble. - 350 p.
 - **Placer V., Delquié P.** (1997) – *Societal risk perception and demand for risk mitigation.* - Note de recherche du Groupe de Recherche sur le Risque, l'Information et la Décision n°97-03, Ecole Normale Supérieure, Cachan. – 9 p.
 - **Pooley R., Perdita S.** (1999) – *Using UML, Software Engineering with Objects and Components.* – Harlow : Addison Wesley Longman Limited. – 256 p.
 - **Pottier N.** (1998) – *L'utilisation des outils juridiques de prévention des risques d'inondation : évaluation des effets sur l'homme et l'occupation des sols dans les plaines alluviales (application à la Saône et à la Marne)* – Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussée – Paris. – 548 p.
-

-
- **Pouliot J., Rognon N., Bédard Y., Golay F.** (1997) – « De la sélection à la mise en œuvre d'outils de conception pour les SIRS. » - *Revue International de Géomatique*, Vol 7 – n°3, pp 259-277.
 - **Randell D.-A., Cui Z., Cohn A.-G.** (1992) – « A spatial logic based on regions and connection. » - *Proceeding of Third International Conference on Knowledge representation and Reasoning*, Boston, Oct 1992. 12 p.
 - **Raynal L., Dumolard P. et al** (1996) – « Gérer et générer des données spatiales hiérarchisées. » - *Revue International de Géomatique*, Vol 6 – n°4, pp 365-382.
 - **Redman T.** (1998) - *La qualité des données à l'âge de l'information*. - Paris : Masson, 264 p.
 - **Regnauld N.** (1998) – *Généralisation du bâti : structure spatiale de type graphe et représentation cartographique*. - Thèse de doctorat, Université de Provence, Aix-Marseille I – Institut Géographique National, COGIT. – 191 p.
 - **Rezig S.** (1998) – *Modélisation probabiliste de l'aléa mouvement de terrain, développement d'une méthode quantitative pour l'aide à l'expertise*. – Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, Laboratoire de Mécanique des sols, Structures et Matériaux, Châtenay Malabry. – 206 p.
 - **Rigaux P.** (1995) – *Interfaces visuelles et multi-représentation dans les bases de données spatiales*. – Thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers – Paris. – 164 p.
 - **Rolland-May C.** (2000) – *Evaluation des territoires ; concepts, modèle, méthodes*. – Paris : Hermès. – 381 p.
 - **Rolland-May C.** (1987) – « La théorie des ensembles flous et son intérêt en géographie. » - *L'Espace Géographique*, n°1, 1987, pp 42-50.
 - **Rolland-May C.** (1985) – « Les espaces géographiques flous : à chaque type d'espace sa logique, sa mathématique, sa méthode. » - Séminaire de recherche, Laboratoire de Géographie théorique et quantitative, université de Metz.
 - **Roqueplo P.** (1997) – *Entre savoir et décision, l'expertise scientifique*. Paris : INRA éditions. 111 p.
 - **Roqueplo P.** (1993) – *Climats sous surveillance. Limites et conditions de l'expertise scientifique*. – Paris : Economica. – 401 p.
 - **Rouzet C., Labbé S.** (1997) – « SIG en « multi-partenariat » : mobiliser les acteurs et partager les données. » - *Revue International de Géomatique*, Vol 7 – n°3, pp 279-295.
 - **SAGERI** (1988) - *Evaluation de la vulnérabilité*. - Neuilly-sur-Seine : Ministère chargé de l'environnement / DEPPR / DRM. - 105 p.
-

