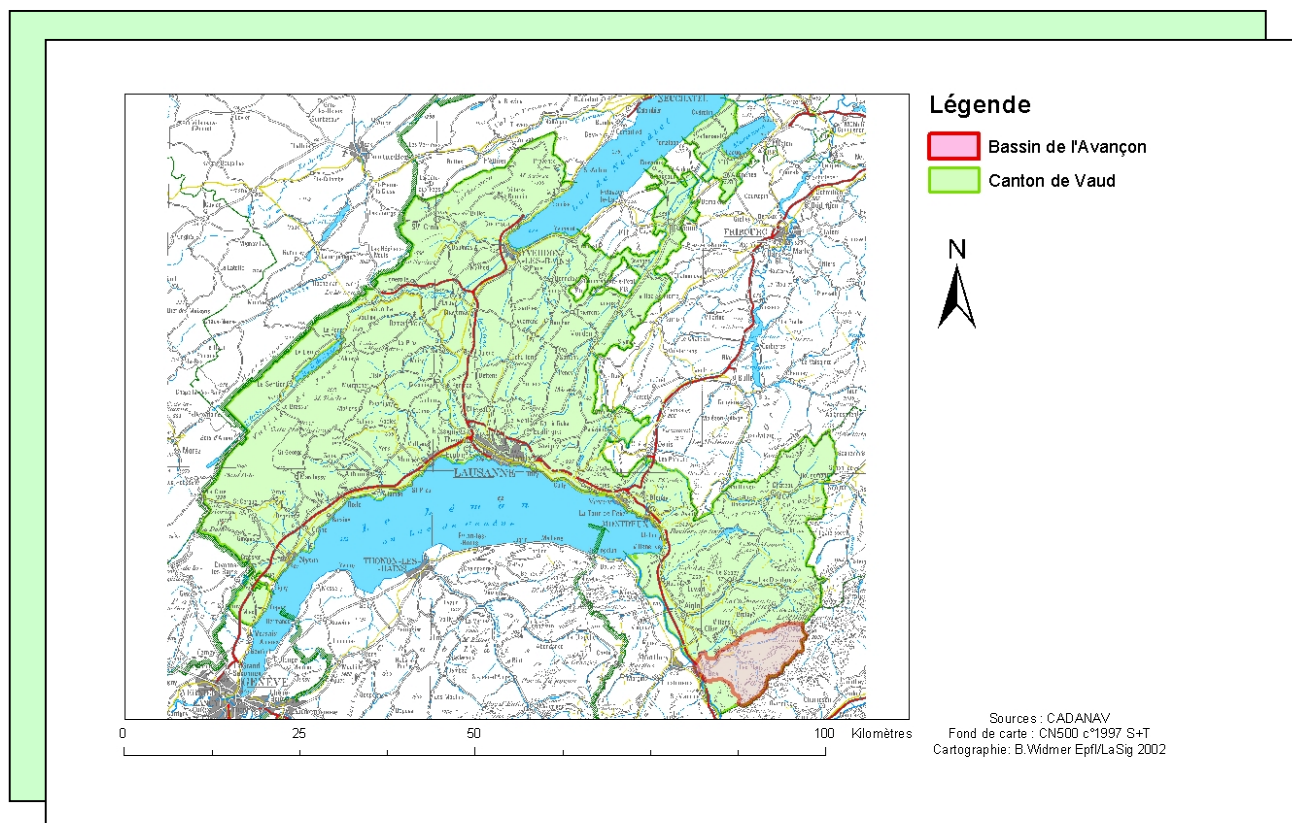


Etude et quantification des risques naturels du bassin de l'Avançon.



TRAVAIL de DIPLOME de Bernard Widmer

Septembre 2002

1	INTRODUCTION	2
2	PRESENTATION	1
2.1	PROJET CADANAV	1
2.2	PROBLEMATIQUE	2
2.3	DEFINITIONS	3
2.4	CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE	6
3	METHODOLOGIE	11
3.1	METHODOLOGIE GENERALE	11
3.2	METHODOLOGIE SPECIFIQUE	14
3.3	TECHNIQUES S.I.G	19
4	DONNEES SIG	22
4.1	MODELE CONCEPTUEL DE DONNEES (MCD)	22
4.2	DESCRIPTION DU MCD	23
4.3	CARTES DE DANGER	25
4.4	CARTE DE DANGER – VERSION AFFINEE	32
5	APPROCHE 1	35
5.1	OBTENTION DES CARTES DE RISQUES	35
5.2	EVALUATION	40
6	APPROCHE 2	46
6.1	PRESENTATION	46
6.2	INDICE DE RISQUE ANNUEL	46
6.3	EVALUATION	50
7	REFLEXIONS ET PROPOSITIONS	54
8	CONCLUSION	58
9	REMERCIEMENTS	60
10	GLOSSAIRE	61
11	BIBLIOGRAPHIE	63

1 Introduction

On présente généralement le champ de l'étude environnementale par le biais de l'une des deux approches générales suivantes. La première examine les effets de l'homme sur l'environnement, avec pour objectif d'identifier les modifications d'origine anthropique. On peut citer dans ce cadre les études sur l'impact de l'homme sur le climat ou sur les influences de l'utilisation du sol sur le paysage. La seconde considère l'homme comme vivant dans un environnement hostile qu'il ne contrôle que très peu. Les catastrophes naturelles ont en effet de tout temps été considérées comme des « actes de Dieu » qui ne pouvaient être évités par les humains (Bryant E. A., 1991, p.1). La question du risque d'origine naturelle ou environnementale réunit des éléments provenant de ces deux thématiques, dans la mesure où elle met en relation l'homme et les phénomènes naturels. De cette relation, où l'homme tient à la fois le rôle de victime et de responsable (SMITH K., 2001, p.76), est déduite la notion de catastrophe.

D'une manière générale, le sens (sémantique) du risque est avant tout d'origine sociale, propre aux sociétés qui l'identifient et le qualifient. Entre autres, l'aspect naturel du risque est devenu une préoccupation majeure des sociétés contemporaines. « Ainsi des phénomènes qui relevaient de l'ordre du divin, sont-ils représentés maintenant comme des processus à contrôler, qu'il faut prévoir pour en limiter les impacts » (Bailly et al., 1996, p.89).

Les impacts des catastrophes ainsi que l'acceptation morale du risque naturel ne sont toutefois homogènes ni dans le temps, ni dans l'espace. « Tandis que la population humaine a doublé depuis trente ans, les dégâts engendrés par les calamités naturelles ont décuplé chaque décennie, reflétant le poids des enjeux économiques. Environ 85% des victimes font partie de la population vivant dans les PED, tandis que $\frac{3}{4}$ des dégâts économiques échoient aux pays développés » (Bailly et al., 1996, p.21).

Par exemple, les Etats-Unis et le Bangladesh sont deux pays régulièrement touchés par le phénomène des cyclones tropicaux. Pour un même phénomène, les dégâts économiques seront probablement plus importants aux Etats-Unis qu'au Bangladesh, mais le nombre de victimes sera certainement beaucoup plus important au Bangladesh. Si la société américaine, à l'instar des sociétés les plus développées, admet une tolérance zéro en matière de victimes de catastrophes naturelles, la société bengali admet l'inévitabilité de nombreuses victimes en cas de catastrophe par impossibilité de mettre en œuvre des mesures de protection efficaces.

Dans le cas du Bangladesh, cette impossibilité est liée notamment à l'économie (pays avec un PNB par habitant très bas), à la densité de la population (très élevée), à la mobilité (même prévenu longtemps à l'avance, la population est tellement nombreuse qu'on ne sait ni comment la déplacer, ni où l'abriter), à la topologie (la majeure partie du Bangladesh est constituée d'un delta fluvial étendu et très plat, donc menacé même par une légère montée des eaux), à la culture (fatalisme?) ou encore la religion (par exemple, les femmes musulmanes n'ont pas le droit de quitter la maison familiale pendant une certaine période de l'année) (Bryant E.A., 1991, p.29-30).

Il est également évident, sur la base de ces éléments, que les politiques de prévention et de réaction face à l'événement dangereux divergent fortement entre ces deux pays. Cet exemple démontre ainsi l'inégalité face au phénomène naturel et ses conséquences, que ce soit du point de vue de l'individu, de la société ou des institutions. Ce qu'il paraît important de retenir ici pour la présente étude, c'est qu'on ne peut considérer le risque naturel, quelle que soit la méthode par laquelle on l'établit, comme une valeur universelle.

Dans le cadre de cette étude, nous allons aborder le risque naturel tel qu'il est perçu en Suisse, c'est-à-dire dans un pays ayant des ressources humaines et matérielles lui permettant théoriquement de se préparer, ainsi que de réagir en cas de catastrophe. Actuellement, la politique suisse stipule, selon les nouvelles lois fédérales traitant de l'aménagement des cours d'eau et des forêts, que les cantons ont l'obligation de référencer les dangers naturels et d'en tenir compte afin de protéger les vies humaines et d'empêcher des dommages aux biens et à l'environnement.

Du point de vue cantonal, dans le cas présent le canton de Vaud, on peut relever que le risque naturel est perçu essentiellement à travers les inondations et phénomènes associés (laves torrentielles, débâcles), ainsi qu'à travers les mouvements de terrains en général (glissements, éboulements, écroulements) (cf. : phénomènes, glossaire). Pour ce qui est des inondations, on compte environ une dizaine d'événements importants au cours du XXème siècle pour l'ensemble du territoire vaudois. Relevons encore que le dernier événement ayant causé la mort d'un nombre important de personnes (340) remonte au XVIème siècle. Au niveau suisse, on peut affirmer que la politique actuelle permet en principe de satisfaire à chacune des étapes du diagramme suivant, que l'on pourrait nommer « cycle de réduction des désastres » (SMITH K., 2001, p.76).

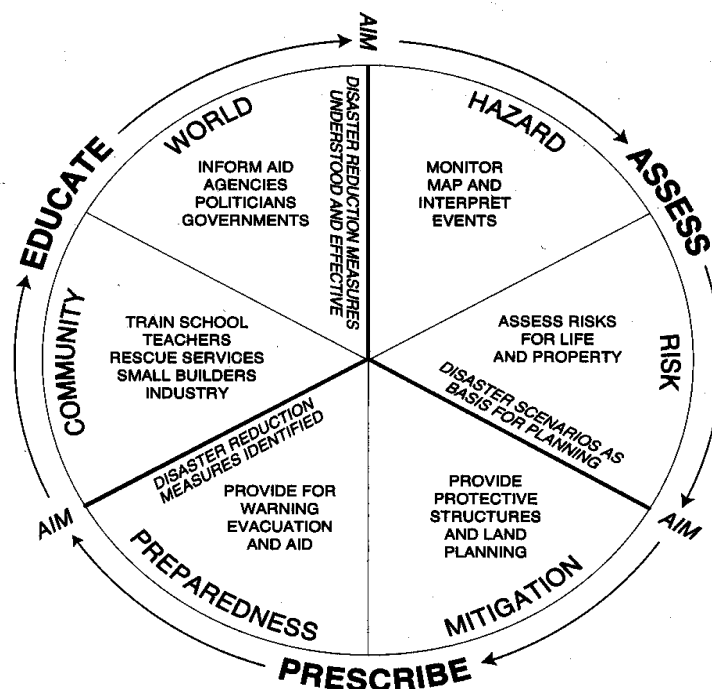


Figure 1 : Cycle de réduction des désastres

Ce schéma peut s'exprimer comme étant une représentation systémique du processus d'atténuation du risque. Le cycle représenté comporte en effet une boucle de rétroaction (feed-back), à savoir l'**éducation**, ayant un effet réducteur sur le désastre. Les étapes de ce cycle sont les suivantes :

En premier lieu, nous avons ce que la nature **impose** (asses) à l'homme. Cette étape se conclue par l'identification des scénarios de désastre. Ensuite, nous avons ce que l'homme **prescrit** (prescribe) en réaction à la menace. Cette étape se conclue par l'identification des mesures de réduction des désastres. Finalement, nous avons la manière dont la communauté et à plus grande échelle le monde sont **éduqués** (educate) par rapport aux mesures proposées. La conclusion de cette étape consiste en l'existence de mesures de réduction comprises et efficaces. Un aspect important à relever dans ce schéma consiste en la mise en lumière du rôle de l'apprentissage dans le processus de réduction des désastres.

Le cadre général de la présente étude se situe, par rapport à ce cycle, dans le premier tiers (assess), tout en proposant les bases des actions effectuées dans le second tiers (prescribe) concernant la mise en place de solutions (**prescription**) pour diminuer les effets des désastres. Remarquons que la quasi-totalité des disciplines scientifiques est concernée à un moment ou à un autre de ce cycle. Cet élément met en valeur l'aspect pluridisciplinaire et par conséquent la variété d'approches dans l'étude de la question du risque naturel, mais pose également la nécessité de l'aptitude à parler et à comprendre plusieurs « langages » scientifiques.

2 Présentation

2.1 Projet CADANAV

La présente étude sur le risque naturel se base sur les données rassemblées dans le cadre du projet CADANAV et reprend en grande partie les concepts développés pour ce dernier.

Le projet CADANAV fait suite à une initiative récente du Canton de Vaud visant la création d'une **Commission Cantonale** chargée des tâches de coordination inter services en matière de **Dangers Naturels** (CCDN) à l'échelle du Canton. Cette commission pilotera les actions liées à l'établissement des cartes de dangers pour l'ensemble du territoire; le projet CADANAV en constituant la première étape.

Le projet CADANAV vise à établir une méthodologie de mise en œuvre des **CARtes de DAngers NAturels** du canton de **Vaud**. Les dangers concernés par cette étude sont les **dangers dus aux crues** (inondations, effondrement de berges, laves torrentielles et coulées boueuses), les **dangers dus aux mouvements de terrain** (glissement de terrain, chutes de pierres et éboulements, affaissement et effondrement) et les **dangers dus aux avalanches**.

Les autres dangers naturels (sismique, feu, ouragan, grêle) et aléas climatiques (sécheresse) ne sont pas pris en considération dans cette étude.

Ce projet a fait l'objet d'une **convention de collaboration** entre d'une part l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, représentée par le professeur André Musy agissant au nom des laboratoires des départements de Génie Rural et Génie Civil impliqués ainsi qu'au nom de l'Institut Fédéral pour l'Etude de la Neige et des Avalanches à Davos (IFENA) et, d'autre part, l'Etat de Vaud, représenté par le Département de la Sécurité et de l'Environnement (CCDN), ainsi que l'Etablissement Cantonal d'Assurance contre l'incendie et les éléments naturels du canton de Vaud (ECA).

Les prestations de l'EPFL se limitent principalement à la **définition d'un concept méthodologique** et de **recommandations pour l'élaboration d'un système d'information géographique** (SIG) ainsi qu'à l'**établissement d'un cahier des charges** destiné aux entreprises susceptibles de réaliser des cartes de dangers. Les prestations incluent un inventaire et une analyse de l'existant. Les cartes de dangers ainsi que les documents connexes exigés par les recommandations seront élaborés ultérieurement par des bureaux d'études.

Ces prestations sont proposées dans l'optique d'une réalisation et d'une utilisation future des cartes de dangers dans le cadre de l'aménagement du territoire, en vue d'une détermination des déficits de protection et des actions prioritaires à entreprendre afin de les combler, en tant qu'outil d'évaluation des coûts liés au risque pour les besoins de l'assurance, ainsi que comme outil de planification de l'intervention en cas de catastrophe (cas d'urgence).

Les cartes de dangers seront établies en conformité avec les recommandations et directives des Offices Fédéraux avec prise en compte des mesures de protection actuelles (ouvrages et autres types de mesures). Elles seront établies sur la base de l'état actuel.

La méthodologie proposée par l'EPFL considérera la nécessité d'intégrer, dans un système informatique, l'ensemble des informations nécessaires à tous les utilisateurs potentiels. La démarche suivie par l'EPFL est résumée dans le document intitulé: "Proposition d'étude pour l'établissement d'une méthodologie de mise en œuvre des cartes de dangers naturels dans le canton de Vaud".

Les résultats de ce projet seront présentés dans trois documents, à savoir:

- un document d'analyse de la situation actuelle, il s'agit d'un document relatif à l'inventaire avec analyse et validation,
- un document lié au concept méthodologique et au SIG,
- une proposition de cahier des charges pour les bureaux d'études.

2.2 Problématique

Ce travail de diplôme s'inscrit dans le cadre de travail du projet CADANAV. Ce projet ayant pour but la mise en place d'une méthodologie de création des cartes de danger, il a été proposé de franchir une étape supplémentaire à l'occasion du présent travail pour s'intéresser à la mise en place de cartes de risques à l'aide d'un SIG (Système d'Information Géographique).

L'intérêt de se baser sur le projet CADANAV pour ce faire réside dans la possibilité de pouvoir utiliser un grand nombre de données ayant déjà été rassemblées et organisées, selon la méthodologie mise en place par le groupe de travail de l'EPFL. Il se pose alors naturellement une première question : **comment peut-on, en se basant sur les informations disponibles sur le danger et les zones menacées, développer une expression du risque ?**

En second lieu, on est amené à s'interroger sur la manière d'exprimer ce risque, que ce soit avec un degré qualitatif, une valeur numérique ou une représentation cartographique. L'objectif de ce travail est donc **d'élaborer un outil de qualification/quantification du risque naturel** à partir de cartes de danger (cf :2.3.2) et d'informations sur les zones menacées d'une zone témoin déterminée. Dans un souci de structuration méthodologique, on cherchera à utiliser au mieux les recommandations fédérales en la matière, telles qu'énoncées dans « *Risikoanalyse bei gravitaten Naturgefahren* » (BORTER P., 1999). On se basera notamment la définition proposée dans les chapitres concernant la quantification et l'analyse du risque.

Cependant, nous proposons, dans le cadre de cette problématique, de tenter de répondre au questionnement de départ par le biais de deux approches, chacune basée sur une définition du risque légèrement différente (cf. : méthodologie).

La première approche consistera à obtenir une représentation qualitative du risque par croisement entre deux éléments provenant de la méthodologie CADANAV, à savoir une expression du danger selon une échelle qualitative à trois valeurs et une typologie des objets du territoire, classés selon leur propension à subir des dégâts en cas d'occurrence d'un événement catastrophique (cf. : concepts). En fonction des caractéristiques des éléments (niveau de finesse) et de la méthode (robustesse) employés, on attend de cette approche un aspect synthétique ainsi qu'une certaine simplicité, ceci aussi bien au niveau de la mise en place que de la représentation.

La seconde approche proposera une expression du risque par le biais d'un indice chiffré, construit sur la base d'une expression du danger plus complète et d'une valeur (monétaire) attribuée aux objets. On attend de cette approche plus élaborée une expression plus concrète ainsi que davantage de spécificité.

L'utilisation de plusieurs approches se justifie par le fait que la question du risque est abordée par de nombreuses disciplines, qu'il n'existe par conséquent pas de définition univoque, et qu'ainsi la définition employée est directement liée aux besoins de la personne ou de l'organisme intéressé par l'évaluation du risque (état, assurances).

Il s'agira en dernier lieu d'**évaluer** la méthodologie employée en comparant les résultats obtenus grâce aux deux approches proposées, ceci dans le but de déterminer notamment quelle est leur utilité respective, à qui elles s'adressent (assurances, institutions), également si celles-ci sont concurrentes ou complémentaires en terme de cartographie du risque, ainsi qu'en terme d'échelle de représentation. Il s'agira par conséquent d'évaluer plus précisément les apports et limites de ces deux approches.

2.3 Définitions

Concepts :

Cette partie présente les principaux concepts utilisés au cours de l'étude et nécessaires à la bonne compréhension des méthodes employées. Nous avons déjà mentionné le terme de risque ainsi que celui de danger dans les parties précédentes. Nous allons maintenant les définir de manière générale, une définition plus précise étroitement liée au contexte de l'étude intervenant dans la partie « méthodologie ».

Le **risque** est parfois pris comme synonyme de **danger**, mais il implique également la possibilité qu'un danger se produise. Le danger est perçu comme un événement d'origine naturelle ou anthropique ayant le potentiel de provoquer des pertes au sens général ; les pertes provoquées pouvant entraîner des dangers résiduels. Le risque se définit comme l'exposition d'un élément ayant une valeur humaine et/ou matérielle et/ou environnementale à un danger. Il est souvent considéré comme le produit de la probabilité d'occurrence du danger et des pertes engendrées. Ainsi nous pouvons définir le **danger** comme étant une menace potentielle pour les humains et leurs biens (cause) et le **risque** comme la probabilité d'un danger se produisant et entraînant des pertes (conséquence). (Définitions basées sur SMITH K., 2001, p6).

Cette définition présente l'avantage de faire intervenir à la fois un aspect probabiliste, ainsi qu'une notion de perte. Par le terme « perte », on sous-entend la perte de biens (au sens large) ayant une certaine valeur (humaine ou matérielle). Ces deux éléments (probabilité et valeur) nous seront très utiles pour élaborer la méthodologie de quantification du risque.

Comme nous l'avons vu, le risque est lié au danger et le danger à une menace. Dans le cas qui nous intéresse, une menace est liée à la présence d'un **phénomène**. On peut introduire ici le phénomène comme étant un processus dangereux caractérisé par une géométrie et un mécanisme (naturel : inondation, avalanche, effondrement, etc..).

On considère qu'un phénomène se manifeste avec une certaine **intensité**, qui n'est autre que l'appréciation de l'ampleur d'un phénomène dangereux, spécifique (au niveau de l'expression et des unités) à chaque type de danger. Egalement, la manifestation d'un phénomène, à l'exception des phénomènes continus dont nous parlerons plus tard, est liée à une certaine périodicité. C'est la **probabilité d'occurrence** d'un événement d'intensité donnée au cours d'une période donnée. On utilise également le terme de **fréquence** ou de **reproductibilité**.

Le **temps de retour** T (en années) est lié mathématiquement à la probabilité d'occurrence par l'expression : $H = 1 - (1 - 1/T)^n$ où n est une période de référence donnée. Ainsi, un événement ayant un temps de retour de T a une chance sur T ($1/T =$ probabilité d'occurrence) de se produire au cours d'une année ($n = 1$). (CADANAV, 2002, Annexe 1).

Il semble important de rappeler que nous sommes ici dans le domaine des statistiques, et que nous parlons bien de probabilités et non de certitudes. Un temps de retour de 30 ans ne signifie pas que si un phénomène a eu lieu en 1970, il aura forcément lieu en 2000. Cela signifie simplement que les chances sont élevées (selon un seuil à fixer, qui dans la pratique tend vers mais n'égale jamais 1= événement certain) que le phénomène se reproduise dans les 30 ans suivant une manifestation donnée.

Nous voyons maintenant un peu plus clairement quelles sont les notions liées au phénomène en lui-même. Il nous reste à définir ce qui peut être menacé par le phénomène. On peut introduire ici la notion d'**élément à risque**, définie par une population, une propriété, une activité économique, un service public ou un bien environnemental situé dans un lieu exposé au danger, directement ou indirectement.

On considère que cet élément à risque présente une certaine **vulnérabilité** face au danger. Le concept de vulnérabilité, tout comme le danger et le risque, indique une condition future considérée comme possible. D'Ercole définit la vulnérabilité comme étant « la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique » (D'ERCOLE, 1994, p.87).

Cette définition combine l'évaluation du risque avec la relative incapacité à gérer l'occurrence d'un danger et ses conséquences. Il faut relever que bien que le concept de vulnérabilité se soit affiné au cours du temps, il n'existe toujours pas de définition totalement acceptable et dénuée de l'influence d'une discipline particulière. La vulnérabilité (humaine ou matérielle) est en effet généralement un agglomérat de plusieurs facteurs dont le choix est lié à l'approche et à la définition du risque employée. On peut donc retrouver le terme de vulnérabilité employé de manière fort différente d'une étude à l'autre.

Dans le cadre de CADANAV, la vulnérabilité a été définie par le « degré de perte (ou de dommage) causé par un phénomène dangereux d'intensité fixée à un ou plusieurs éléments à risque ». La vulnérabilité est donc ici représentée par un degré de destruction (allant de 0=aucun dommage à 1=totalement détruit) de l'unité spatiale considérée, et varie dans cette optique selon le type et l'intensité du phénomène, ainsi que selon le type d'élément à risque. (CADANAV, 2002, Annexe 1). Cette définition, où la vulnérabilité est ramenée à une expression simple, est bien adaptée à la définition formelle du risque que nous aborderons par après. Ceci notamment en raison du fait que selon cette définition, pour un élément à risque et un phénomène donné, on peut considérer la vulnérabilité comme étant proportionnelle de manière linéaire à l'intensité du phénomène. (Source : communication personnelle de J-M Lance).

Il convient encore dans cette partie de mentionner deux concepts importants, correspondant à des produits CADANAV, auquel il sera souvent fait référence au cours de ce travail. Il s'agit de la carte de danger et de la carte des catégories d'objets.

Pour ce qui est de la **carte de danger (Produit B4)**, elle consiste en un document de détail indiquant le niveau de danger sur la base d'un croisement entre la probabilité d'occurrence et l'intensité d'un phénomène observé et/ou potentiel. Les zones touchées par les dangers sont distinguées par trois degrés : « faible » (indiqué en jaune), « moyen » (en bleu) et « fort » (en rouge). L'élaboration des cartes de danger se fonde sur la documentation des événements, la carte des phénomènes (indiquant uniquement la présence d'un phénomène cf. : 4.3), le cadastre des mesures de protection (mentionnant la présence et décrivant les ouvrages de protection existants, par exemple les paravalanches) et, le cas échéant, sur d'autres documents de base. (CADANAV, 2002, annexe 1).

La **carte (ou cadastre) des catégories d'objet (produit A1)**, quant à elle, donne une représentation spatiale des biens et valeurs du territoire sur la base des objets à protéger (cf. : matrice des catégories d'objets, CADANAV, 2002, annexe 5) classés selon le niveau de leur propension à subir des dégâts en cas d'exposition à un danger (potentiel de dégât). Elle permet également d'élaborer des cartes de **buts de protection**, c'est-à-dire les intensités maximales des dangers naturels tolérables pour les objets, pour une probabilité d'occurrence donnée. Pour un objet donné, le **déficit de protection** se définit par l'écart entre le but de protection et le degré de danger constaté. (CADANAV, 2002, annexe 1).

2.4 Choix de la zone d'étude

2.4.1 Notion de priorisation

Le premier aspect du choix de la zone d'étude est le concept de priorisation des régions. Dans le cadre du projet CADANAV, une approche régionale a été choisie (découpage du canton de Vaud en 9 régions). Elle prévoit de sélectionner une zone prioritaire du périmètre considéré pour laquelle tous les types de dangers seront traités en parallèle par un consortium de bureaux d'étude.

Un découpage du canton reposant sur une approche « bassin versant » a été choisi sur la base d'une proposition du Service des Eaux sols et Assainissement (SESA). Pour identifier des régions prioritaires, la première étape consiste à établir des critères permettant de définir les zones de conflit potentiel entre les objets à protéger et les dangers naturels (processus de priorisation).

Les éléments de décision quant à la priorisation des régions sont établis sur la base d'un croisement d'une carte des catégories d'objets à protéger (cf. : Données- seulement catégories D à G considérées) et de cartes préliminaires de danger différentes pour chaque type de danger. A la suite de ce croisement, un classement des régions en fonction du nombre de pixels de catégories D à G exposées aux dangers naturels est établi.

Ce classement fait ressortir la présence de deux zones plus particulièrement menacées, à savoir les unités de bassins versant **Lavaux** et **Rhône**.

En fonction de l'avancée des travaux des bureaux d'étude et des données disponibles, il est choisi une zone test de 80 km² au sud de l'unité de bassins versants Rhône appelé bassin de l'« **Avançon** ». Cette zone test présente l'avantage de réunir de nombreux types de dangers différents dans un espace relativement réduit, de taille adaptée à l'étude entreprise sur le risque.

Elle présente également une large variété de situations géologiques, qui peuvent être synthétisés en 19 géotypes différents. De plus, son étendue verticale (de la plaine à la haute montagne) ainsi que sa diversité zonale (de l'espace urbain à l'espace inhabité) engendrent une variété de milieux naturels et anthropiques favorisant la richesse de l'information, tout en augmentant l'intérêt du traitement, de l'analyse et de la représentation de celle-ci.

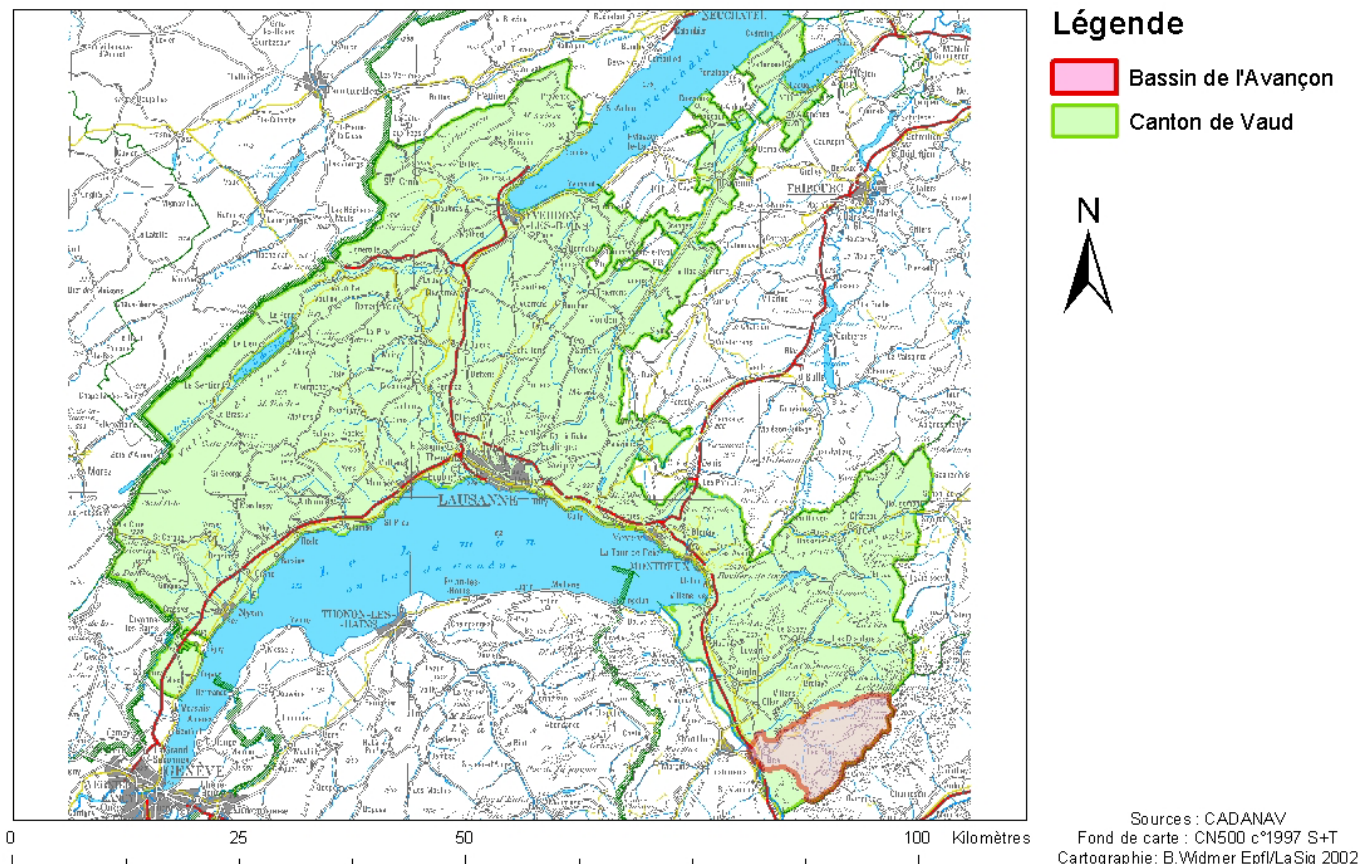


Figure 2 : Localisation du bassin de l'Avançon

Un secteur de la zone d'étude est choisi pour servir de zone-test à l'approche 2. Cette approche étant plus fine, la zone test se doit logiquement d'être plus petite (environ 1 km²) que la zone considérée dans l'approche 1. Ce secteur, compris dans le bassin de l'Avançon, est choisi selon la même philosophie que la zone d'étude, c'est-à-dire en fonction du ou des dangers considérés et de la diversité (zonale) qu'il présente (cf. Approche 2). On nomme cette zone test « **Le Bévieux** », selon le nom du village situé dessus.

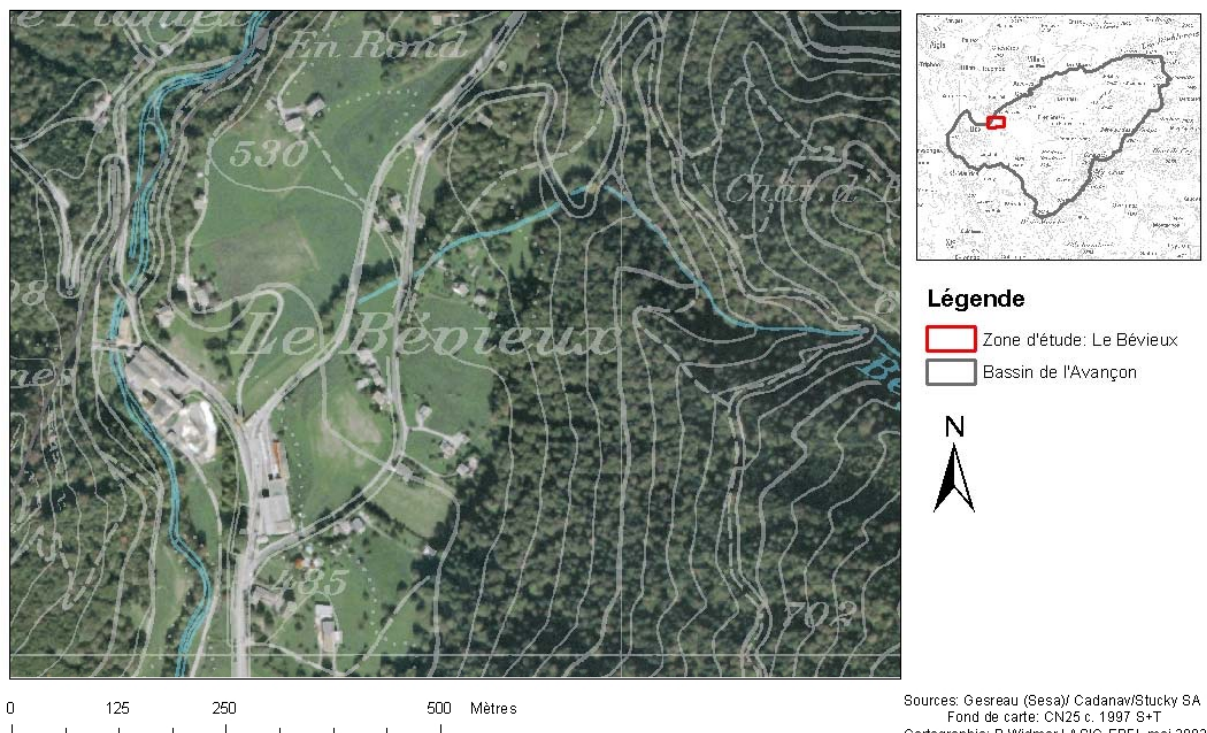


Figure 3 : Localisation de la zone-test « Le Bévieux »

2.4.2 Phénomènes intervenant dans la zone d'étude

Nous avons vu que le canton de Vaud était principalement menacé par les dangers liés aux inondations et aux glissements de terrain. Dans la zone d'étude considérée en premier lieu, à savoir le bassin de l'Avançon, ce sont ces deux phénomènes naturels, assortis du phénomène d'avalanche, qui sont en tête des manifestations.

L'importance prise ici par le phénomène d'avalanche, par rapport à son importance à l'échelle du canton, s'explique par la proportion de la zone d'étude située à une altitude autorisant des conditions d'enneigement propices à l'existence dudit phénomène. En conséquence, nous aborderons au cours de cette étude ces trois phénomènes, à savoir les inondations, les glissements de terrain et les avalanches. Le propos de cette partie est de présenter plus en détail ces phénomènes d'origine gravitaire, c'est à dire dont le déclenchement est lié à la force de gravité.

L'**inondation** est le plus courant de tous les dangers naturels. Les inondations provoquent chaque année au niveau mondial la mort de 20'000 personnes, tout en affectant environ 75 millions. La raison réside dans la corrélation entre les zones de haute densité de population et les plaines inondables ainsi que les zones côtières de faible altitude. Physiquement, une inondation provoquée par une rivière est un flux important d'eau dépassant le niveau des berges, naturelles ou artificielles.

Au-delà de cette définition générale, les types d'inondation sont nombreux. On peut parler d'inondations côtières, liées à la montée du niveau de la mer ou d'un lac, d'inondations éclair, associant pluies de très haute intensité et bassins versants à faible capacité de drainage, inondations de plaines alluviales, de faible intensité mais de longue durée, pour n'en citer que quelques-uns.

On peut encore considérer les laves torrentielles et autres coulées boueuses comme faisant partie de la catégorie des inondations, même si l'eau est ici associée à divers matériaux et le phénomène lié à des conditions d'érosion particulières.

On peut considérer que la Suisse est menacée par tous les types d'inondations énoncés ci-dessus, à l'exception des inondations dites « côtières ».

Les principaux facteurs (primaires et secondaires) liés au déclenchement d'une inondation sont les précipitations, la géométrie hydraulique du bassin versant et du cours d'eau, l'écoulement de surface, le taux d'infiltration (lié à l'utilisation des sols), l'écoulement souterrain, l'intensité de l'érosion, le taux d'urbanisation (surfaces imperméables), la présence d'ouvrages pouvant provoquer des obstructions ainsi que, suivant les régions, le taux de fonte de la masse neigeuse et les effets liés au permafrost.

Ces facteurs déterminent les caractéristiques clés d'une inondation, à savoir sa magnitude, la vitesse de montée des eaux, la vitesse du flux, la charge en sédiments de la rivière et la durée de l'événement.

Pour l'hydrologue, la meilleure expression de la magnitude de l'inondation réside dans le débit de pointe, alors que le danger potentiel est plutôt lié à la hauteur maximum atteinte par l'eau. (tiré de SMITH K., 2001, p.265-267 et Musy A., 1996, p.10).

La carte de danger d'inondation se base sur plusieurs scénarios vraisemblables, établis en fonction d'un ensemble de phénomènes déclencheurs, et ceci pour différents temps de retour. La carte des dangers représente la synthèse de données provenant de différents paramètres (CADANAV, 2002, annexe 7).

Dans le contexte vaudois et plus particulièrement le cadre du projet CADANAV, le choix exact de ces paramètres ainsi que la méthode permettant leur intégration dans le processus de modélisation et de cartographie sont des éléments actuellement indisponibles. On peut néanmoins penser que d'une manière générale, les hauteurs d'eau seront liées au temps de retour du phénomène (ces paramètres étant positivement associés), alors que l'intensité devrait être associée avec la vitesse de l'eau, étant donné que les dommages potentiels augmentent exponentiellement avec cette dernière.

Le terme « **glissement de terrain** » comprend la plupart des mouvements descendants déclenchés par la gravité de rochers ou de sols ayant été séparés de la partie sous-jacente de la pente par une zone de rupture ou une surface glissante. Ce type de mouvement, incluant la chute, le glissement et l'écoulement, dépend en grande partie de la nature de l'environnement géologique (résistance des matériaux, configuration de la pente, pression de l'eau souterraine et porosité des matériaux).

Le glissement de terrain étant, tout comme l'avalanches, lié directement à la présence de pente, ce sont évidemment en priorité les zones pentues qui sont menacées. Dans le cas Suisse, ce phénomène concerne principalement le jura, les préalpes et les alpes, soit potentiellement environ 70% du territoire.

On détermine l'intensité de glissement des zones instables référencées au moyen de la qualification d'activité, elle-même déterminée par la vitesse du glissement (généralement en cm/an). Le glissement de terrain étant en principe un phénomène continu dans le temps (les phénomènes de glissements subits et catastrophiques n'étant pas considérés dans cette catégorie), il ne peut pas lui être attribué de temps de retour, donc pas d'éléments probabilistes (CADANAV, 2002, annexe 10).

En conséquence, la carte des dangers est établie essentiellement sur la base de l'activité du glissement. Ceci dit, d'autres éléments, comme la profondeur du glissement par exemple, peuvent également être pris en compte. Relevons également l'importance de l'utilisation des géotypes, en ce qui concerne la prise en compte des particularités géologiques des pentes.

Une **avalanche** de neige résulte de la rupture de l'équilibre entre la tension (dépendant de l'angle de la pente et de la masse de la neige) et la force (dépendant de la cohésion interne et de la friction interne de la neige) sur un plan incliné (tiré de SMITH K., 2001, p.189-192). On reconnaît communément trois types d'avalanches : les avalanches de poudreuses, les avalanches de blocs et les avalanches de neige mouillée. Un mouvement d'avalanche se traduit par des charges de pression extrêmement élevées sur les structures (construction, habitat). On détermine donc l'intensité d'une avalanche en pression (N, kN) par unité de surface (cm², m²).

Pour ce qui est des temps de retour, on considère que ceux-ci sont liés aux hauteurs de cassure (zone de départ de l'avalanche).

L'établissement des cartes de danger d'avalanche se base sur les étapes suivantes :

- Etude des conditions climatiques locales (vent (direction, force), précipitations)
- Identification des types d'avalanches et hauteurs de cassure
- Intégration des ouvrages de protection
- Utilisation des modèles de calcul avec étude des paramètres intégrés
- Pondération des informations et appréciation des résultats

Selon la méthodologie recommandée par l'IFENA (cf. : 2.2) ayant cours en Suisse, on considère que chaque avalanche doit être traitée individuellement. Si la documentation est importante (cadastre avec de nombreuses avalanches), elle peut avoir plus de poids que la modélisation. A l'inverse, si la documentation de base est faible, le calcul numérique prend alors toute son importance. D'une manière générale, l'expérience du projeteur est déterminante lors de la pondération des informations et de l'appréciation des résultats. (CADANAV, 2002, annexe 9)

3 Méthodologie

3.1 Méthodologie générale

Approche 1 :

Cette méthode reprend dans un premier temps les étapes suivies dans le processus de priorisation (cf. Glossaire), c'est-à-dire la mise en relation de cartes préliminaires indiquant la présence probable d'un danger avec la carte des catégories d'objets (cf. :2.3.2), de manière à définir les zones à protéger prioritaires. Ce sont cependant les cartes de danger et non plus les cartes préliminaires qui sont utilisées comme données de départ. Ces cartes représentent le danger par le biais d'une échelle qualitative, comprenant 3 valeurs (faible, moyen, fort). Le degré de danger est obtenu par croisement des paramètres « intensité » et « probabilité d'occurrence » des phénomènes observés et/ou potentiels.