-
- **Sanseverino-Godfrin V.** (1996) – *L'Etat, les compagnies d'assurance et les risques majeurs.* – Thèse de doctorat, faculté de droit, des sciences économiques et de gestion, Université de Nice-Sophia Antipolis. – 355 p.
 - **Saporta G.** (1990) - *Probabilités, analyse des données et statistique.* – Paris : Edition Technip. – 493 p.
 - **Schaerer P.** (1989) - « The Avalanche-Hazard Index. » - *Annals of Glaciology*, n°13, pp 241-247.
 - **SCOR** (1996a) – *L'assurance des catastrophes naturelles.* – Paris : SCOR notes, avril 1996. – 90 p.
 - **SCOR** (1996b) – *Les événements naturels sont-ils assurables ?* – Paris : SCOR notes, août 1996. – 54 p.
 - **Smith K.** (1996) – *Environmental hazards, assessing risk and reducing disaster.* – London : Routledge. – 389 p.
 - **Smith M.J., McClung D.M.** (1997) - « Avalanche frequency and terrain characteristics at Rogers' Pass, British Columbia, Canada » - *Journal of Glaciology*, Vol. 43, N° 143, pp165-171.
 - **Stell J., Worboys M.** (1998) – « Stratified Map Spaces : A Formal Basis for Multi-resolution Spatial Databases. » - *Proceedings of Spatial Data Handling (SDH) 98*, pp180-189.
 - **Strazerri D., Manche Y.** (1998) – « L'Enquête Permanente sur les Avalanches » - *Revue de Géographie Alpine*, n°2, t. 86, pp 45-52.
 - **Tarek M.** (1999) – *Elaboration d'une maquette SIG pour la localisation et la prévention des risques d'érosions torrentielles.* - Mémoire du Master SILAT, Laboratoire Commun de Télédétection ,Cemagref – ENGREF - RTM, Montpellier. – 56 p.
 - **Taylor C., Vanmarcke E., Davis J.** (1998) – *Evaluating models of risks from natural hazards.* – In Kunreuther H., Roth R ; J. – *Paying the price, the status and role of insurance against natural disasters in the United States.* – Washington, DC : Joseph Henry Press. p. 239-249.
 - **Terano T., Asai K., Sugeno M.** (1992) – *Fuzzy Systems Theory and its Applications.* – London : Academic Press Limited. – 268 p.
 - **Theys J., Fabiani J.L.** (1988) - *La société vulnérable.* - (sous la direction de) Paris : Presse de l'Ecole Normale Supérieure. - 674 p.
 - **Timpf S.** (1998) – « Map Cube Model – a Model for Multi-scale Data. » - *Proceedings of Spatial Data Handling (SDH) 98*, pp 190-201
 - **Tong-Tong Jean-Raphaël** (1995) – *La logique floue.* – Paris : Hermès. 160 p.
-

-
- **Torterotot J.P.** (1993) - *Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes.* - Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Paris. - 283 p.
 - **Vangenot C.** (1999) – « Concepts pour la description de bases de données multi-représentation. » - *Les quatrièmes rencontres de Théo-Quant*, Besançon, 11-12 février 1999. – 12 p.
 - **Vangenot C.** (1998) – « Représentation multi-résolution : concepts pour la description de bases de données avec multi-représentation. » - *Revue International de Géomatique*, Vol 8 – n°1-2, pp 121-147.
 - **Villanova M., Manche Y., Martin H., Burnet R.** (2000) – « Un système d'information dans le domaine des risques naturels : le projets SIRVA. » - *A paraître.*
 - **Villanova M.** (1998) – *Système d'Information sur les Risques naturels de la haute Vallée de l'Arve.* – Rapport de DESS double compétence informatique et sciences sociales – Cemagref UR ETNA, IMAG LSR. – 83 p.
 - **Vöellmy A.** (1955) – *Über die zerstörungdkaff von lawinen.* – Schweizerische Bauzeitung, Jarg. 73.
 - **Von Ungern-Sternberg T.** (1997) – *L'assurance immobilière en France : une comparaison avec la Suisse.* – Cahiers de recherches économiques, n°9702, département d'économétrie et d'économie politique, Université de Lausanne. – 25 p.
 - **Weibel R., Dutton G.** (1999) – « Generalising spatial data and dealing with multiple representations. » - *in Geographical Information Systems : Principles, Techniques, Application and Managements*, 2e ed. Edited by Paul A. Longley, Michael F. Goodchild, David J. Maguire, and David W. Rhind, New York: Wiley. pp 125-155.
 - **Wybo J.-L.** (1998) – « Gestion des dangers et systèmes d'aide à la gestion. » - *in Introduction aux cindyniques*, ouvrages collectifs, sous la dir. Wybo J-L. Paris : éditions ESKA. – pp 177-201.
 - **Wilhelm C.** (1998) – « Quantitative risk analysis for evaluation of avalanche protection projects. » - *Nowegian Geotechnical Institute « 25 Years of Snow Avalanche Research »*, Voss 12-16 May 1998, pp 288 - 293
 - **Zanetti A., Enz R.** (1997) – *Catastrophes naturelles et sinistres majeurs en 1996 : importance des sinistres provoqués par l'homme mais absence de catastrophes naturelles fort onéreuses.* – Compagnie Suisse de Réassurances, Zurich - *Sigma*, n°3/1997. – 39 p.