L'étape suivante consiste en une réflexion sur les procédures à mettre en place, les paramètres à prendre en compte, et l'impact de leur variation dans le contexte d'une représentation qualitative du risque. L'aspect essentiel de cette approche réside dans la mise en place de matrices permettant de croiser les degrés de danger et les catégories d'objets.

Au niveau de la démarche, la première étape consiste à produire des cartes de danger fictives en se basant sur les données disponibles, selon la méthode décrite au point 4.3. On se restreint à l'étude des phénomènes d'inondation, de glissement de terrain et d'avalanche. On met en place dans le SIG, pour chacun de ces phénomènes, une carte de danger en mode image (cf. : Techniques SIG).

L'étape suivante consiste à élaborer la carte des catégories d'objet dans le SIG, en se réservant la possibilité de retraiter les catégories en question, en considérant notamment la matrice des potentiels de dégât et des déficits de protection. Ceci effectué, on procède au croisement de ces deux informations (dangers et objets) au moyen d'outils d'analyse spatiale, afin d'obtenir les cartes de risques, ainsi que la carte des déficits de protection. Enfin, on procède à la création d'une carte synthétique de risque gravitaire et d'une carte synthétique des déficits de protection.

Il est prévu de considérer dans l'évaluation l'impact sur les résultats obtenus des modifications apportées, en ce qui concerne la matrice des catégories d'objets (en particulier choix des seuils d'acceptabilité) ainsi que les objectifs de protection, notamment la prise en compte des particularités liées au type d'objet (surfaciens, linéaires, ponctuels). Dans cette idée, on cherche à évaluer l'influence de l'utilisation de différentes matrices, ainsi que l'intérêt à accorder au type d'objet dans la méthodologie. On se pose également la question de l'intégration dans l'étude des risques liés aux effets secondaires (impacts environnementaux par exemple). Finalement, on procède à une réflexion sur la ou les échelles appropriées.

Au premier abord, les avantages de cette méthode sont une mise en place relativement rapide, dans la mesure où elle utilise directement le produit « carte de danger » selon CADANAV. L'approche propose également une expression du risque à la fois intuitivement compréhensible et aisément représentable graphiquement. Par contre, une analyse spécifique de l'intensité et de la probabilité d'occurrence n'est pas prévue dans cette approche.

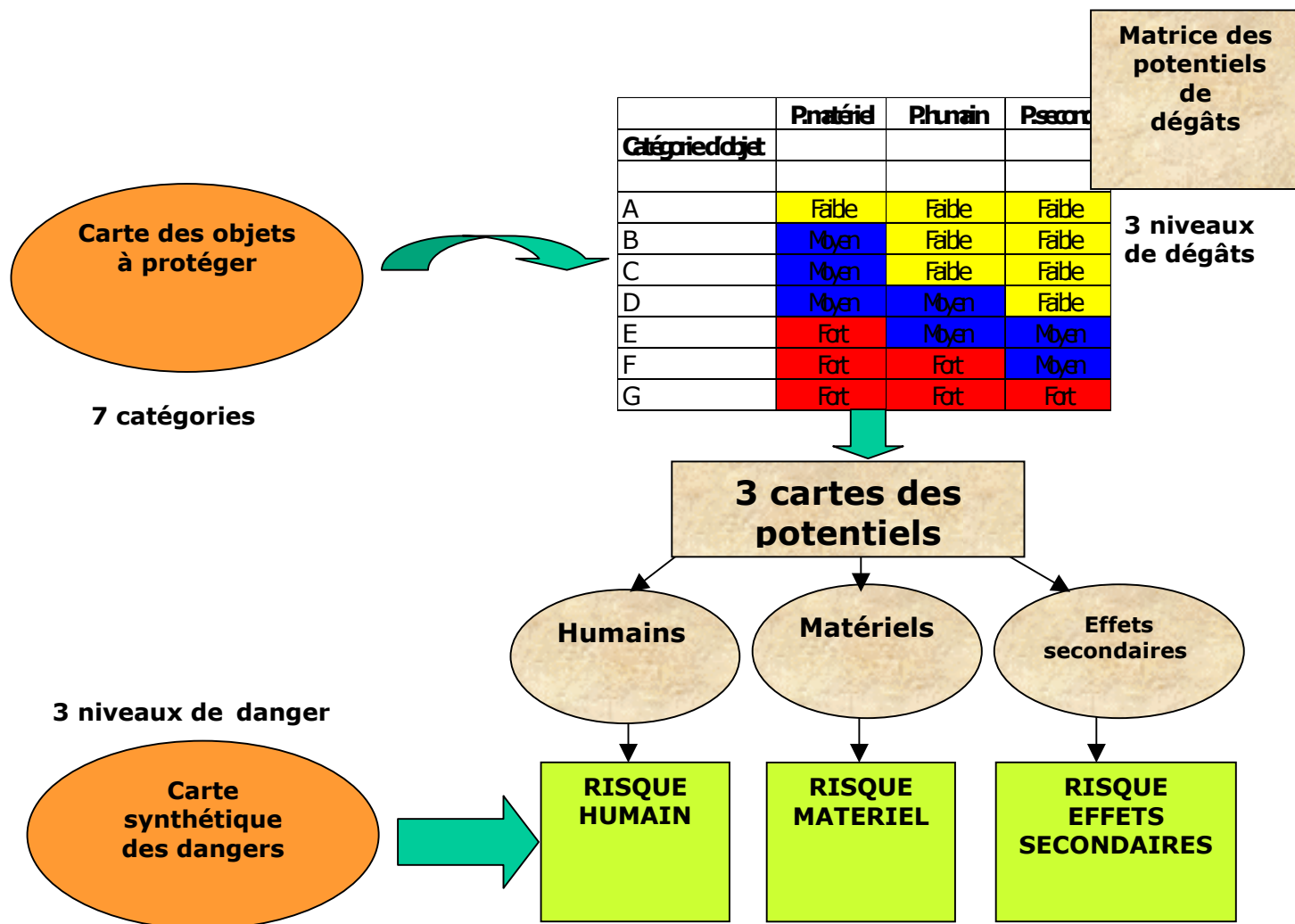


Figure 4: Schéma de l'approche n°1

Approche 2 :

La démarche est ici basée sur les étapes de quantification (degré 2) et d'analyse (degré 3) du risque selon le document « *Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren* » (BORTER P., 1999). Une réflexion supplémentaire est apportée au niveau de la représentation spatiale via le SIG.

Cette approche consiste en une quantification du risque, en francs pour les dégâts matériels et en nombre de victimes pour les personnes affectées. Elle définit le risque total R_t comme étant la somme du produit de la fréquence de la nuisance H , de la vulnérabilité V et de la valeur (matérielle ou humaine) par unité de surface W (cf. : méthodologie). L'objectif est d'obtenir un indice annuel de risque. Cette approche se distingue de la précédente par la production d'un résultat chiffré, ainsi que par sa situation en amont, d'un point de vue méthodologique, de la carte de danger en tant que produit CADANAV.

La première étape consiste en l'élaboration, pour un phénomène à choisir parmi les trois abordés, d'une carte de danger comprenant une représentation spatiale de la fréquence et de l'intensité du phénomène, sans agglomération au sein de la même échelle. Ensuite, on établit la méthodologie de quantification du risque sur le plan financier et humain, en considérant les trois seuils de temps de retour (30, 100, 300 ans) suggérés dans les recommandations fédérales.

On définit notamment dans cette partie les méthodes de calcul employées dans le SIG, ainsi que les seuils pour la vulnérabilité et la valeur par unité de surface. On se pose alors la question du choix des modes de représentation spatiale dans le SIG. Sur la base de ces réflexions, on procède à la représentation de l'indice de risque obtenu. On analyse alors le résultat, en intégrant à la discussion les questions relatives à la méthode de calcul et au choix des seuils. On se questionne également sur la manière de considérer dans cette approche le risque sur le plan humain ainsi que, comme précédemment, sur l'échelle de l'étude.

Au niveau des avantages, on peut remarquer que cette démarche considère séparément les variables intensité et fréquence, permettant ainsi d'obtenir des informations liées à l'une ou l'autre à n'importe quel moment de l'analyse. Egalement, la cartographie issue de cette seconde méthode devrait être plus représentative pour les acteurs politiques et économiques (par l'expression d'un coût annuel absolu ou réduit, par exemple). Par contre, cette approche nécessite davantage de données de base et notamment des données probablement difficiles à obtenir dans un contexte pratique. Egalement, le choix des seuils, nécessaire au calcul de l'indice, peut induire des variations non significatives pouvant poser problème ultérieurement.

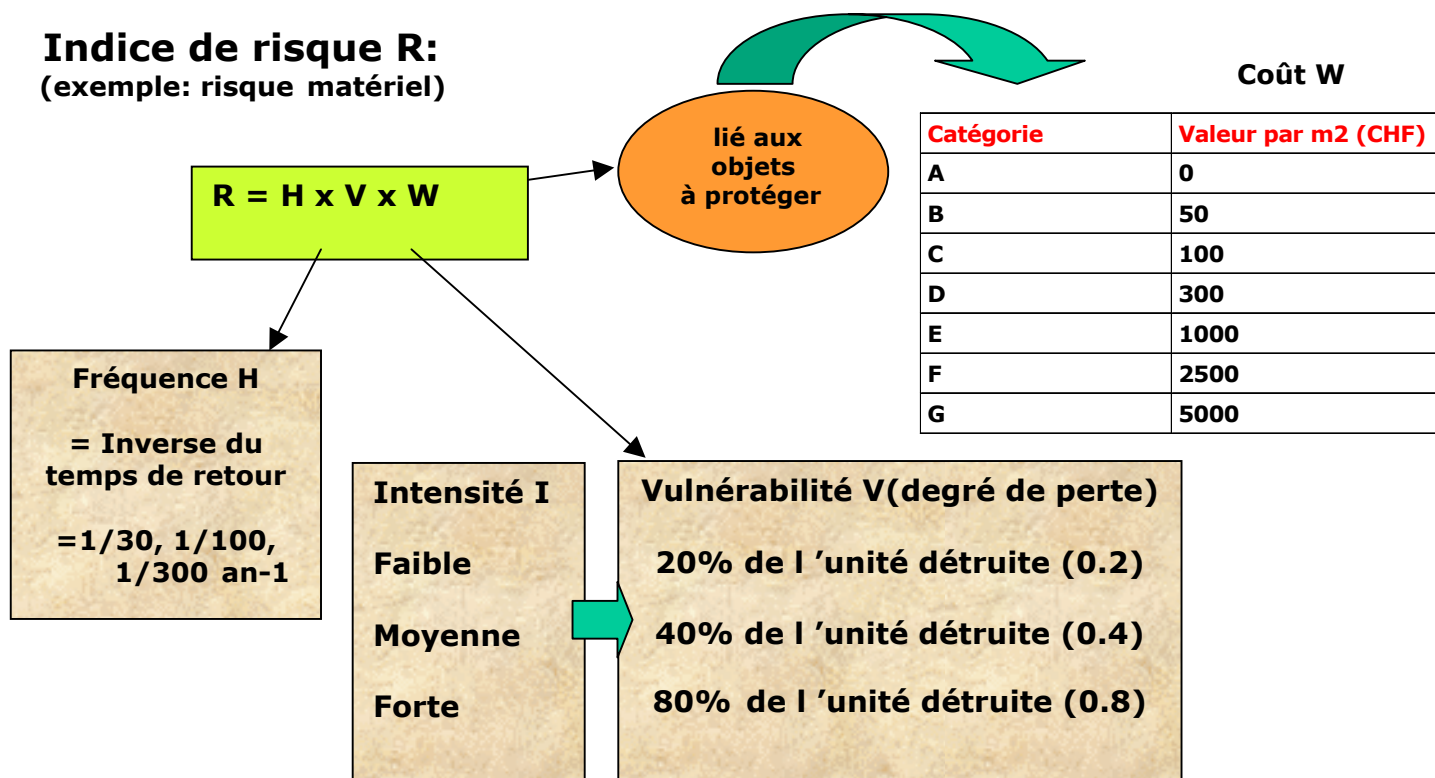


Figure 5 : Schéma de l'approche n°2

3.2 Méthodologie spécifique

Dans cette partie, nous allons expliquer les formules qui seront employées dans les deux approches. Ces dernières étant très proches d'un point de vue formel, elles sont toutes deux en rapport direct avec la même formulations du risque. Pour cette raison, cette partie sera tout d'abord commune aux deux approches, pour finalement exprimer les nuances les distinguant.

En premier lieu, mentionnons que les formules de base proposées sont tirées du rapport final CADANAV. Ce rapport se base toutefois relativement directement sur les formulations proposées par les recommandations fédérales. Dans ces dernières, notamment dans l'étape 2 de « Risikoanalyse » (analyse de risque) exposant la méthode de quantification du risque, on considère que le risque pour une période donnée est le produit de la fréquence de la menace **h**s (Schadenhäufigkeit) et de la dimension de la menace **S** (Schadenausmass).

Cette expression étant d'ordre général, les deux éléments la composant incluent chacun divers paramètres selon les cas particuliers considérés, comme nous le voyons dans le schéma suivant :

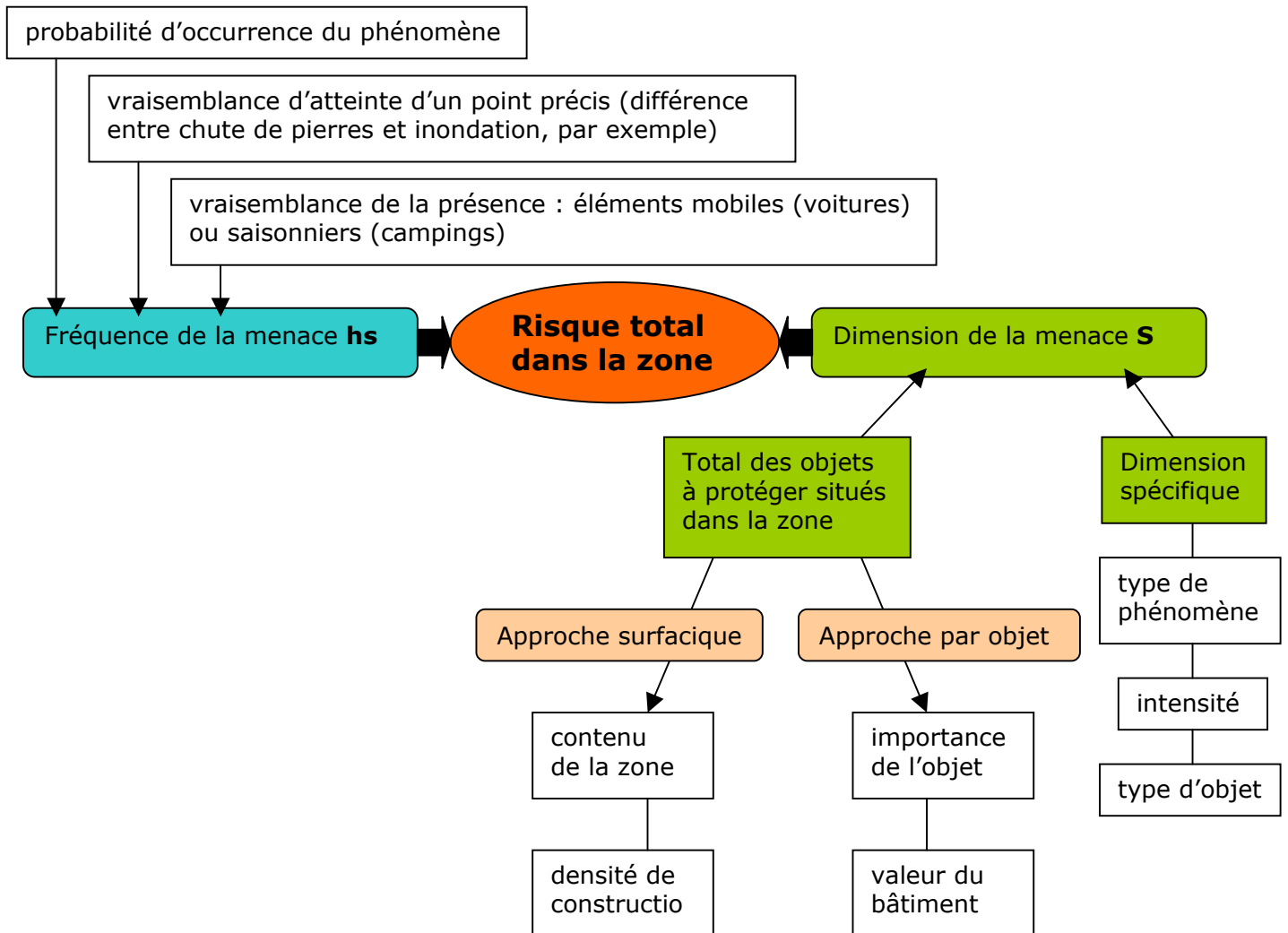


Figure 6 : **Schéma de prise en compte du risque matériel (BORTER P., 1999, p.41)**

Ce schéma, basé sur l'expression $r = hs * S$, présente certains éléments importants pour notre étude. Néanmoins, malgré les approches par objet et surfacique mentionnées, il n'est, tout comme les recommandations fédérales, pas orienté dans le sens d'une application SIG.

En effet, même si l'approche se veut globale et pouvant prendre en compte toute sorte de facteurs et de phénomènes, elle se réserve à une utilisation où l'on considère chaque objet ou construction individuellement, pour ensuite sommer les risques individuels.

Cette approche, dans laquelle on est amené à se pencher au cas par cas sur chaque objet pour évaluer à chaque fois le risque d'une certaine manière, semble trop lourde et trop complexe pour permettre directement une application dans un SIG. En conséquence, nous nous baserons sur les formules suivantes, exposées dans le rapport CADANAV, qui utilisent des versions simplifiées des paramètres h_s et S , dans le but de rendre leur utilisation SIG possible. On considère :

Risque spécifique R_s : Degré de perte supposé causé par un phénomène dangereux d'intensité fixée à un élément à risque pour une période donnée. Il est exprimé en terme de probabilité annuelle.

$R_s = H \times V$ avec : H = probabilité d'occurrence
 V = vulnérabilité (degré de dommage engendré par un danger)

Risque total R_t : Espérance mathématique de pertes en vie humaines, blessés, dommages aux biens et à l'activité économique causée par un phénomène naturel particulier. Il est exprimé soit en terme de nombre d'unités exposées (risque humain), soit en termes financiers (risque matériel).

$R_t = \Sigma (H \times W \times V)$ avec : H = probabilité d'occurrence
 V = vulnérabilité
 W = nombre de vies ou valeur des biens soumis au danger (« valeur » par unité de surface)

(définitions : Rapport provisoire CADANAV 15.3.2002)

On remarque que le paramètre h_s est réduit à la probabilité d'occurrence H , et que la dimension de la menace S devient le « dommage potentiel WI », résultat du produit $V \times W$. Nous reviendrons sur ce dernier terme par après.

Avant de formuler individuellement sur la base de ces expressions les deux approches abordées dans cette, il convient d'expliquer plus en détail le concept de carte de danger proposé par les recommandations fédérales et réalisé dans CADANAV.

Sur ces cartes de danger, le danger est représenté par un degré **D** comportant une échelle qualitative à trois classes : faible (jaune), moyen (bleu) et fort (rouge). Cette échelle comprend, comme vu précédemment, l'intensité du phénomène (**I**) et la reproductibilité du phénomène, c'est-à-dire la probabilité d'occurrence (fréquence) (**H**). Il faut relever que **D** n'est pas représenté par une valeur numérique et n'est pas le résultat d'un simple produit.

La réalisation des cartes de danger est confiée par CADANAV aux bureaux d'étude. Pour ce faire, la méthodologie mentionnée propose de fixer pour chaque phénomène des valeurs seuils permettant de répartir l'intensité (les unités changeant pour chaque phénomène) et la fréquence en trois classes qualitatives (faible, moyenne, élevée).

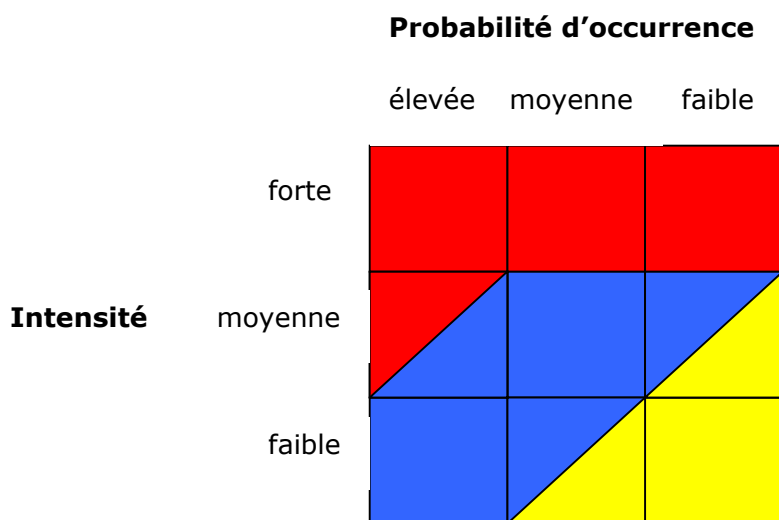


Diagramme intensité-probabilité indiquant les degrés de danger

Figure 7 :Diagramme probabilité-intensité indiquant les degrés de danger

Une matrice est alors proposée, comportant théoriquement 9 cellules (1 cellule par couple intensité - fréquence) mais mentionnant pour certaines cellules 2 possibilités de degré de danger. Cette méthode laisse donc une certaine latitude dans la détermination des degrés de danger. Ce dernier est donc bien une donnée qualitative subordonnée dans certains cas au choix de la personne réalisant la carte, même si dans la pratique et bien que cela ne soit mentionné nulle part, c'est le degré de danger le plus discriminant qui est choisi (Source : communication personnelle de R. Metzger).

Le degré de danger n'est toutefois en aucun cas absolu et reste par conséquent discutable.

La différence essentielle entre les deux approches abordée réside dans le fait que ce degré de danger est considéré comme donnée de base dans la première alors qu'il est traité de façon explicite, avec des unités déterminées, dans la seconde. Ce traitement explicite est possible grâce à la linéarité de la relation entre l'intensité I et la vulnérabilité V telles que nous les avons définies précédemment. De cette manière, le degré de danger D devient proportionnel au risque spécifique R_s , grâce à $R_s = H \times V$ et $D = H \times I$. Relevons toutefois que l'expression $D = H \times I$ est simplificatrice et est essentiellement destinée à la compréhension, dans la mesure où le degré de danger D ne possède pas d'unités.

Formulation de l'approche n°1: Pour obtenir une représentation qualitative du risque, nous nous basons sur les données disponibles dans CADANAV. Ces données comprennent une matrice représentant le potentiel de dégât (en vies humaines, au niveau matériel et au niveau des effets secondaires) que nous nommerons P (Ph, Pm et Ps). Le potentiel de dégât est une échelle qualitative à trois classes (Faible, Moyen, Fort), basée sur les catégories d'objet. De plus, de ces données et notamment des cartes préliminaires est déduit un degré de danger fictif $D = H \times I$. L'expression du risque est obtenue en procédant à une opération entre le degré de danger D et le potentiel de dégât P.

Notre expression qualitative du risque se définit donc ainsi : **$Rq = D \times P$**

Avec : Rq humain = $D \times Ph$, Rq matériel = $D \times Pm$ et
 Rq effets secondaires = $D \times Ps$

Cette expression peut s'exprimer sous la forme d'une matrice à 9 cellules. Deux variantes sont testées, dans lesquelles un reclassement des cellules est effectué de manière à obtenir une échelle qualitative de niveau de risque comportant respectivement 6 et 5 classes. Ces classifications indiquent un niveau de risque allant de Faible à Fort. Cette formulation est la base de travail de l'approche n°1.

Formulation de l'approche n°2: Pour obtenir une représentation du risque en termes financier, nous nous basons sur les données CADANAV. On attribue des données d'intensité I et de fréquence H fictives, se rapportant à un phénomène pour une zone d'étude donnée.

On élabore une matrice permettant de déduire la vulnérabilité V à partir de l'intensité I, ainsi qu'une matrice comportant la valeur par unité de surface W. L'expression du risque provient du produit entre la fréquence H, la vulnérabilité V et la valeur par unité de surface W.

Notre expression en termes financiers du risque se définit ainsi :

$$Rf = H \times V \times W$$

Le nombre de valeurs possibles prises par Rf dépend du choix des seuils et du nombre de classes pour chacune des données. Egalement, le choix de ces seuils qui sera discuté ultérieurement influe sur la linéarité de Rf. Cette formulation sert de base de travail à l'approche n°2.

Remarques :

La catégorisation des objets à protéger (catégorie A à G) peut être assimilée à une représentation qualitative de la valeur d'un élément à risque W. L'échelle « potentiel de dégât » est une reclassification sur la base de cette catégorisation. On peut rapprocher le terme de « potentiel de dégât » du terme de « dommage potentiel WI », mais ceci sans omettre une différence conceptuelle essentielle : Le dommage potentiel WI se définit par l'expression suivante : **$WI = W \times V$** . Ainsi, toujours grâce à la relation entre V et I, on considère que le dommage potentiel intègre la question de l'intensité du phénomène, ce qui n'est pas le cas du potentiel de dégât.

La vulnérabilité V est le degré de perte causé par un phénomène dangereux d'intensité fixée, autrement dit, la vulnérabilité change si l'intensité du phénomène varie. Le potentiel de dégât P , lui, ne change pas si l'intensité du phénomène varie.

La définition couramment employée du risque, à savoir : $\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité}$, n'est pas employée sous cette forme dans l'étude, le terme d'aléa (ici un phénomène d'intensité et de temps de retour donné) étant jugé trop vague. De plus, la définition de la vulnérabilité employée dans l'expression ci-dessus n'est pas compatible avec les expressions proposées dans cette partie (On assimile en quelque sorte la vulnérabilité au dommage potentiel WI , ce qui change notamment fortement la relation entre la vulnérabilité et l'intensité).

Pour ce qui est de l'approche n°2, nous reviendrons sur la question de l'indice de risque sur le plan humain ultérieurement.

3.3 Techniques S.I.G

3.3.1 Problématique

La plupart des problématiques du développement durable, dont font partie les problématiques liées aux dangers naturels sont multidisciplinaires ou multi-sectorielles : elles supposent des interactions entre des buts contradictoires de différents secteurs ou domaines d'étude.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) peuvent aider à établir cette approche multi-sectorielle, en fournissant non seulement des outils très puissants d'analyse de données spatiales et statistiques, mais également en autorisant l'intégration de bases de données de différents secteurs (par exemple : hydrologie, aménagement du territoire, études statistiques) au sein d'un même référentiel géographique. L'emploi d'un SIG dans le cadre d'une problématique sur les dangers naturels se justifie donc par les possibilités offertes en matière d'intégration, d'analyse et de représentation spatiale des thématiques abordées.

Dans le cas présent, la majeure partie de la problématique SIG consiste à la mise en relation des objets spatiaux et des dangers naturels, et ceci au niveau de leur localisation et de leur caractéristiques respectives (surfaces d'affectation, type d'infrastructures, etc.. pour les objets spatiaux ; intensité, temps de retour, etc.. pour les dangers naturels : cf. : données). Ces objets spatiaux et phénomènes existent dans le logiciel SIG sous la forme de fichiers **rasters** et de fichiers **vecteurs** (cf. : glossaire).

Dans le mode **raster**, les unités d'observation sont les éléments d'une trame (pixels) constituant une maille régulière. Les caractéristiques du territoire sont décrites par des valeurs associées à chaque pixel. La précision de la modélisation est limitée par la résolution de la trame.

Le mode raster est bien adapté aux applications qui utilisent des données dérivées des photographies et des images satellites, et de manière plus générale à la représentation des variables continues. La modification partielle d'une image raster est toutefois difficile ; ce mode ne se prête guère à des applications dans lesquelles une mise à jour en continu est nécessaire. Par contre, les recouvrements géométriques de surfaces sont très aisés à réaliser (croisements, opérations sur les rasters). De nombreuses applications pour lesquelles les performances et la flexibilité des analyses géographiques sont déterminantes, utilisent le mode raster.

Dans le mode **vecteur**, les unités d'observation sont représentées par des entités élémentaires : points, lignes, surfaces. Des caractéristiques descriptives peuvent leur être associées sous forme d'attributs, généralement gérées dans une base de données associée. Des relations entre les entités géométriques élémentaires peuvent aussi permettre la gestion explicite des relations de voisinage (topologie). Bien adapté à la modélisation d'objets artificiels, tels que les bâtiments et les canalisations, et à la modélisation d'entités juridiques, telles que les parcelles, il s'impose tout naturellement pour la gestion du cadastre et des infrastructures.

L'intérêt du fichier vecteur par rapport au raster est évidemment lié à la quantité d'information pouvant être rattachée à chaque objet (pour autant que la gestion des tables de données le permette).

Mentionnons également les possibilités d'édition de ce type de fichiers (création ou modification de polygones, importation de données).

3.3.2 Techniques spécifiques à l'étude

Le logiciel SIG employé dans la présente étude est le logiciel **Arc View 8.1** d'ESRI, ceci en raison du format des données de base et du type de traitement effectué. Selon la méthodologie vue précédemment, la partie centrale de la présente étude au niveau SIG consiste au croisement de différents fichiers. Ceci est effectué en mode raster, au moyen de l'extension « **raster calculator** », et selon différents principes. Le chapitre suivant décrit en détail l'obtention des différentes cartes de danger employées, ainsi que l'obtention du fichier comportant les objets à protéger. Toutes les opérations de croisement entre couches étant effectuées en mode raster, on élabore une version raster de chacune des couches nécessaire, ceci avec différentes tailles de pixel suivant les besoins (5 mètres et 25 mètres), au moyen de la fonction « **raster calculator/convert** ». L'utilisation systématique du raster se justifie d'un point de vue méthodologique par le fait que les croisements à effectuer sont fort nombreux et que le croisement de fichiers vecteurs est une opération généralement complexe, et ceci notamment en raison de la structure des tables. Les principales opérations effectuées sur les rasters sont la reclassification « reclass », l'addition et le produit.

La **reclassification** consiste à attribuer de nouvelles valeurs aux anciennes valeurs de pixels. Elle permet par exemple d'attribuer la même valeur à des pixels possédant précédemment des valeurs différentes, ou encore d'attribuer une absence de donnée (**no data**) à une valeur de pixel qu'on ne souhaite pas afficher.

L'**addition** de rasters permet d'additionner la valeur de pixels provenant de couches différentes. Associée à la reclassification, elle permet également de savoir, lorsque l'on combine plusieurs couches, quelle est la valeur de pixel la plus élevée en un point et à quelle couche elle appartient. Par exemple, si l'on additionne plusieurs couches correspondant à la même zone dont les pixels peuvent prendre les mêmes valeurs (1,2,3,4) et que l'on veut combiner quatre de ces couches, on utilise les valeurs de la première telles quelles, on multiplie celles de la seconde par 10 (10,20,30,40), celles de la troisième par 100 et celles de la quatrième par 1000. On sait ainsi, lorsque l'on additionne les quatre couches, quelle est la valeur maximale (ou minimale) en un point et à quelle couche elle appartient. Ceci est particulièrement utile, comme nous le verrons plus tard, dans l'élaboration de matrices.

Le **produit** raster consiste à multiplier la valeur de pixels provenant de couches différentes. Il est utilisé dans l'approche n°1 tout comme dans l'approche n°2 (cf. : formule de l'indice de risque). Il faut relever que par rapport à l'addition, lorsque l'on multiplie les valeurs de pixels de deux couches dont les pixels peuvent prendre les mêmes valeurs, le résultat est forcément symétrique (2×3 est égal à 3×2). Ceci n'a pas d'importance lorsque l'on cherche à obtenir une valeur numérique finale, mais en a lorsque l'on élabore une matrice.

4 Données SIG

4.1 Modèle conceptuel de données (MCD)

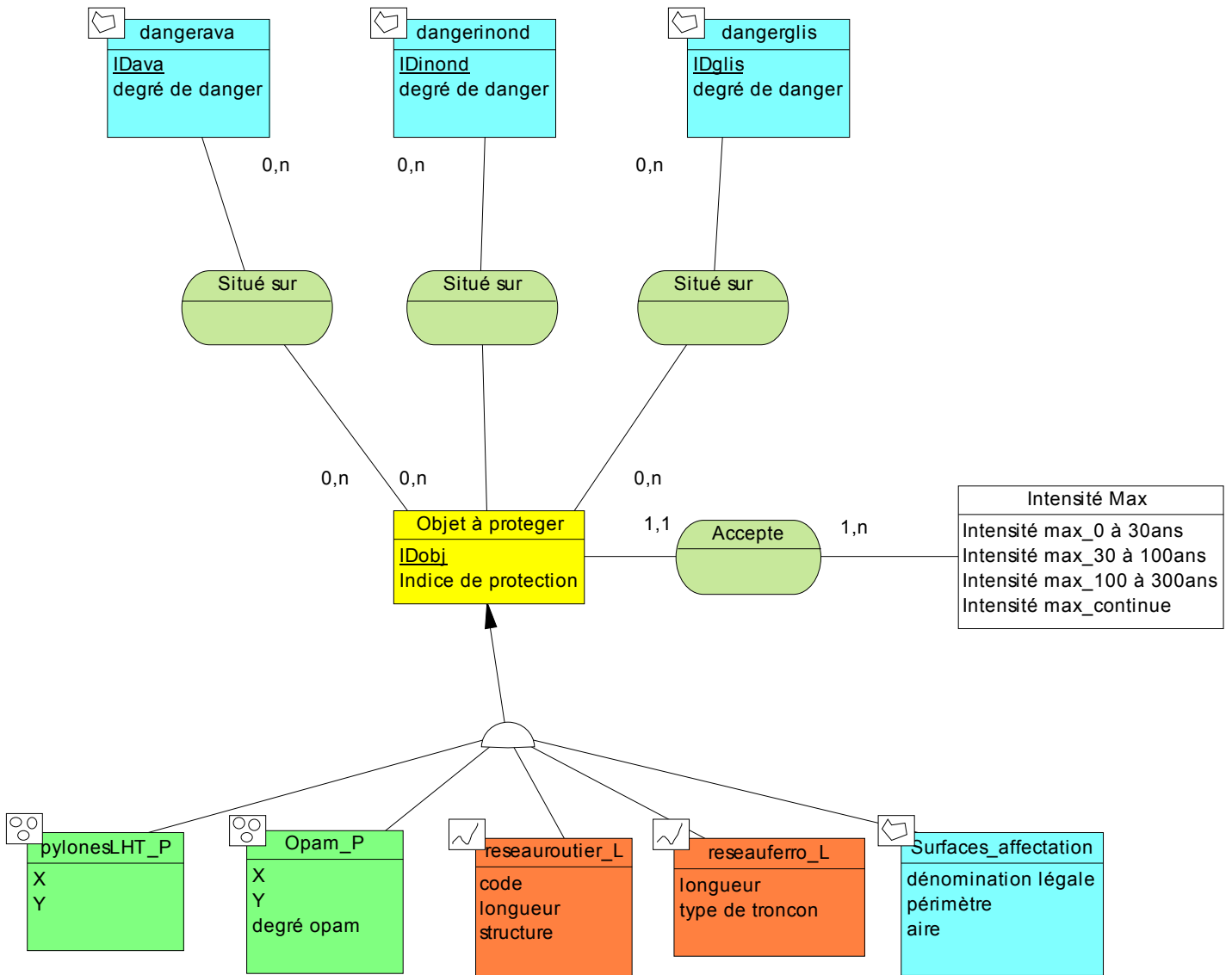


Figure 8 : Modèle conceptuel de données

4.2 Description du MCD

Le modèle conceptuel de données, réalisé avec Power AMC de Sybase, constitue la pièce centrale de l'organisation des données utilisées dans ce travail. Ces données sont réparties ici en deux catégories, l'une concernant les **dangers**, l'autre concernant les **objets**.

Les données sur les **dangers** comprennent les entités **dangerglis**, **dangerava** et **dangerinond** représentant respectivement les cartes de danger des glissements, avalanches et inondations. Les attributs sont un identifiant par polygone (en mode vecteur), ainsi que le degré de danger (de1 à 3). Les données concernant les **objets** comprennent en premier lieu 5 entités, représentant chacune un type d'objet avec ses caractéristiques spécifiques.

Ces entités sont :

pylonesLHT_P : C'est un fichier de points représentant la position des pylônes de lignes à haute tension. Les attributs du fichier sont le X et le Y définissant la position de l'objet.

Opam_P : Il s'agit d'un fichier de points contenant la position des objets Opam (cf : glossaire) ainsi qu'un degré spécifique à 4 niveaux indiquant la classe à laquelle l'objet appartient. Plus ce degré est élevé, plus la zone sur laquelle l'objet peut exercer une influence est importante (contamination chimique, par exemple). Ce degré permet ainsi de créer des buffers pour l'analyse spatiale. Les attributs sont le X, le Y ainsi que le degré Opam.

reseauroutier_L : C'est un fichier de lignes représentant le réseau routier de la zone concernée. Les attributs sont le code (dénomination de la route), la longueur du tronçon, ainsi que la présence d'ouvrages particuliers (ponts, tunnels).

reseauferro_L : Il s'agit d'un fichier-ligne représentant le réseau ferroviaire. Les attributs sont ici la longueur et le type de tronçon.

Surfaces_affectation : Celui-ci est un fichier de polygones comprenant les surfaces d'affectation du bassin de l'Avançon et mentionnant la dénomination légale de ces surfaces. Ce dernier champ comprend de nombreuses classes indiquant précisément ce que chaque parcelle est censée contenir. Il peut servir de référence en cas de redéfinition des catégories d'objet, par exemple. Les attributs sont la dénomination légale, le périmètre et l'aire de la parcelle.

Ces fichiers comportant les données spécifiques aux objets sont tous rattachés au fichier **Objet à protéger**, ce fichier effectuant le lien entre l'objet et l'indice de protection lui correspondant. Les attributs de ce fichier sont un identifiant unique (IDobj) et un indice de protection (A à G) par objet. Ces attributs sont communs à tous les objets et leur intégration dans le fichier **Objet à protéger** est destinée à éviter la redondance d'information et des tables trop lourdes à gérer.

Au niveau des **liens** entre les entités, nous avons en premier lieu celui que nous venons de présenter, à savoir le lien entre le fichier Objets à protéger et les 5 fichiers objets lui étant rattaché. Nous avons ensuite le lien fondamental de ce modèle reliant les objets et les dangers. Chaque objet (Objet à protéger) est **situé sur** une zone possédant ou non un degré de danger d'avalanche, d'inondation ou de glissement de terrain (dangerava, dangerinond, dangergliss). Une même zone ne peut avoir qu'un seul degré par danger, mais peut comporter plusieurs dangers. Lorsque qu'aucun degré de danger n'est attribué à une zone donnée, on considère le danger comme étant nul.

Dans le modèle présenté, le fichier Objet à protéger est associé à une matrice (**Intensité Max**) basée sur les catégories d'objet indiquant le niveau maximum d'intensité d'un phénomène tolérable par l'objet, et ceci pour différents temps de retour. On considère que l'objet, selon sa catégorie (A à G), **accepte** une et une seule intensité maximum pour un temps de retour donné, les seuils étant 30 ans, 100ans, 300ans et une échelle continue (pas de temps de retour spécifique considéré). Une même intensité maximum peut correspondre à plusieurs objets.

Cette matrice, présupposant en chaque point la connaissance du niveau d'intensité et du temps de retour du ou des phénomènes considérés, est donnée à titre d'exemple. Elle constitue une piste proposée par CADANAV en matière d'évaluation du risque. Dans le cadre de l'étude, elle n'est utile que pour déterminer les objectifs et déficits de protection (cf. : définitions), en utilisant l'échelle continue et le degré de danger à la place de l'intensité. Cette procédure étant relativement sommaire, elle sera abordée par après de façon succincte et à titre de comparaison dans l'évaluation de la première approche.

Cependant, un lien similaire peut être établi entre le fichier **Objet à protéger** et la **matrice des potentiels de dégât**, en utilisant le terme de « présente » au lieu d'« accepte », et en considérant que chaque objet « présente » un et un seul potentiel de dégât pour chaque type de potentiel considéré (humain, matériel et effets secondaires).

Ce dernier aspect se rapporte plus particulièrement à l'approche 1. En ce qui concerne l'approche 2, la matrice des potentiel de dégât est remplacée par un **tableau de correspondance** entre les catégories d'objets et la valeur par unité de surface W (dégâts matériels), en considérant que chaque catégorie correspond à une certaine valeur par unité de surface. Egalement dans le cadre de cette approche, il est prévu que les fichiers concernant les danger comprennent, en lieu et place de l'attribut « degré de danger », deux attributs indiquant respectivement l'intensité I et la fréquence H (constitutifs du degré de danger dans l'approche 1, cf. méthodologie).

Remarques :

Les liens entre le fichier « Objet à protéger » et les fichiers concernant les dangers (cartes de danger) n'ont pas été unifiés, de façon à permettre ultérieurement une interrogation par type de danger. Il existe donc un lien par carte de danger.

Les métadonnées concernant les fichiers employés sont disponibles en annexe.

4.3 Cartes de danger

Cette partie comprend la description des procédés permettant d'obtenir des cartes de dangers fictives à partir des données disponibles dans CADANAV, pour les trois dangers considérés, à savoir les avalanches, les glissements de terrain et les inondations (cf. : glossaire). Il est mentionné, pour chaque danger, les couches utilisées ainsi que la méthode d'élaboration de la carte.

4.3.1 Obtention des cartes de danger : Avalanches

Couches utilisées

-slope25 (dérivé du mna25, se trouve dans « mna »). Slope 25 est une couche basée sur le modèle numérique d'altitude à maille de 25 mètres (cf. : 5.2.3) représentant **la pente**.

-Avalanches (se trouve dans « cadastre des évènements », dans « produits »). Cette couche correspond à la carte préliminaire de danger avalanche, indiquant la localisation des zones d'avalanches.

-zone_affectation.shp (se trouve dans « données thématiques ») Cette couche indique l'affectation des parcelles de la zone d'étude. Dans le cas présent, cette couche fait l'objet d'un reclassement pour mettre en valeur les zones de forêt.