Annexe A : Dictionnaire de données

PROJECT

Project Name: Risque naturel
 Provided by: Yannick M.
 Received by:
 Reference:
 Begin:
 Delivery planned:
 Delivery real:
 Day planned: 0
 Day real: 0
 On going comment:
 Universe:
 Projection:
 Coordinate System:
 Datum:
 Base map info:
 Suggested by:
 Approved by:

FEATURE CLASS

Class Name: /zone vulnérable
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name: Niveau de vulnérabilité
 Attribute name:
 Relationship Names: /zone vulnérable 0,N, /zone vulnérable
 Package Name: vulnérabilité
 Semantic definition: exprime le niveau de conséquence prévisible d'un phénomène naturel sur les enjeux
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived: Dérivé de la classe Quartier
 Existence business rule:
 Existence details:
 Existence derived: Dérivé de quartier
 Temporality: x
 Spatial bussiness rule:
 Spatial detail:
 Geometry derived:
 Geometry:

Spatial evolution business rules:
 Spatial evolution details:
 Spatial evolution derived: Dérivé de quartier
 Spatial evolution: dX
 Media business rule:
 Media detail:
 Media derived:
 Media:

FEATURE FUNCTION

Operation name: Niveau de vulnérabilité
 Attribute name:
 Type name:
 Definition:
 Language:
 Formal definition:
 Visibility:
 Detail:

ASSOCIATION

Association name 1: /zone vulnérable 0,N
 Association name 2: /zone vulnérable 1,N
 Relationship code:
 Feature class included: /risque
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: /zone vulnérable
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: /risque

ASSOCIATION

Association name 1: /zone vulnérable
 Association name 2: /zone vulnérable
 Relationship code:
 Feature class included: /Quartier
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:

Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: /Quartier
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: /zone vulnérable

FEATURE CLASS

Class Name: /risque
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name: Niveau de risque
 Attribute name:
 Relationship Names: /risque 0,N, /risque 0,N
 Package Name:
 Semantic definition:
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived: Dérivé de Zone vulnérable et Aléa
 Existence business rule:
 Existence details:
 Existence derived:
 Temporality: x
 Spatial business rule:
 Spatial detail:
 Geometry derived:
 Geometry:
 Spatial evolution business rules:
 Spatial evolution details: composition spatiale de la vulnérabilité et des aléas
 Spatial evolution derived: Géométrie dérivée de zone vulnérable et d'aléa
 Spatial evolution: dX
 Media business rule:
 Media detail:
 Media derived:
 Media:

ASSOCIATION

Association name 1: /risque 0,N
 Association name 2: /risque 1,N
 Relationship code:
 Feature class included: aléa
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:

Class name 1: aléa
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: /risque

ASSOCIATION

Association name 1: /risque 0,N
 Association name 2: /risque 1,N
 Relationship code:
 Feature class included: /zone vulnérable
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: /zone vulnérable
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: /risque