Méthode

On considère qu'une avalanche représente un danger d'autant plus grand que la pente est importante (déclenchement facilité) et que la couverture végétale est faible (l'avalanche se déclenche plus facilement, tout en étant moins freinée). On considère également que les avalanches vont être plus fréquentes dans les zones pentues (entre 30 et 45°) et exposées (intensité en relation positive avec la fréquence). En conséquence, les trois valeurs d'intensité (faible, moyen, fort) ont été choisies comme suit.

Le degré de danger est considéré comme :

-faible : si la zone d'avalanche est située sur une pente faible à moyenne (moins de 30°) et qu'il y a présence d'une forêt.

-moyen : si la zone d'avalanche est située sur une pente faible à moyenne (moins de 30°) mais qu'il n'y a pas de couverture végétale.

-fort : si la zone d'avalanche est située sur une pente forte (plus de 30°) et qu'il n'y a pas de couverture végétale.

(Seuils basés sur SMITH K., 2001, p.182)

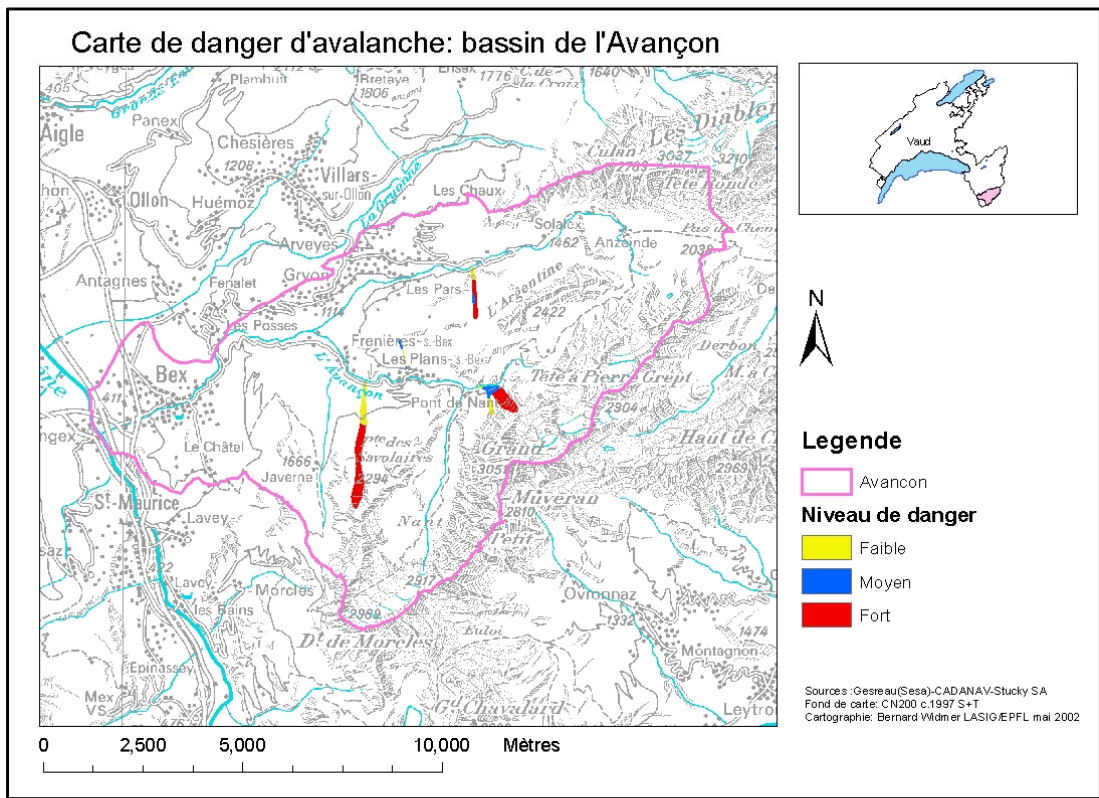
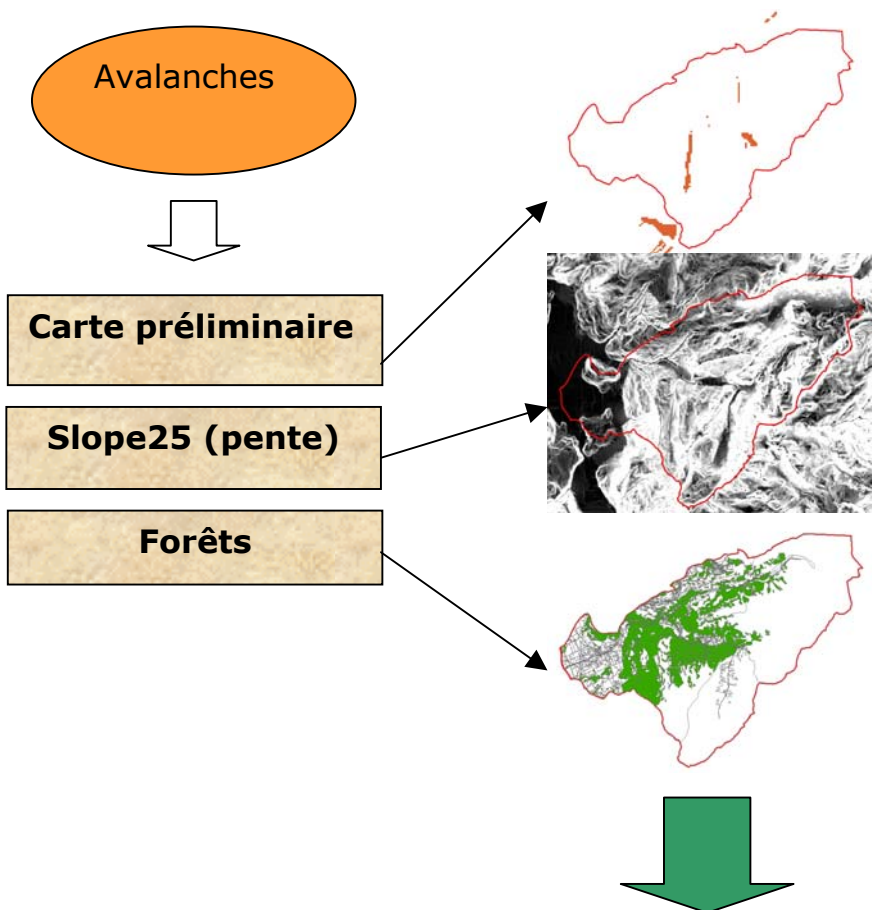


Figure 9 : Schéma d'obtention et carte de danger d'avalanche

4.3.2 Obtention des cartes de danger : Inondations

Couches utilisées

-**prelim inond** (se trouve dans « Avançon » dans « Zones »). Cette couche, appelée carte préliminaire, donne une enveloppe de part et d'autre d'un cours d'eau, correspondant à l'emprise maximale d'un débordement généralisé. (CADANAV, 2002, p.13)

-**carte indicative des dangers** (carte fournie par le bureau d'étude Stucky SA) Cette couche indique la localisation des zones inondables, c'est-à-dire les zones où la présence du danger d'inondation est effective.

-**mna25** (se trouve dans « mna ») Cette couche correspond au modèle numérique d'altitude à maille de 25 mètres, mentionnant une unique valeur d'altitude par carré de 25 mètres de côté pour la zone concernée.

Méthode

On prend comme base de travail la couche **prelim inond** Cette couche donne une enveloppe de part et d'autre d'un cours d'eau, correspondant à l'emprise maximale d'un débordement généralisé, déterminée grâce à un algorithme lié au mna25. A cette zone est ajoutée une correction pour les zones dite de plaine alluviale, où le manque de sensibilité du mna ne permet pas d'obtenir un résultat satisfaisant. Au final, cette couche représente la zone où le danger d'inondation est considéré comme **probable**. Ayant également à disposition la **carte indicative** des dangers, une comparaison entre les deux cartes est effectuée.

Il en ressort que les deux zones délimitées ne sont pas les mêmes, la carte **prelim inond** désignant une zone beaucoup plus importante, mais sans que la carte indicative y soit incluse. La carte indicative étant la dernière étape avant la réalisation de la carte de danger réelle, elle est considérée comme étant plus fiable que la carte préliminaire.

En conséquence, le degré de danger est considéré comme :

-**Faible** : si la zone est désignée seulement par la carte préliminaire.

-**Moyen** : si la zone est désignée seulement par la carte indicative provenant du bureau d'étude Stucky SA.

-**Fort** : si la zone est désignée par les deux cartes.

Une correction est également effectuée manuellement sur les zones de la carte préliminaire définies par l'algorithme « plaine alluviale ». Certaines de ces zones débordent en effet sur des coteaux dont l'altitude et la situation hydrologique ne suggèrent pas de danger au niveau inondation, leur désignation pouvant probablement être attribuée au manque de finesse de la maille du mna25.

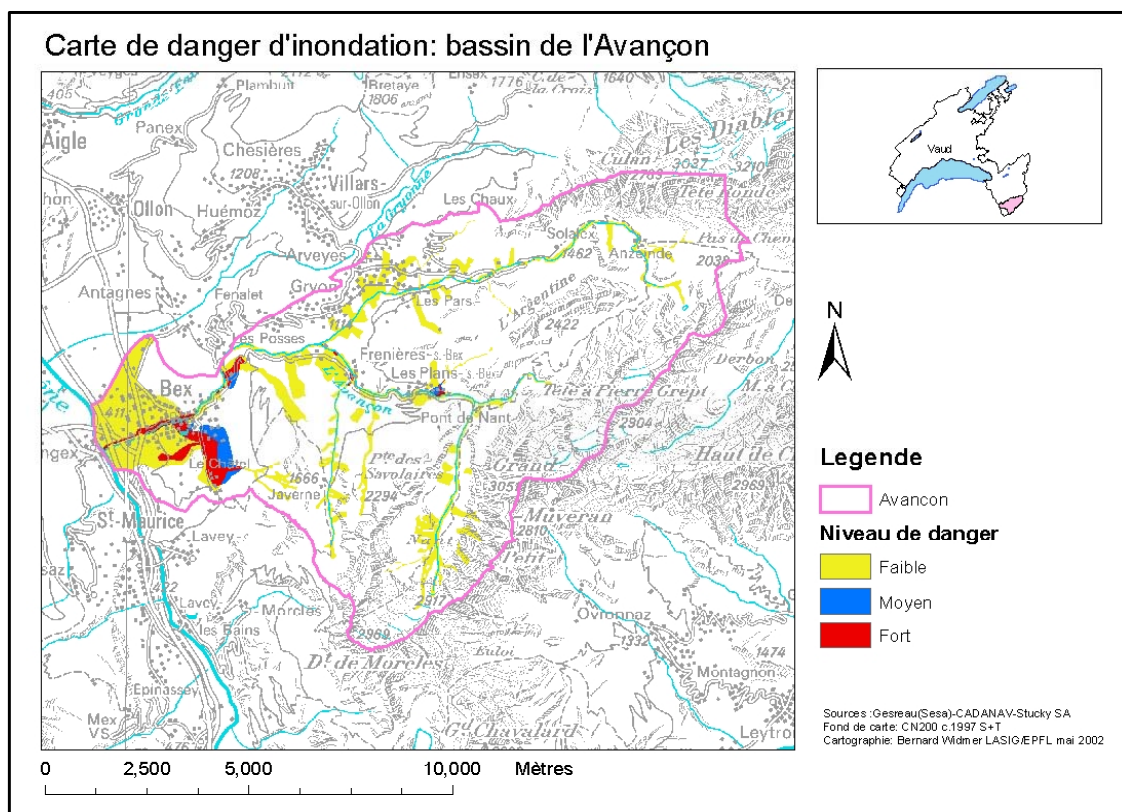
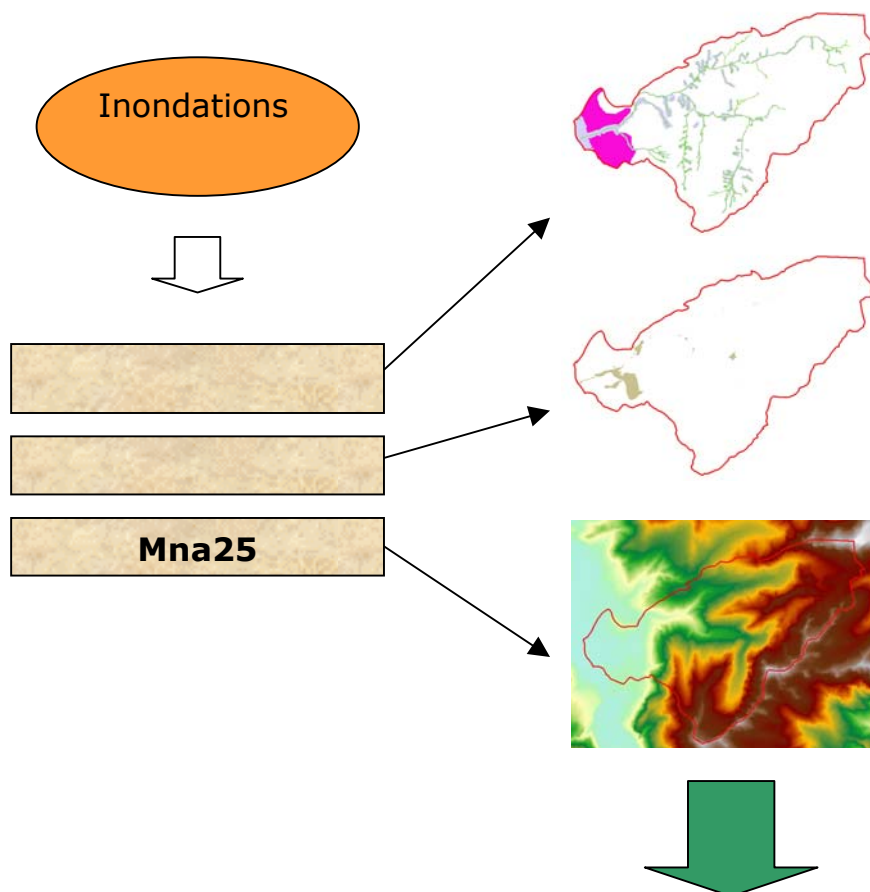


Figure 10 : Schéma d'obtention et carte de danger d'inondation

4.3.3 Obtention des cartes de danger : Glissements de terrain

Couches utilisées

-**glissements lents** (se trouve dans « Avançon » dans « Zones »). Cette couche représente la localisation des glissements dits « lents », présentant une vitesse de déplacement moyenne inférieure à 2cm/an.

-**glissements rapides** (se trouve dans « Avançon » dans « Zones ». Cette couche représente la localisation des glissements dits « rapides », présentant une vitesse supérieure à 2cm/an.

-**prelim inond** (cf. : 5.2.2)

Méthode

On garde telle quelle la distinction entre les glissements lents et rapides. On crée une troisième couche en croisant les zones définies par la carte préliminaire des inondations et les glissements rapides. Cette couche correspond à des zones potentiellement menacées par le phénomène de débâcle, à savoir une brutale accélération du phénomène de glissement suite à la modification des conditions hydrologiques dans la zone concernée en cas d'inondation.

Ainsi, le degré de danger est considéré comme :

-**faible** : s'il y a seulement présence de glissements lents, considérés comme stabilisés mais pouvant être réactivés par de nouvelles constructions.

-**moyen** : en cas de présence de glissements rapides, non situés dans la zone définie par la carte

-**fort** : lorsque l'on est en présence d'un glissement rapide situé en zone inondable.

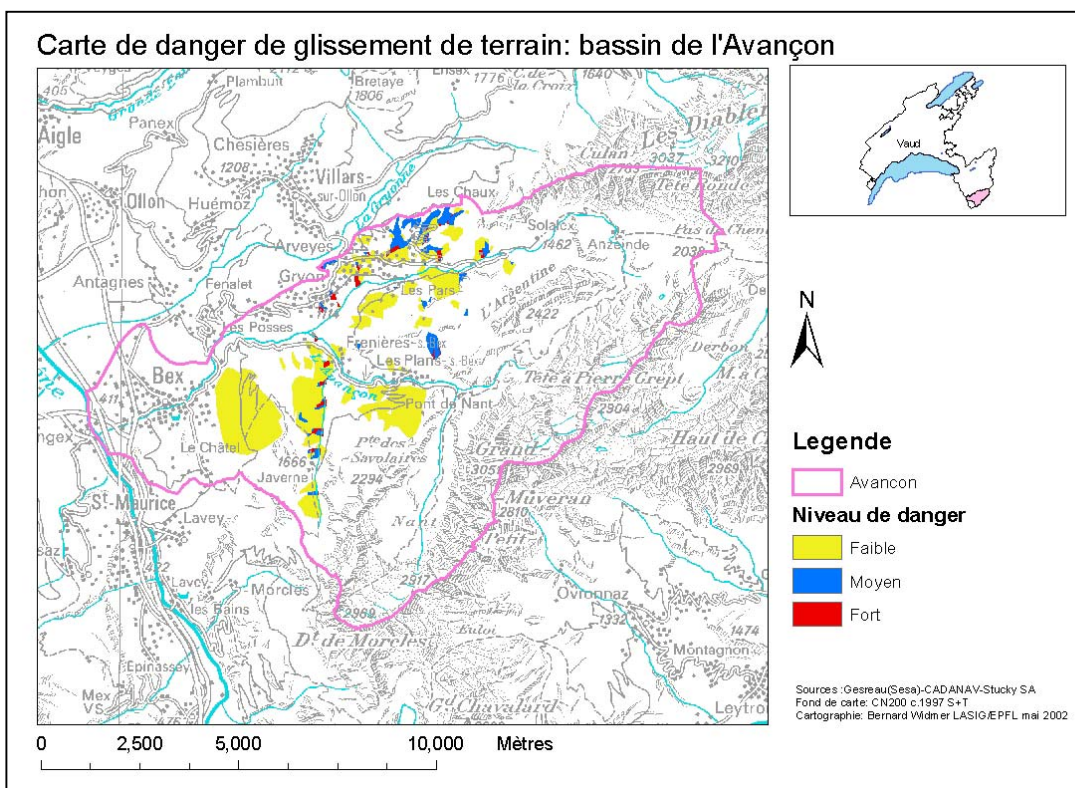
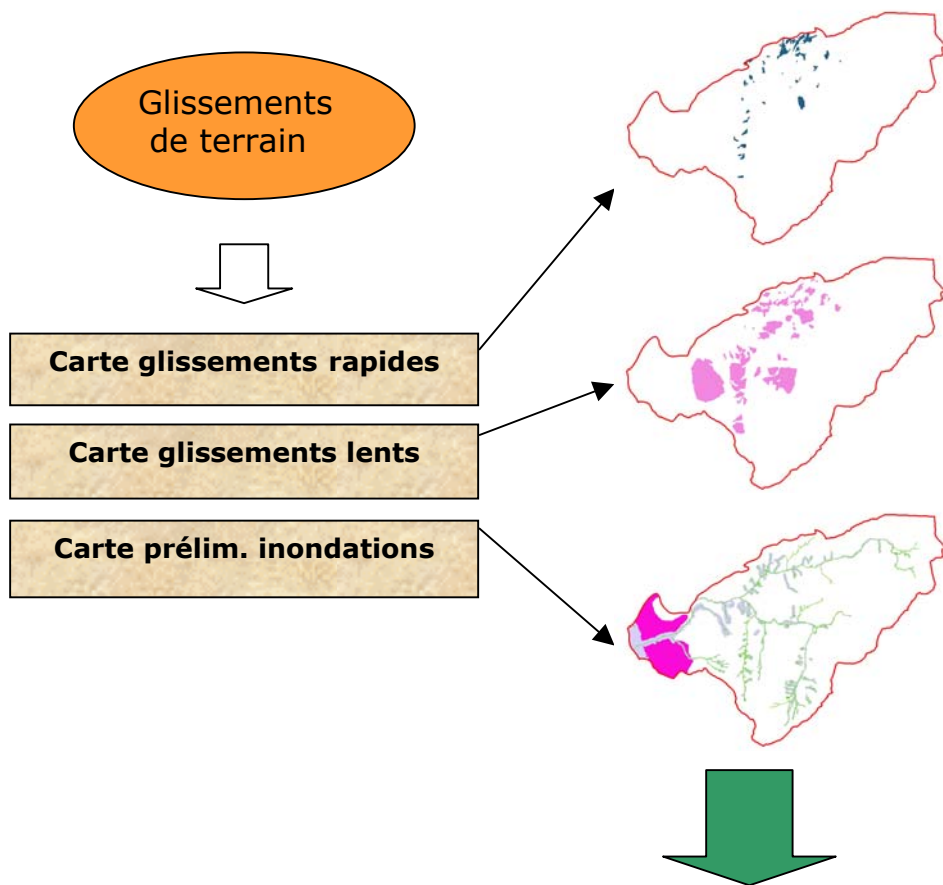


Figure 11 : Schéma d'obtention et carte de danger de glissement de terrain

4.3.4 Carte synthétique de danger

1) La principale question intervenant dans l'élaboration de la carte synthétique de danger est la question du traitement des zones où l'on observe la présence de plusieurs dangers. Selon les recommandations fédérales, c'est à chaque fois le degré de danger le plus élevé généré qui est considéré comme déterminant. En conséquence, la carte synthétique de danger représentant le degré général de danger pour les trois dangers considérés reprend la méthode du surclassement.

Si une zone est menacée par plusieurs dangers, c'est le danger présentant la valeur la plus élevée qui détermine la valeur de la zone considérée. Finalement, nous retenons, toujours selon les recommandations fédérales, que la superposition de plusieurs types de danger ne justifie pas de passer à une classe de danger supérieure, puisque les mesures de réduction sont établies en principe en considérant chaque danger isolément.

2) Une carte synthétique représentant chaque danger de manière à mettre en évidence les zones où ceux-ci se superposent sera également produite, en tant qu'information complémentaire

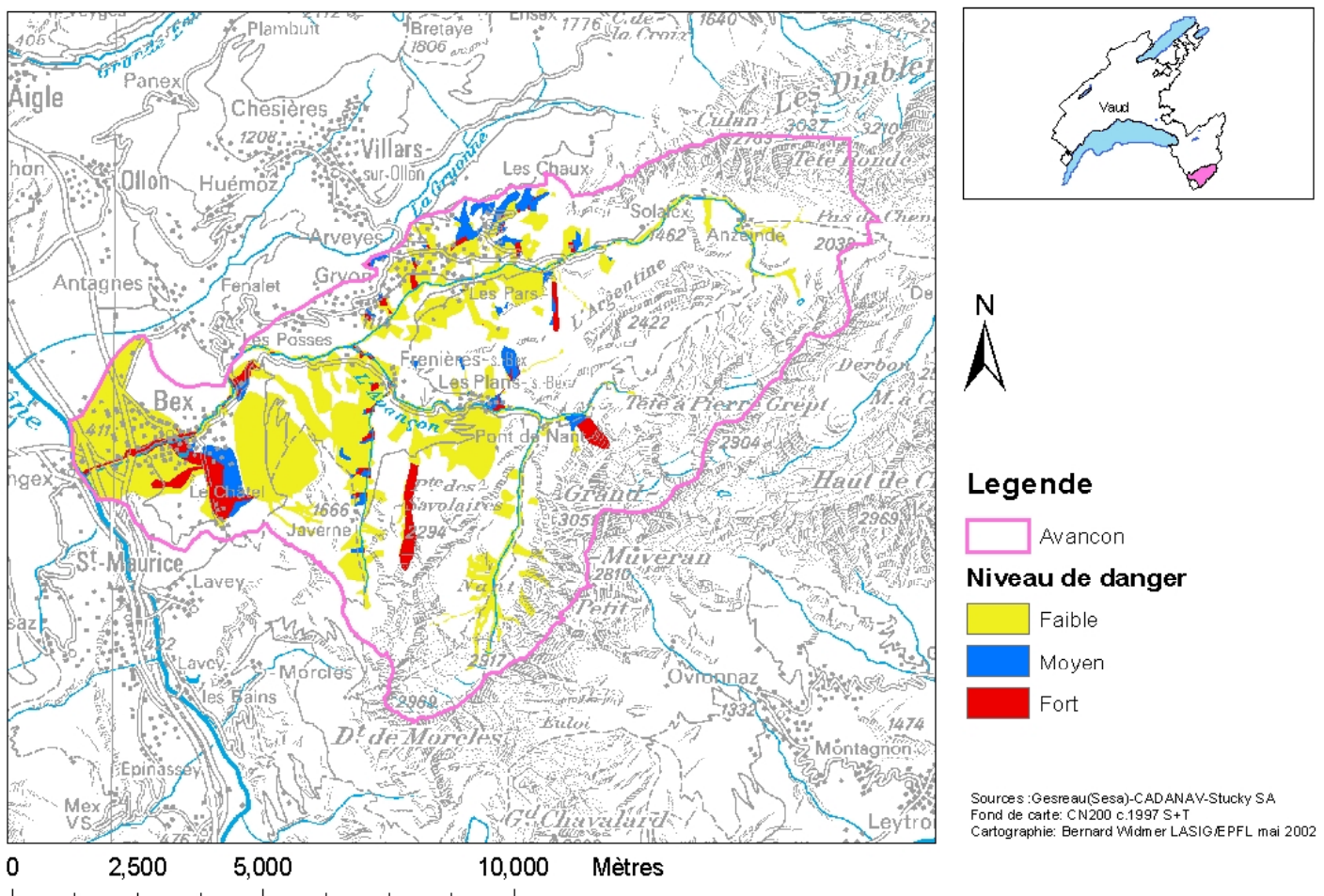


Figure 12 : Carte synthétique de danger

Remarque importante

Les cartes produites au moyen des méthodes décrites ci-dessus, même si elles peuvent présenter une certaine vraisemblance, n'en sont pas moins **fictives**. L'élaboration des vraies cartes de danger étant le travail des bureaux d'étude mandatés, l'intérêt des cartes précitées se situe au niveau de la méthode et non pas au niveau des données présentées.

4.4 Carte de danger – Version affinée

4.4.1 Méthode

Cette carte de danger est destinée à servir de base à l'approche n°2. Dans cette optique, un plus grand niveau de détail et de précision est requis. Ainsi, cette carte ne mentionne que le danger inondation, et à plus grande échelle. La première étape consiste à choisir une zone qui servira de zone-test. Celle-ci doit comporter, sur une surface limitée, le plus de différentes catégories d'objets de différents niveaux de danger possible.

Après examen visuel de la carte des objets à protéger et de la carte de danger inondation précédente, il est choisi une zone de 1km² centrée sur le secteur appelé « Le Bévioux », au nord-est de Bex. Sur la carte, 1cm correspond à 50m dans la réalité, ce qui nous donne une échelle de 1 : 5000^{ème} en adéquation avec les recommandations fédérales.

Contrairement à l'approche 1 où les cartes de dangers intègrent l'intensité et la reproductibilité du phénomène dans la même échelle qualitative à trois niveaux, la carte de danger nécessaire à l'approche 2 doit présenter pour le danger inondation séparément l'intensité et le temps de retour du phénomène.

Pour ce qui est de l'intensité, on emploie l'échelle qualitative à trois classes (faible, moyen, fort) déjà connue. Pour ce qui est du temps de retour, on divise l'échelle continue du temps en trois catégories : 0 à 30 ans, 30 à 100 ans et 100 à 300 ans. Les événements ayant un temps de retour de plus de 300 ans, considérés comme événements exceptionnels, ne sont pas pris en compte dans l'étude.

Une valeur unique (par opposition à une classe) étant nécessaire pour le calcul de l'indice de risque, on utilisera donc dans ce but les bornes des classes (temps de retour : 30ans, 100ans, 300ans).

Nous avons donc pour la « carte de danger approche 2 » trois classes possibles pour l'intensité et trois classes possibles pour le temps de retour, ce qui nous donne une classification comportant neuf classes au maximum.

4.4.2 Obtention des zones et classification

On se base sur la carte de danger de l'approche 1. On fait correspondre les trois classes de niveau de danger à l'intensité du phénomène. Les « niveaux de danger faible, moyen et fort » deviennent « intensité faible, moyenne et forte ». On obtient donc des zones comportant trois classes d'intensité de danger qui seront ensuite découpées en différents temps de retour. Pour ce faire, on se base sur la règle suivante : la hauteur d'eau est proportionnelle au temps de retour. Plus la hauteur d'eau est élevée, plus le temps de retour sera important (référence !).

Dans une vallée grossièrement en forme de V (non-glacière), comme c'est le cas ici, plus la hauteur d'eau est importante, plus la surface recouverte dans le plan XY est importante, la limite de la zone inondée s'éloignant au fur et à mesure du lit de la rivière. Dans cette logique, les zones avec des temps de retour courts se situent à proximité du lit de la rivière, alors que les zones avec des temps de retour longs en sont plus éloignées. En essayant de respecter au mieux la topologie de la zone d'étude en se basant sur le MNA 25 et les courbes de niveau de la carte nationale au 1 :25'000, on définit arbitrairement des zones de temps de retour 30ans, 100ans et 300ans se superposant aux valeurs d'intensité déjà obtenues.

On obtient donc au finale une carte de danger pour le phénomène inondation comportant pour chaque point d'occurrence du phénomène une valeur de temps de retour et une valeur d'intensité. (cf. : Cartes de dangers selon l'approche n°2 : Le Bévieux)

Remarque importante

Encore une fois, la carte produite au moyen des méthodes décrites ci-dessus, même si elle peut présenter une certaine vraisemblance (ce qui est de fait recherché), n'en est pas moins **fictive**. Cette carte présente un intérêt comme support pour la méthode de quantification du risque et non pas pour les données qu'elle présente en tant que telles.

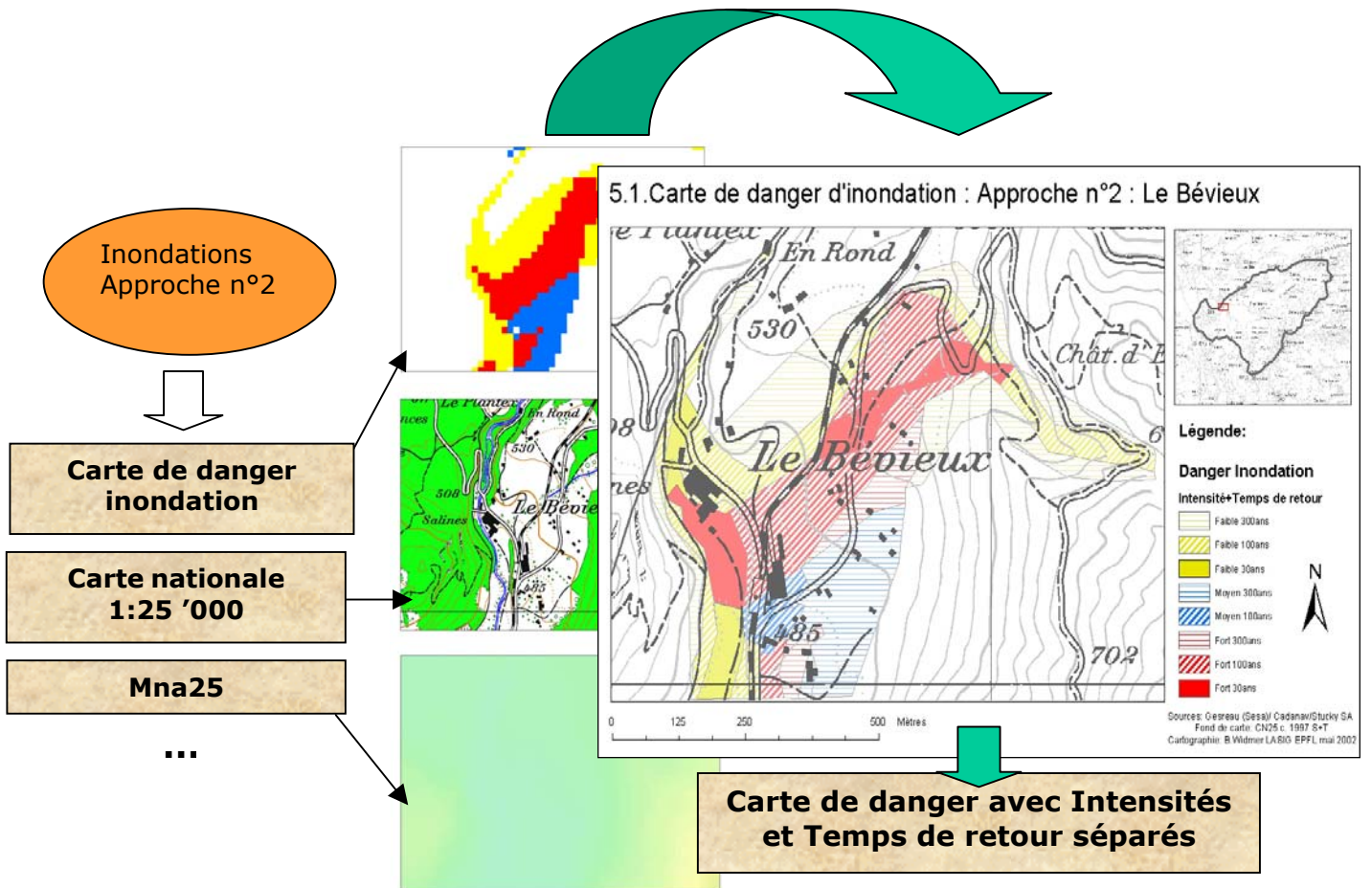


Figure 13 : Schéma d'obtention et carte de danger d'inondation
Version affinée

5 Approche 1

5.1 Obtention des cartes de risques

Présentation

Dans cette première approche, nous allons nous baser sur l'expression qualitative du risque prenant en compte le degré de danger **D** et le potentiel de dégât **P**. Cette expression se définit ainsi :

$$Rq = D \times P$$

L'obtention des degrés de danger à été décrite au chapitre précédent. Pour ce qui est du potentiel de dégât, celui-ci constitue une question centrale de ce chapitre. Nous allons tester deux variantes possibles de l'intégration du potentiel de dégât dans le calcul du niveau de risque.

Choix des couches

Le processus clé de l'obtention des cartes de risque consiste à croiser la couche des objets à protéger avec les cartes de danger. Pour ceci, certains aménagements sont nécessaires. Tout d'abord, un choix des couches de base est effectué. Pour les dangers, il s'agit de la couche **dangersynth_2**. Cette couche est une carte synthétique des dangers sur le bassin de l'Avançon. Ce choix se justifie d'un point de vue méthodologique par le fait que produire des cartes de risque pour chaque danger à ce stade de l'étude multiplie inutilement le nombre de cartes sans ajouter d'information pertinente.

Pour ce qui est des objets à protéger, le choix se porte sur la couche **objetprot**. Cette couche est également synthétique dans le sens où elle intègre les objets linéaires, ponctuels et surfaciques dans les 7 catégories définies par CADANAV (A à G, value 1 à 7) en fonction de leur indice de protection. Cette couche nécessite un traitement avant croisement.

Variante1 : Traitement des couches de base

Dans cette première, on effectue un reclassement de la couche des objets à protéger selon la matrice des potentiels de dégât de la brochure CADANAV.

L'intégration du potentiel de dégât s'effectue donc en amont du croisement avec le degré de danger. En se basant de la matrice des catégories d'objets de CADANAV, on obtient trois types de potentiels de dégâts : potentiel de dégât en vies humaines (**Ph**), matériels (**Pm**) et dû aux effets secondaires (potentiel de dégât au niveau environnemental **Ps**). Ces potentiels de dégâts sont répartis selon une échelle qualitative à trois niveaux : faible, moyen et fort.

Un reclassement des 7 catégories de la couche **objetprot** selon la **matrice des potentiels de dégât** est alors effectué (humains et matériels).

On obtient donc, après reclassement, deux couches comportant trois catégories chacune représentant respectivement les potentiels de dégâts au niveau humain et matériel. Le potentiel de dégât au niveau environnemental est pour l'instant écarté de l'analyse pour des raisons qui seront explicitées par après.

Matrice des potentiels de dégât

	Pm	Ph	Ps
Catégorie d'objet			
A	Faible	Faible	Faible
B	Moyen	Faible	Faible
C	Moyen	Faible	Faible
D	Moyen	Moyen	Faible
E	Fort	Moyen	Moyen
F	Fort	Fort	Moyen
G	Fort	Fort	Fort

Croisement entre les objets et les niveaux de danger

La carte synthétique de dangers, ainsi que les deux cartes de potentiels de dégâts comportent chacune trois catégories. Celles-ci sont numérotées de 1 à 3 de faible à fort, puis un produit (raster calculator) est effectué entre la carte synthétique et chacune des deux cartes de potentiel. Le produit raster simple est choisi, une méthode plus élaborée ne se justifiant pas à ce stade. Ce produit donne 6 valeurs comprises entre 1 et 9 (1,2,3,4,6 et 9) numérotées de 1 à 6.

Ces valeurs se répartissent dans la matrice suivante:

Matrice de risque

		Niveau de risque		
	Fort-3	3	5	6
Niveau de danger	Moyen-2	2	4	5
	Faible-1	1	2	3
		Faible-1	Moyen-2	Fort-3
		Potentiel de dégât		

On obtient donc deux couches, **nivoriskh** et **nivoriskm**, représentant respectivement le niveau de risque au niveau humain et au niveau matériel, possédant chacune six niveaux qualitatifs de risque. Nous voyons que les niveaux 1 à 3 possèdent soit un potentiel de dégât faible, soit un niveau de danger faible alors que le niveau minimum est moyen pour les catégories 4 à 6 pour les deux critères.

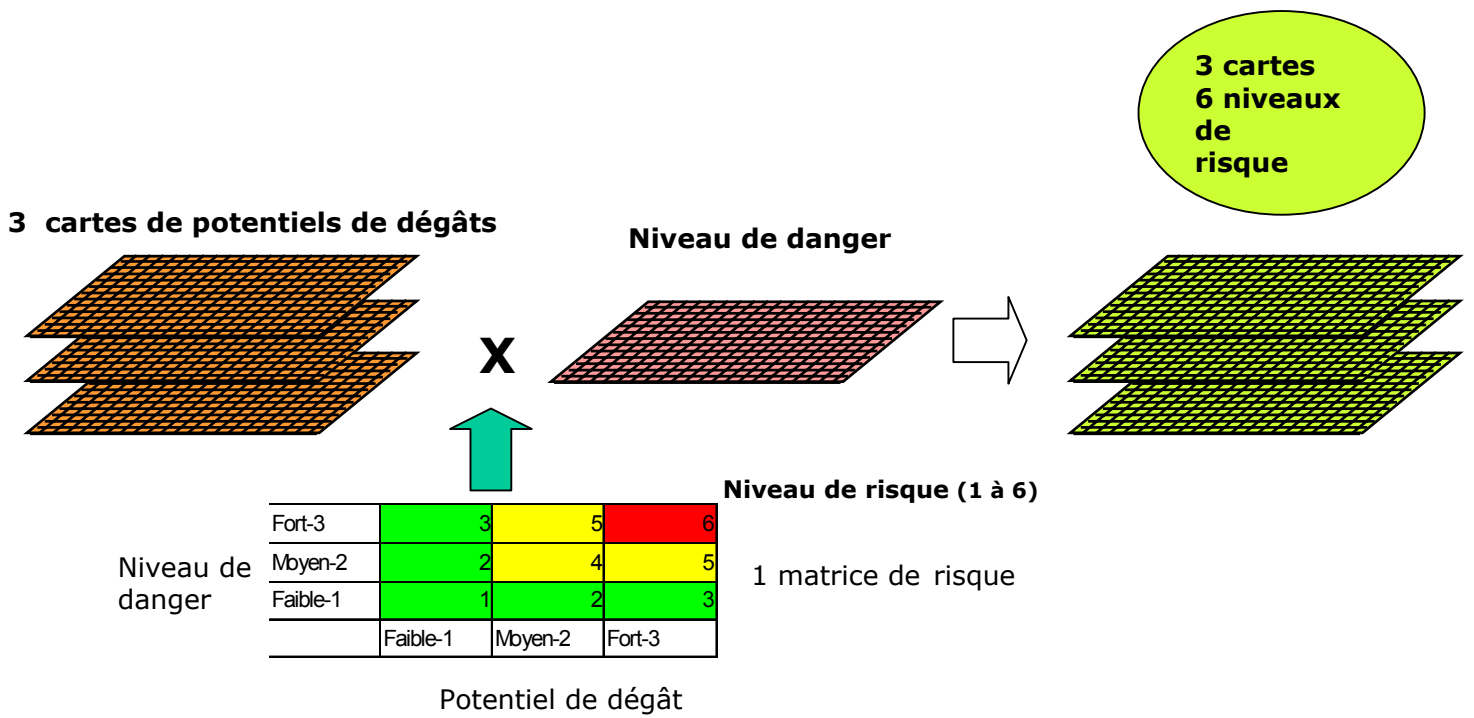


Figure 14 : Schéma d'obtention : variante 1 (produit raster)

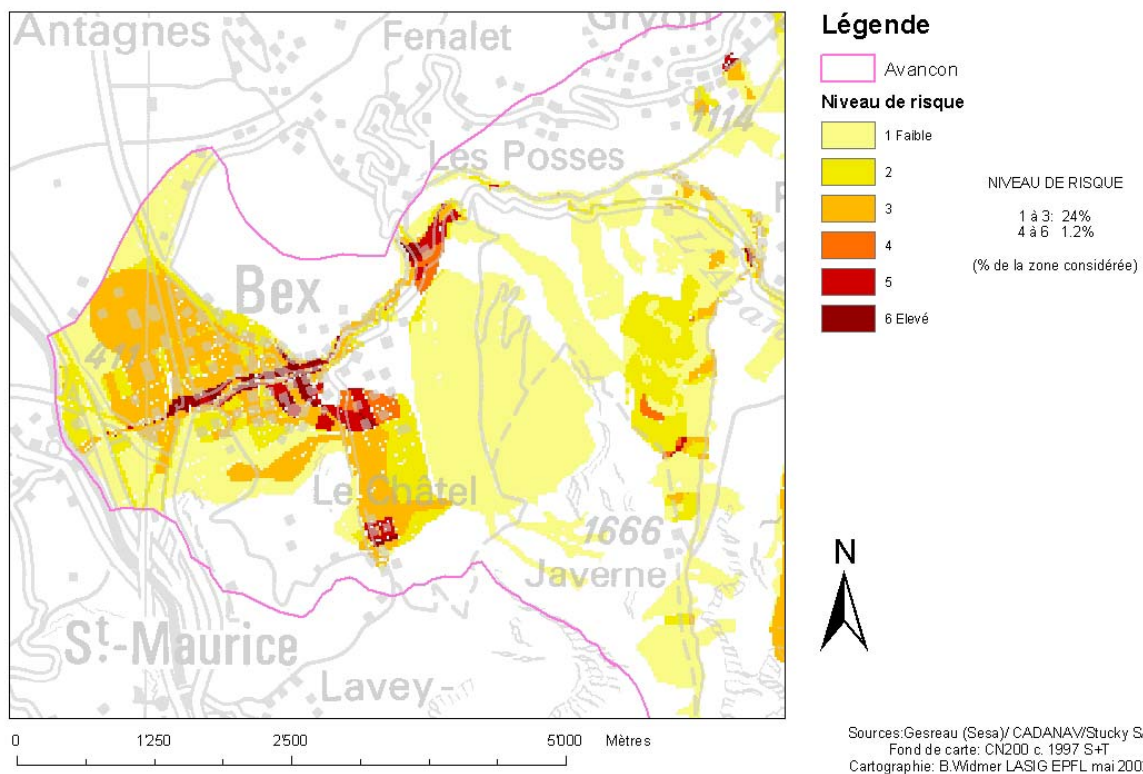


Figure 15 : Carte de risque au niveau humain : variante 1

Variante 2 : Dans cette variante, on a une matrice de risque différente pour chaque type de risque, au lieu d'intégrer trois types de potentiels de dégâts différents dans la même matrice. Ces matrices sont les suivantes :

Risque en vies humaines

<i>Niveau de danger</i>	3	R2	R4	R5
	2	R2	R3	R4
	1	R1	R1	R1
		Faible	Moyen	Fort

Nombre de vies en jeu

Risque matériel

<i>Niveau de danger</i>	3	R3	R4	R5
	2	R2	R3	R4
	1	R1	R2	R3
		Faible	Moyen	Fort

Valeur des biens

Risque d'effets secondaires

<i>Niveau de danger</i>	3	?	?	R5
	2	?	?	?
	1	R1	?	?
		Faible	Moyen	Fort

effets secondaires

Cette méthode, proposée par J-M Lance, nécessite l'emploi d'une addition entre les niveaux de danger et les potentiels de dégât de façon à pouvoir définir un niveau de risque pour chaque cellule de la matrice lors du reclassement, ceci n'étant pas possible lors de l'utilisation d'un produit raster. Ce dernier engendre, en effet, une matrice symétrique avec des cellules identiques de part et d'autre de la diagonale bas-gauche/haut-droite.