FEATURE CLASS

Class Name: aléa
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:
 Attribute name: Amplitude, Fréquence
 Relationship Names: aléa 0,N, aléa 1,1
 Package Name: aléa
 Semantic definition: le phénomène naturel physique par, le plus souvent, son amplitude et sa période de retour
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived:
 Existence business rule:
 Existence details:
 Existence derived: Dérivé de la temporalité des phénomènes
 Temporality: x
 Spatial business rule:
 Spatial detail:
 Geometry derived:
 Geometry:
 Spatial evolution business rules:
 Spatial evolution details:
 Spatial evolution derived: Géométrie dérivée, vient de la géométrie des sites. 1 à N sites de phénomène naturel construit 1,1 polygone. Fonction de la géométrie d'un phénomène

Spatial evolution: dX
 Media business rule:
 Media detail:
 Media derived:
 Media:

ASSOCIATION

Association name 1: aléa 0,N
 Association name 2: aléa 1,N
 Relationship code:
 Feature class included: /risque
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: aléa
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: /risque

ASSOCIATION

Association name 1: aléa 1,1
 Association name 2: aléa 1,N
 Relationship code:
 Feature class included: /phénomène naturel
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: /phénomène naturel
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: aléa

FEATURE CLASS

Class Name: /phénomène naturel
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:

Attribute name:
 Relationship Names: /phénomène naturel 1,1, /phénomène naturel
 Package Name: aléa
 Semantic definition:
 Abstract: Vrai
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived: Dérivé de Avalanche, Crue et Mouvement de terrain
 Existence business rule:

GENERALIZATION

Generalization name: /phénomène naturel
 Generalization definition:
 Generalization code:
 Feature class included: Crue rapide, Avalanche, Mouvement de terrain
 Order indicator:
 Package name:
 Constraint:
 Visibility:

FEATURE CLASS

Class Name: VRD
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:
 Attribute name:
 Relationship Names: VRD , VRD
 Package Name: Vulnérabilité
 Semantic definition: Voirie et Réseau divers
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived:

GENERALIZATION

Generalization name: VRD
 Generalization definition:
 Generalization code:
 Feature class included: Réseau électrique, Réseau d'eau, Voie de communication routière, Voie ferroviaire, transport par câble
 Order indicator:
 Package name:
 Constraint:
 Visibility:

FEATURE CLASS

Class Name: batiment
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:

Attribute name:
 Relationship Names: bâtiment 0,N, bâtiment , bâtiment
 Package Name: vulnérabilité
 Semantic definition: Construction humaine
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived:
 Existence business rule:
 Existence details:
 Existence derived:
 Temporality: x
 Spatial business rule:
 Spatial detail:
 Geometry derived:
 Geometry: e
 Spatial evolution business rules:
 Spatial evolution details: Cadastre - norme DGI
 Spatial evolution derived:
 Spatial evolution:
 Media business rule:
 Media detail:
 Media derived:
 Media:

ASSOCIATION

Association name 1: bâtiment 0,N
 Association name 2: bâtiment 0,N
 Relationship code:
 Feature class included: Occupation journalière
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: bâtiment
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: Occupation journalière

GENERALIZATION

Generalization name: bâtiment
 Generalization definition:
 Generalization code:
 Feature class included: bâtiment privé, bâtiment public
 Order indicator:
 Package name:

Constraint:
Visibility:

FEATURE CLASS

Class Name: Occupation humaine
Type Code:
Type Aliases:
Operation Name:
Attribute name:
Relationship Names: Occupation humaine
Package Name: vulnérabilité
Semantic definition: Zones utilisées par la société
Abstract: Faux
Visibility:
Stereotype Value:
Stereotype Abstract: Faux

FEATURE CLASS

Class Name: batiment individuel
Type Code:
Type Aliases:
Operation Name:
Attribute name: Utilisation, nombre de personnes
Relationship Names: bâtiment individuel
Package Name: vulnérabilité
Semantic definition:
Abstract: Faux
Visibility:
Stereotype Value:
Stereotype Abstract: Faux
Derived:
Existence business rule:
Existence details:
Existence derived:
Temporality:
Spatial bussiness rule:
Spatial detail:
Geometry derived:
Geometry:
Spatial evolution business rules:
Spatial evolution details:
Spatial evolution derived:
Spatial evolution:
Media business rule:
Media detail:
Media derived:
Media:

ATTRIBUTE

Attribute name: Utilisation
Definition: Type d'utilisation : privé ou professionnelle
Data Type:
Default Value:

Identifiant: Faux
 Attribute code:

ATTRIBUTE

Attribute name: nombre de personnes
 Definition:
 Data Type:
 Default Value:
 Identifiant: Faux
 Attribute code:
 Measurement unit:
 Required: Faux

FEATURE CLASS

Class Name: bâtiment collectif
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:
 Attribute name: nb d'étages et/ou logements, Utilisation,
 Relationship Names: bâtiment collectif
 Package Name: vulnérabilité
 Semantic definition:
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived:
 Existence business rule:
 Existence details:
 Existence derived:
 Temporality:
 Spatial business rule:
 Spatial detail:
 Geometry derived:
 Geometry:
 Spatial evolution business rules:
 Spatial evolution details:
 Spatial evolution derived:
 Spatial evolution:
 Media business rule:
 Media detail:
 Media derived:
 Media:

ATTRIBUTE

Attribute name: Utilisation
 Definition: Utilisation privé ou professionnelle
 Data Type:
 Default Value:
 Identifiant: Faux
 Attribute code:
 Measurement unit:
 Required: Faux

GENERALIZATION

Generalization name: bâtiment privé
 Generalization definition:
 Generalization code:
 Feature class included: bâtiment individuel, bâtiment collectif
 Order indicator:
 Package name:
 Constraint:
 Visibility:

FEATURE CLASS

Class Name: bâtiment public
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:
 Attribute name: amplitude, fréquence
 Relationship Names: bâtiment public
 Package Name: vulnérabilité
 Semantic definition: Bâtiment destiné à l'accueil du public
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux

FEATURE CLASS

Class Name: Commune
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:
 Attribute name:
 Relationship Names: Commune 1,1
 Package Name:
 Semantic definition:

ASSOCIATION

Association name 1: Commune 1,1
 Association name 2: Commune 1,N
 Relationship code:
 Feature class included: Département
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: Commune
 Role name 2:

Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: Département

FEATURE CLASS

Class Name: Département
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:
 Attribute name:
 Relationship Names: Département 1,1, Département 1,1
 Package Name:
 Semantic definition:
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived:
 Existence business rule:
 Existence details:
 Existence derived: Dérivé de commune
 Temporality: x
 Spatial bussiness rule:
 Spatial detail:
 Geometry derived: Dérivé de commune
 Geometry: e
 Spatial evolution business rules:
 Spatial evolution details:
 Spatial evolution derived:
 Spatial evolution:
 Media business rule:
 Media detail:
 Media derived:
 Media:

ASSOCIATION

Association name 1: Département 1,1
 Association name 2: Département 1,N
 Relationship code:
 Feature class included: Région
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: Département
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:

Class name 2: Région

ASSOCIATION

Association name 1: Département 1,1
 Association name 2: Département 1,N
 Relationship code:
 Feature class included: Commune
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: Commune
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: Département

FEATURE CLASS

Class Name: Voie de communication routière
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:
 Attribute name: Type
 Relationship Names: Voie de communication routière
 Package Name: vulnérabilité
 Semantic definition:
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived:
 Existence business rule:
 Existence details:
 Existence derived:
 Temporality: x
 Spatial business rule:
 Spatial detail: Délimitation géométrique des segments par les ponts, tunnels, galeries de protection,... et les limites communales
 Geometry derived:
 Geometry: t
 Spatial evolution business rules:
 Spatial evolution details:
 Spatial evolution derived:
 Spatial evolution:
 Media business rule:
 Media detail:
 Media derived:
 Media:

ATTRIBUTE

Attribute name:
 Definition:
 Data Type:
 Default Value:
 Identifier: Faux
 Attribute code:
 Measurement unit:
 Required: Faux

ATTRIBUTE

Attribute name: Type
 Definition: Types de voie : chemin forestier ; chemin communal ; Route Départementale ;
 Route Nationale ; Autoroute
 Data Type: Character (specify)
 Default Value:
 Identifier: Faux
 Attribute code:
 Measurement unit:
 Required: Faux