1 matrice pour chaque type de risque=3 matrices

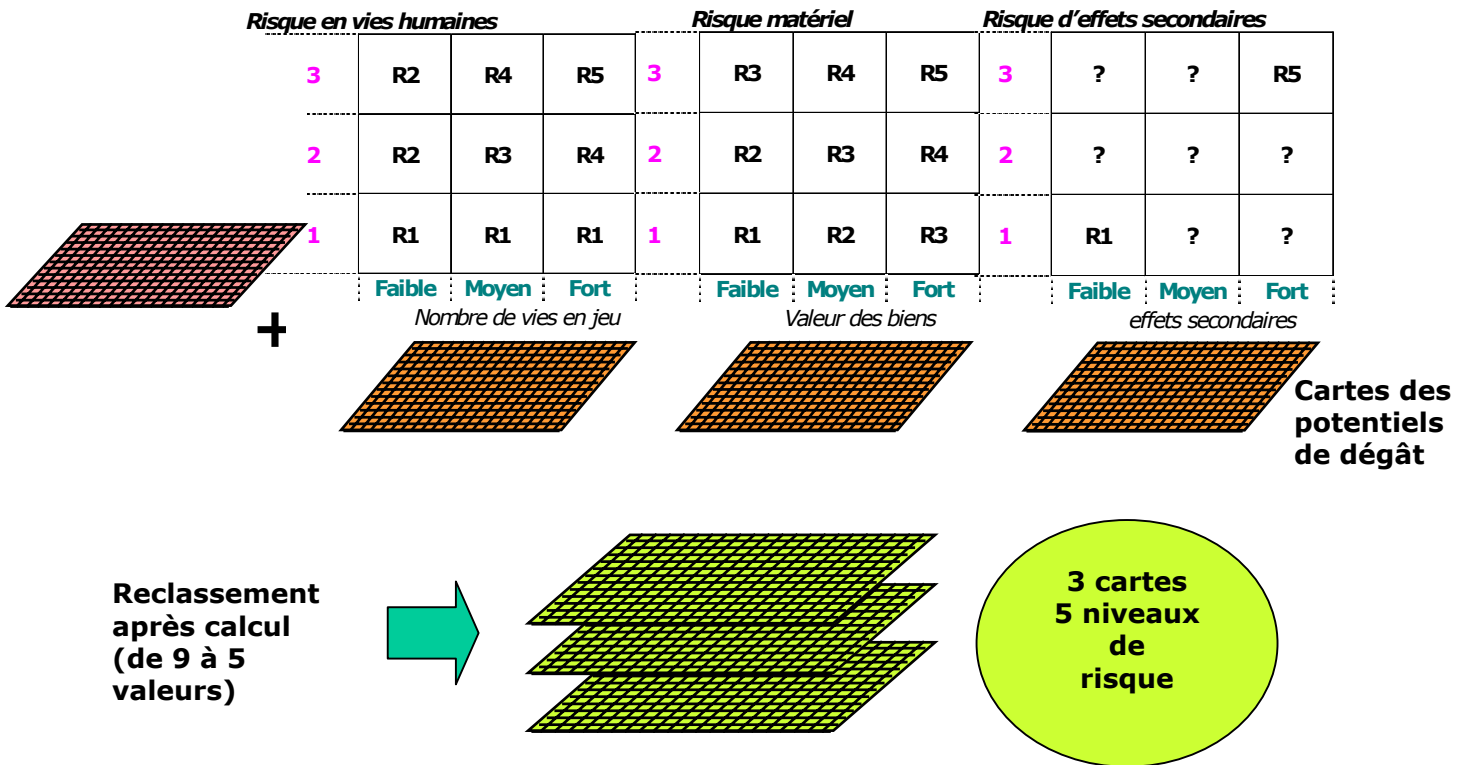


Figure 16 : Schéma d'obtention : variante 2 (addition de rasters)

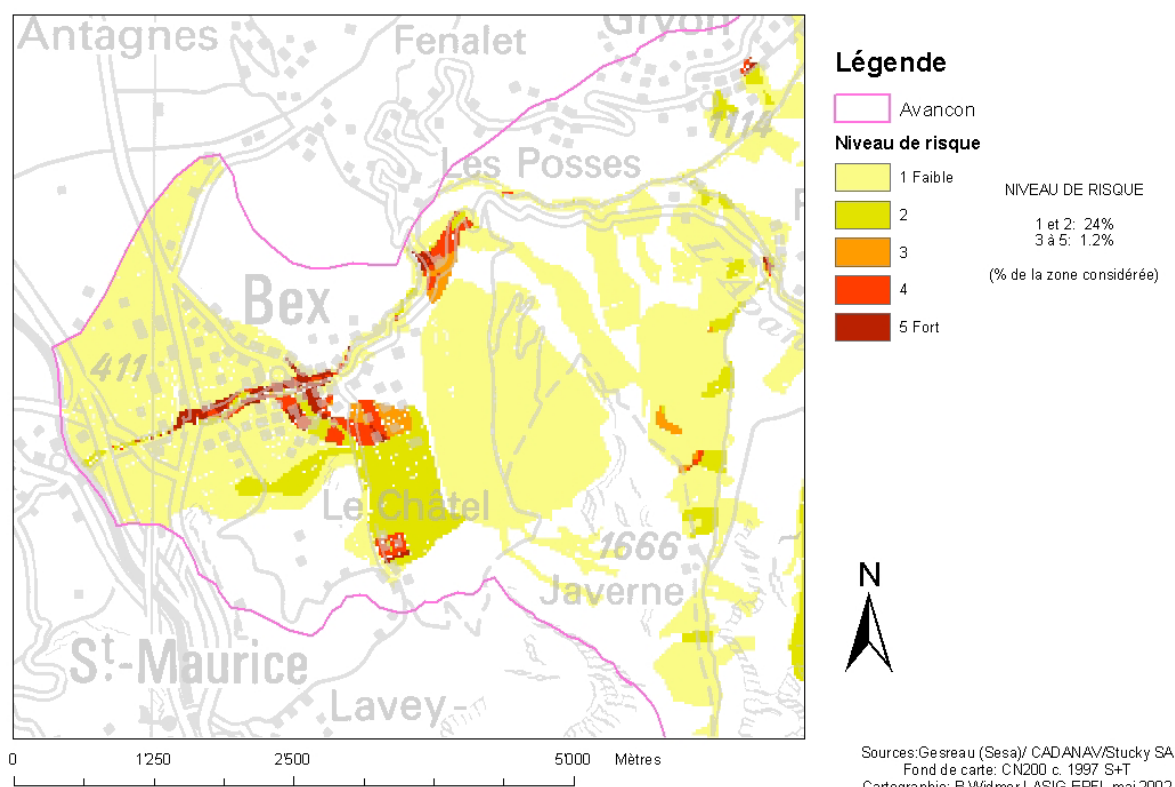


Figure 17 : **Carte de risque au niveau humain : variante 2**

5.2 Evaluation

Nous avons donc établi, à l'aide des méthodes présentées ci-dessus, plusieurs cartes représentant pour chacune des variantes le risque au niveau humain et matériel. Nous n'avons pas procédé à l'établissement de carte de risque au niveau des **effets secondaires**. Ceci parce que la question des effets secondaires fait intervenir beaucoup d'éléments et de paramètres qui dépassent la définition du risque employée, et qu'il ne nous semblait pas pertinent d'établir une potentialité d'effets secondaires sur la seule base des catégories d'objets au des niveaux de danger. La question des effets secondaires se prête probablement mieux, à notre avis, à un traitement au cas par cas, que par le biais d'une approche globalisante.

De plus, et probablement pour ces raisons, la matrice proposée pour la variante 2 n'était pas satisfaisante en ce qui concerne les effets secondaires, ce qui nous aurait privé d'un point de comparaison entre les deux variantes.

Pour ce qui est des objets à protéger, après avoir tenté d'effectuer une différenciation de la prise en compte du risque en considérant l'objet comme étant surfacique, linéaire ou ponctuel, nous avons finalement abandonné cette idée pour deux raisons principales.

La première est d'ordre **pratique**. Cette distinction est en effet liée à l'origine à deux éléments de base : d'une part le type de fichier en mode vecteur dans le SIG et d'autre part la configuration des données sur les objets en fonction des organismes dont elles proviennent (cadastre de l'état de Vaud, office fédéral des routes, etc.). La majorité de ce travail étant effectuée en mode raster (image), la distinction liée au type de fichier vecteur n'a pas lieu d'être conservée. De plus, les distinctions liées aux provenances sont peut être également le résultat d'un manque de compatibilité inter-organismes, comme dans l'exemple les petites de routes de desserte d'habitations qui n'existent ni dans le fichier du réseau routier, ni dans les surfaces d'affectation, où encore dans l'exemple des objets Opam, qui sont bel et bien des objets surfaciques mais dont le seul aspect géographique fourni dans le fichier est la localisation, ce qui se traduit sur la carte par un point.

La seconde est d'ordre **conceptuel**. On peut considérer une route comme étant une ligne lorsqu'on la conceptualise, en l'intégrant à la notion de réseau. Cependant, d'un point de vue physique, une route possède bel et bien une longueur et une largeur, même si celle-ci cette dernière est petite relativement à la longueur. Nous avons donc bien affaire à une surface, et c'est bien cette surface qui peut être directement menacée par l'occurrence d'un danger, la définition de la menace pour la circulation sur le réseau auquel s'intègre cette surface conceptualisée étant une étape liée à l'établissement des effets secondaires. On pourrait envisager d'attribuer un poids plus important pour les risques d'effets secondaires aux objets linéaires, dans la mesure où l'atteinte à ceux-ci provoque la paralysie des réseaux, mais l'étude de cas ou encore une approche du risque sous l'angle des flux et des réseaux semble présenter une plus grande pertinence dans ce domaine que l'approche abordée dans ce travail.

En conséquence, tous les objets à protéger ont été intégrés dans le même fichier image comportant 7 catégories pour les deux approches.

Pour ce qui est des cartes de danger, nous avons employé principalement la carte synthétique des dangers, telle que décrite au chapitre précédent

Nous allons maintenant nous attacher à **comparer les différentes cartes** obtenues entre elles et avec les cartes déjà disponibles. Pour ce qui est des cartes obtenues, il s'agit des cartes provenant des deux variantes, ainsi que de la carte synthétique des déficits de protection. Les cartes déjà disponibles sont celles ayant été établies par CADANAV dans le cadre du processus de priorisation, et constituant un croisement entre les catégories d'objets et les cartes préliminaires de danger.

Comme mentionné précédemment, ces cartes sont basées sur des situations connues ou sur des simulations simples. Elles indiquent uniquement la présence probable d'un danger.

Pour ce qui est de la **carte synthétique des déficits de protection**, celle-ci se base sur un reclassement des catégories d'objet à l'aide de la matrice suivante, appelée « **matrice des buts de protection** » :

Buts de protection (échelle continue) *	3	2	2	1	0	0	Au cas par cas (0)
Catégories d'objets	A	B	C	D	E	F	G

Pour l'événement considéré, l'intensité maximale acceptée est : **nulle** si 0, **faible** si 1, **moyenne** si 2 et **forte** si 3

Remarquons que l'on parle ici de l'intensité maximum acceptée pour une échelle temporelle continue, autrement dit pour un temps de retour non spécifié ou indisponible. L'intensité du phénomène n'étant pas non plus une donnée disponible à ce niveau de l'étude, nous reclassons les catégories en employant le degré de danger D en lieu et place de l'intensité. En soustrayant ensuite le degré de danger accepté au degré au degré de danger constaté (carte synthétique des dangers), on obtient la carte des déficits de protection, en considérant toute valeur négative (quand le degré de danger accepté est plus élevé que le degré constaté) comme un déficit de protection nul. Cette carte présente donc des valeurs de déficit allant de 0 (déficit nul) à 3 (déficit élevé).

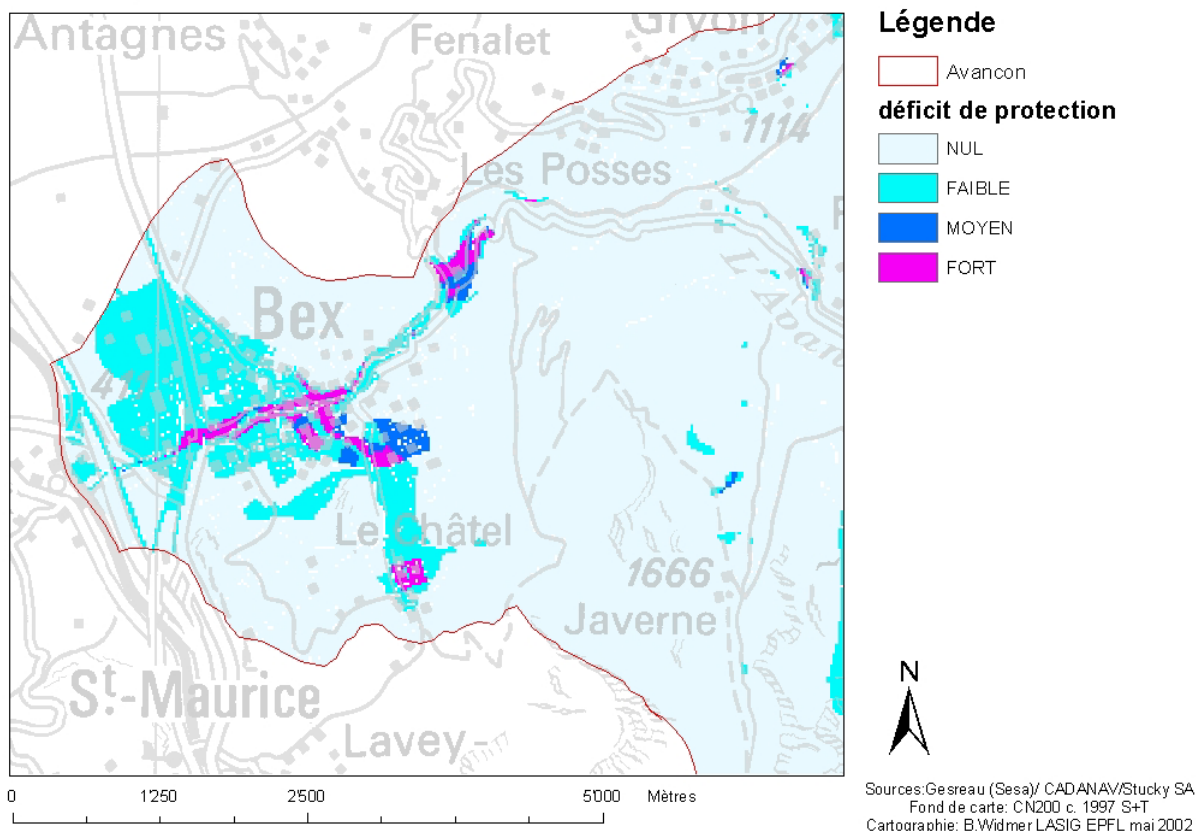


Figure 18 : **Carte synthétique des déficits de protection**

On peut considérer cette carte comme une représentation d'ordre général du risque naturel un petit peu plus élaborée que la simple carte de priorisation, dans la mesure où la distinction entre classes ne se fait plus sur la seule base des catégories d'objet. Le phénomène prend en effet ici une certaine importance grâce à la prise en compte des degrés de danger dans la représentation. A catégorie égale, on peut faire la distinction entre un objet situé dans une zone avec un degré de danger fort un autre situé dans une zone où le degré est faible.

Pour ce qui est de la carte de priorisation, en revanche, nous sommes dans une logique binaire considérant l'absence ou la présence de danger, les 7 catégories étant elles-mêmes divisées en d'une part les objets à protéger en priorité et d'autre part les objets ne nécessitant pas de protection prioritaire. Nous pouvons toutefois relever, comme limite conceptuelle concernant la carte des déficits de protection, le manque de finesse de la correspondance entre les catégories d'objets et les buts de protection, dans la mesure où les types de dégâts pouvant être occasionnés n'y sont pas différenciés. On peut aussi s'interroger sur la pertinence de l'échelle à 3 (4) classes (faible, moyen, fort) (nul) du déficit de protection pour représenter le risque, dans la mesure où la question qui se pose en premier lieu est simplement de savoir si oui ou non il y a déficit. (source : communication personnelle de R.Metzger). A partir de là, s'il y a déficit on prend des mesures et s'il n'y a pas de déficit, on ne fait rien.

On se peut poser la question de l'utilité de représenter un degré de risque à l'aide d'une échelle dont la philosophie première est somme toute binaire. En d'autres termes, l'avantage de la simplicité et de la compréhensibilité a pour effet logique de diminuer les possibilités de nuance.

Pour ce qui est de la représentation du risque proposée dans les **variantes 1 et 2**, nous pouvons tout d'abord relever, sur la base des cartes obtenues, que ce sont bien les mêmes zones qui sont mises en avant comme présentant le niveau de risque le plus élevé, ceci aussi bien au niveau matériel qu'au niveau humain. Ceci se confirme si l'on compare le nombre de pixel pour chaque classe pour chacune des deux variantes (risque au niveau humain):

Risque humain variante 1

Niveau de risque	Nombre de pixels	Proportion du total des zones à risque	Proportion total du bassin de l'Avançon
1	23260	0.627	0.158
2	6674	0.180	0.045
3	5398	0.146	0.037
4	558	0.015	0.004
5	833	0.022	0.006
6	347	0.009	0.002
Total	37070	1	0.252

Risque humain variante 2

Niveau de risque	Nombre de pixels	Proportion du total des zones à risque	Proportion du total du bassin de l'Avançon
1	30499	0.823	0.207
2	4833	0.130	0.033
3	558	0.015	0.004
4	833	0.022	0.006
5	347	0.009	0.002
Total	37070	1.000	0.252

Sur ces deux tableaux, on remarque bien que les deux dernières classes, représentant les niveaux de risque les plus élevés, sont identiques, que ce soit en taille ou en proportion. Egalement, dans les deux cas, les zones présentant un risque représentent environ 25% de la superficie du bassin de l'Avançon. Ceci est tout à fait normal, dans la mesure où les deux variantes se basent sur la même carte synthétique de danger et la même carte des objets à protéger, et n'attribuent aucune valeur de risque nulle lors de leur croisement.

Pour ce qui est de la comparaison des deux variantes sur le **plan conceptuel**, on peut affirmer que la variante n°2 permet de nuancer légèrement plus la représentation. Elle n'est en effet pas soumise aux effets de la symétrie résultant de l'utilisation du produit dans la variante 1. D'un autre côté, la variante 2 est peut être un peu moins robuste à données de base égales, dans la mesure où l'on est amené deux fois au lieu d'une à effectuer des choix pouvant être arbitraires (lors du choix des potentiels de dégâts et lors du choix des niveaux de risque dans les trois matrices). D'un **point de vue pratique**, la mise en place de la seconde variante prend également légèrement plus de temps.

D'un **point de vue sémiologique** enfin, on peut considérer que le fait d'avoir 5 ou 6 classes ne change pas grand chose au niveau du choix de la symbologie.