GENERALIZATION

Generalization name: VRD
 Generalization definition:
 Generalization code:
 Generalized feature class: VRD
 Order indicator:
 Package name:
 Constraint:
 Visibility:

FEATURE CLASS

Class Name: Réseau électrique
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:
 Attribute name: Type
 Relationship Names: Réseau électrique
 Package Name: Vulnérabilité
 Semantic definition:
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived:
 Existence business rule:
 Existence details:
 Existence derived:
 Temporality: x
 Spatial business rule:
 Spatial detail: Géométrie délimitée par les limites communales

Geometry derived:
 Geometry: w
 Spatial evolution business rules:
 Spatial evolution details:
 Spatial evolution derived:
 Spatial evolution:
 Media business rule:
 Media detail:
 Media derived:
 Media:

ATTRIBUTE

Attribute name: Type
 Definition: Type de ligne électrique : Très Haute tension ; Haute tension ; Normale
 Data Type:
 Default Value:
 Identifier: Faux
 Attribute code:
 Measurement unit:

FEATURE CLASS

Class Name: Réseau d'eau
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:
 Attribute name: Type
 Relationship Names: Réseau d'eau
 Package Name: Vulnérabilité
 Semantic definition:
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived:
 Existence business rule:
 Existence details:
 Existence derived:
 Temporality: x
 Spatial business rule:
 Spatial detail: Géométrie délimitée par les limites communales
 Geometry derived:
 Geometry: w
 Spatial evolution business rules:
 Spatial evolution details:
 Spatial evolution derived:
 Spatial evolution:
 Media business rule:
 Media detail:
 Media derived:
 Media:

ATTRIBUTE

Attribute name: Type

Definition: Réseau d'aduction d'eau ou d'évacuation
 Data Type: Character (specify)
 Default Value:
 Identifier: Faux
 Attribute code:
 Measurement unit:

GENERALIZATION

Generalization name: VRD
 Generalization definition:
 Generalization code:
 Generalized feature class: VRD
 Order indicator:
 Package name:
 Constraint:
 Visibility:

FEATURE CLASS

Class Name: Occupation journalière
 Type Code:
 Type Aliases:
 Operation Name:
 Attribute name: Horaire, Jour
 Relationship Names: Occupation journalière 0,N, Occupation journalière 0,1
 Package Name:
 Semantic definition:
 Abstract: Faux
 Visibility:
 Stereotype Value:
 Stereotype Abstract: Faux
 Derived:
 Existence business rule:
 Existence details:
 Existence derived:
 Temporality:
 Spatial bussiness rule:
 Spatial detail:
 Geometry derived:
 Geometry:
 Spatial evolution business rules:
 Spatial evolution details:
 Spatial evolution derived:
 Spatial evolution:
 Media business rule:
 Media detail:
 Media derived:
 Media:

ATTRIBUTE

Attribute name: Horaire
 Definition: Horaires d'ouverture et/ou d'utilisation
 Data Type:
 Default Value:

Identifier: Faux
 Attribute code:
 Measurement unit:
 Required: Faux
 Derived:
 ATTRIBUTE

 Attribute name: Jour
 Definition: Jour de semaine ou jour de week-end
 Data Type:

ASSOCIATION

Association name 1: Occupation journalière 0,N
 Association name 2: Occupation journalière 0,N
 Relationship code:
 Feature class included: bâtiment
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: bâtiment
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: Occupation journalière

ASSOCIATION

Association name 1: Occupation journalière 0,1
 Association name 2: Occupation journalière 1,N
 Relationship code:
 Feature class included: Occupation annuelle
 Order indicator:
 Attribute name:
 Package name:
 Visibility:
 Definition:
 Derived:
 Constraint:
 Association class name:
 Role name 1:
 Constraint 1:
 Class name 1: Occupation journalière
 Role name 2:
 Category 2:
 Constraint 2:
 Class name 2: Occupation annuelle

.....