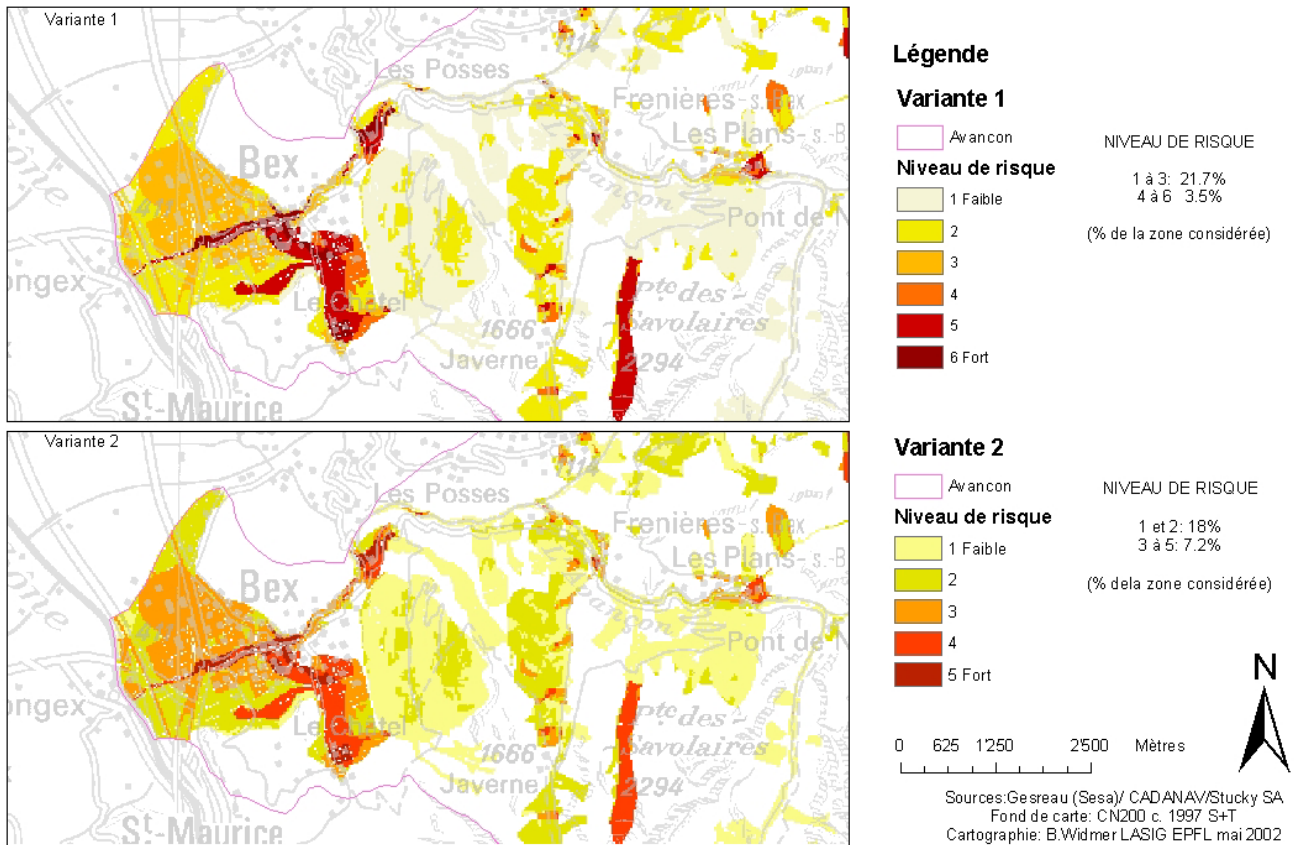


Figure 19 : Comparaison variante 1 et variante 2 (risque matériel)

Dans les deux cas, le choix d'un dégradé entre deux couleurs (du jaune au brun) appartenant à la même gamme permet une bonne différenciation sans provoquer trop de confusion (ce qui pourrait être le cas en choisissant un dégradé du vert au rouge, par exemple).

6 Approche 2

6.1 Présentation

Comme il est mentionné précédemment, l'approche 2 se base sur une définition du risque différente de l'approche 1. La définition employée est celle-ci :

$R_t = \sum(H \times V \times W)$ avec **R_t** = Risque total

H = Reproductibilité du phénomène ou fréquence d'occurrence (an^{-1})

V = Vulnérabilité (potentiel de dégât en %)

W = Valeur estimée au m^2 de la catégorie d'objet (CHF/m^2)

R_t est donc la sommation d'un indice de risque en $\text{CHF}/\text{m}^2 \cdot \text{an}$. On peut appeler cet indice le **coût annuel du risque par unité de surface**.

Dans le cadre d'une application pratique, les limitations suivantes sont appliquées : dimensions de la zone d'étude ($1250\text{m} \times 800\text{m}$), 1 seul phénomène (inondation), 1 seul type de risque (matériel).

6.2 Indice de risque annuel

L'indice recherché, à savoir pour le danger inondation le **coût annuel du risque par unité de surface** (m^2) s'exprime comme vu précédemment par :

$R = H \times V \times W$ avec **$R_t = \sum(H \times V \times W)$**

La carte de danger élaborée à l'étape précédente fournit, pour chaque pixel de 5m de côté situé dans la zone de danger, une valeur d'intensité et une valeur de reproductibilité.

La valeur H, qui représente la fréquence, est l'inverse du temps de retour. Les valeurs prises par la fréquence sont donc les suivantes : **1/30, 1/100, 1/300 an^{-1}**

Nous avons vu que **la vulnérabilité V** correspond de manière linéaire l'intensité I. Cette intensité I étant représentée sur la carte par des valeurs qualitatives (faible, moyen, fort).

Un lien est arbitrairement établi entre ces valeurs qualitatives et un pourcentage (degré) de destruction des biens matériels de l'unité surfacique exposée :

Intensité	Vulnérabilité
Faible	20% de l'unité détruite (0.2)
Moyenne	40% de l'unité détruite (0.4)
Forte	80% de l'unité détruite (0.8)

Ces valeurs sont une interprétation quantitative des qualificatifs utilisés pour exprimer l'intensité des phénomènes (peu de dégâts aux bâtiments, dégâts moyens, bâtiments presque entièrement détruits) mais sont évidemment sujettes à discussion et peuvent varier en fonction de l'interprétation, du phénomène et du type de dégât (matériel, humain, environnemental).

Pour ce qui est de la **valeur W**, il faut tout d'abord relever qu'il est difficile d'obtenir une estimation d'une valeur par unité surfacique, qu'elle soit matérielle, humaine ou prenne en compte les effets secondaires.

Dans l'exemple de la valeur matérielle, on peut attribuer une sorte de valeur moyenne par unité de surface en fonction des zones d'affectation, en estimant le prix du terrain au mètre carré et en extrapolant la valeur de ce qu'il est supposé y avoir dessus. On peut également prendre la valeur fiscale ou encore la valeur assurée, mais il faut savoir que ces dernières peuvent présenter des différences importantes pour diverses raisons.

En effet, on assure en principe ce qu'il y a sur un terrain et non pas le terrain lui-même. Que se passe-t-il donc si un terrain non cultivé ayant été payé un certain prix est dégradé par un phénomène naturel ? Egalement, la valeur de certains objets peut être difficile à évaluer, comme celle d'une forêt par exemple. Est-ce que sa valeur se situe au niveau des biens matériels (prix du bois) ou au niveau des effets secondaires (perte d'une protection naturelle en cas d'avalanches) ?

En raison des nombreuses questions soulevées, il a été choisi de se baser sur les catégories d'objets pour attribuer une valeur. On considère la valeur matérielle comme étant nulle pour la catégorie A (forêts, terrain à l'état naturel), égale à la valeur du terrain pour la catégorie B ($\sim 50\text{CHF}/\text{m}^2$) et égale à la valeur du terrain ($\sim 500\text{CHF}/\text{m}^2$ en moyenne) à laquelle on ajoute 4 fois ce chiffre pour évaluer la valeur du bâti pour la catégorie F ($500 + 4 \cdot 500 = 2500\text{CHF}/\text{m}^2$) (estimation provenant d'un entretien avec R. Caloz).

Pour ce qui est des autres valeurs, l'idée est d'avoir grossièrement un doublement de la valeur chaque fois que l'on passe d'une catégorie à une autre (pour les catégories B à G) de façon à avoir des valeurs permettant de se faire une idée pas trop fautive, par rapport aux informations disponibles.

Remarque

Il faut relever ici l'importance du choix de seuils en ce qui concerne la fréquence et la vulnérabilité. Le choix de ceux-ci influence en effet fortement la linéarité de l'indice final, notamment les seuils de la fréquence possédant un rapport de 1 à 10 du premier au troisième. Ces seuils présentent l'avantage d'être compatibles avec les recommandations fédérales, mais le choix d'autres seuils ou une forme de redressement par le biais d'un logarithme reste évidemment possible.

Au niveau conceptuel, nous pouvons encore distinguer cette approche de la précédente par le fait que dans celle-ci, le paramètre de fréquence conserve ses unités. Relevons toutefois que l'intensité est présente par le biais d'un rapport sans unités, à savoir la vulnérabilité V . Ceci ne remet pas en cause le fait que l'expression de risque peut ici avoir des unités, alors que ce n'est plus possible dans l'approche précédente.

En fonction de ce qui précède, le **tableau de correspondance** entre les catégories d'objet et la valeur par unité de surface est donc le suivant :

Catégorie	Valeur par m2 (CHF)
A	0
B	50
C	100
D	300
E	1000
F	2500
G	5000

En effectuant un reclassement selon ce tableau du fichier en mode raster **objetprot** (version avec pixels de 5m) contenant la catégorie d'objet de tous les pixels du bassin de l'Avançon, nous obtenons pour tous ces pixels la valeur estimée (matérielle) au m².

Indice Rt :

Nous possédons donc H , V et W . Pour obtenir l'**indice Rt** au m², il nous suffit donc de multiplier H , V et W , vu que **$Rt(m^2) = H \times V \times W$** . Pour ce qui est des unités : H est en année⁻¹(1/an), V est un pourcentage et W est en sfr par m² (CHF/m²), ce qui nous donne bien au final un coût annuel au m² (CHF/m²*an). Le calcul s'effectuant à l'aide du calculateur raster, il est attribué une valeur fictive de 1 CHF/m² à la catégorie d'objet A, de manière à pouvoir différencier cette dernière des zones où les données ne sont pas disponibles. Les valeurs obtenues par multiplication de cette classe sont donc considérées comme symboliques.

Après calcul, nous obtenons des valeurs comprises entre 0.033 CHF/m²*an et 66.65 CHF/m²*an (cf. : tableau Excel : indice de risque). Après examen de l'histogramme représentant la répartition des valeurs, il est décidé de classer les données comme suit :

CLASSES	NOMBRE DE PIXELS*
Symbolique	4060
Moins de 1 chf/m ² *an	2773
Entre 1 et 2 chf/m ² *an	1762
Entre 2 et 5 chf/m ² *an	1308
Entre 5 et 10 chf/m ² *an	1442
Entre 10 et 20 chf/m ² *an	482
Entre 20 et 50 chf/m ² *an	444
Plus de 50 chf/m ² *an	358

* Chaque pixel est un carré de 5m de coté, donc d'une surface de 5*5=25m².

La même logique que précédemment est appliquée en ce qui concerne le choix des seuils. Le rapport entre la borne inférieure et la borne supérieure de la classe est en effet grosso modo à chaque fois de 2. Egalement, l'aspect financier confère aux valeurs présentées une signification particulière, ce qui justifie l'emploi de seuils respectant une logique en rapport avec cette signification, à savoir la valeur attribuée aux pièces de monnaie et aux billets. De plus, d'un point de vue graphique, la taille et le nombre de classes permettent de fournir les bases d'une représentation satisfaisante de la problématique.

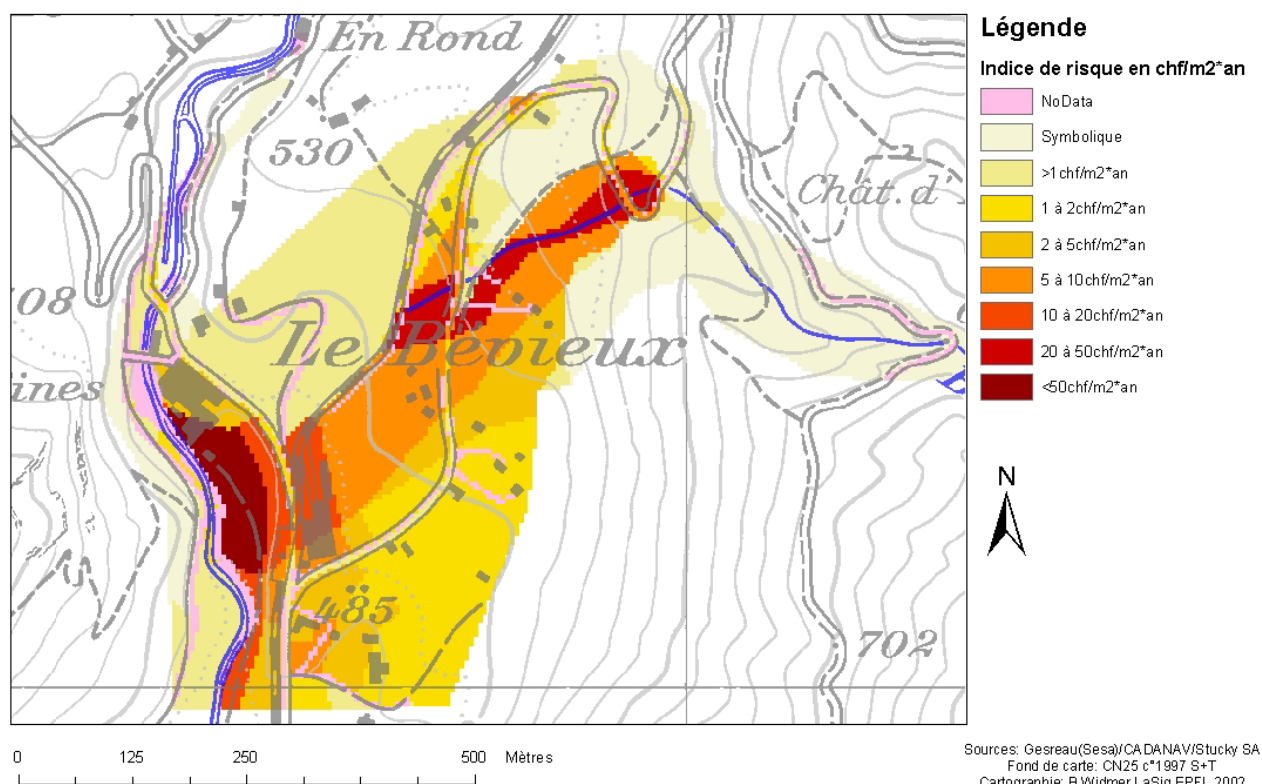


Figure 20 : Carte de l'indice de risque matériel

6.3 Evaluation

En premier lieu, il paraît important de revenir sur la question de la quantification du risque au niveau humain. L'établissement d'un indice de risque humain a en effet été volontairement écarté de cette approche. La raison principale est qu'il paraît difficile d'utiliser l'expression proposée dans cette approche en termes autres que financier, à moins d'effectuer, pour reprendre les termes de R. Metzger, une « cuisine » difficilement opérationnelle.

Cependant, cette forme de « cuisine » s'effectue couramment dans le milieu de l'assurance où la valeur du préjudice porté à l'individu correspond à l'indemnité versée en cas de blessure, d'invalidité ou encore de décès. On pourrait alors imaginer établir sur cette base une expression de la valeur humaine par unité de surface. Toutefois, si le fait de rendre objective la valeur de la vie d'un être humain peut se révéler être nécessaire dans le contexte d'une compagnie assurances, cela ne nous semble pas défendable dans le cadre de la présente étude. C'est pourquoi cette question n'a pas été abordée par ce biais.

On pourrait encore imaginer déterminer une classification de la densité de population moyenne sur la base des catégories d'objets, en attribuant une certaine densité à chacune d'elle, c'est à dire un nombre moyen de personnes présentes par unité de surface. Cela paraît compliqué mais faisable. Il resterait alors à attribuer des seuils de vulnérabilité ou de « létalité » en fonction de l'intensité du phénomène.

Cela paraît également réalisable, mais l'approche statistique (analyse des événements passés, corrélation entre l'intensité observée et la mortalité) semble plus appropriée ici que la modélisation à l'aide de paramètres strictement physiques. La mortalité d'un phénomène est en effet fortement liée aux comportements des individus pendant son occurrence (gens quittant la zone menacée en prenant leur voiture lors d'inondations, par exemple), ces comportements n'ayant probablement pas d'influence sur les dégâts aux bâtiments, par exemple.

La question du risque humain dans cette approche ayant été éclaircie, nous allons maintenant nous attacher à évaluer le résultat obtenu pour les risques matériels. Nous voyons dans l'histogramme suivant **la répartition des pixels pour les 8 classes choisies** :

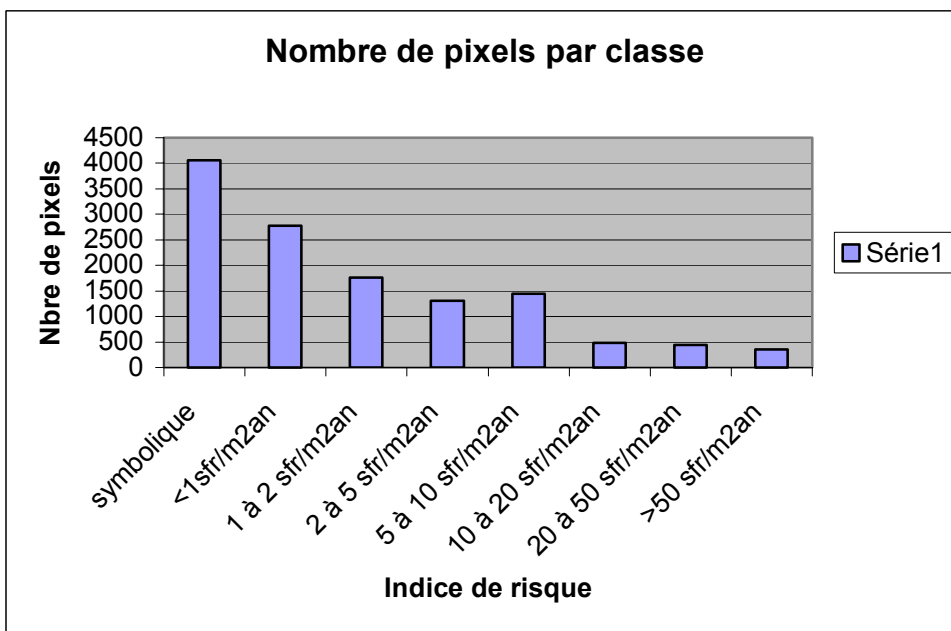


Figure 21 : Histogramme de la répartition des pixels

Nous constatons en premier lieu une association négative entre l'indice de risque et le nombre de pixels, et ceci de manière quasi linéaire. En effet, si ce n'est pour la classe de 5 à 10 CHF/m²*an, le nombre de pixel décroît constamment à mesure que l'indice de risque augmente. On peut également remarquer que la première classe représente à elle seule environ le tiers (32%) du nombre de pixels. Dans l'histogramme suivant est représenté **le coût total en milliers de francs par classe d'indice de risque** :

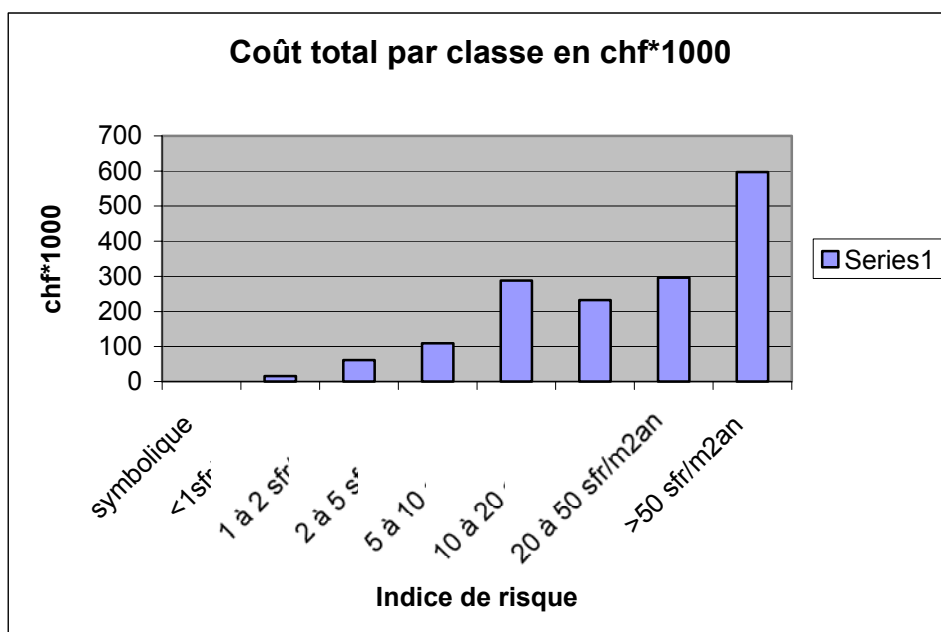


Figure 22 : Histogramme du coût par classe

Ce que nous observons ici est quasiment l'inverse de l'histogramme précédent, c'est à dire une association positive entre l'indice de risque et le coût total par classe. C'est également la même classe que précédemment qui perturbe la linéarité de l'association. On remarque également qu'ici la dernière classe, qui représente environ 4% du nombre de pixels, est responsable de près de 40% du coût occasionné par le cumul de toutes les classes. Le nombre de pixels et le coût par classe sont représentés conjointement dans cet autre histogramme :

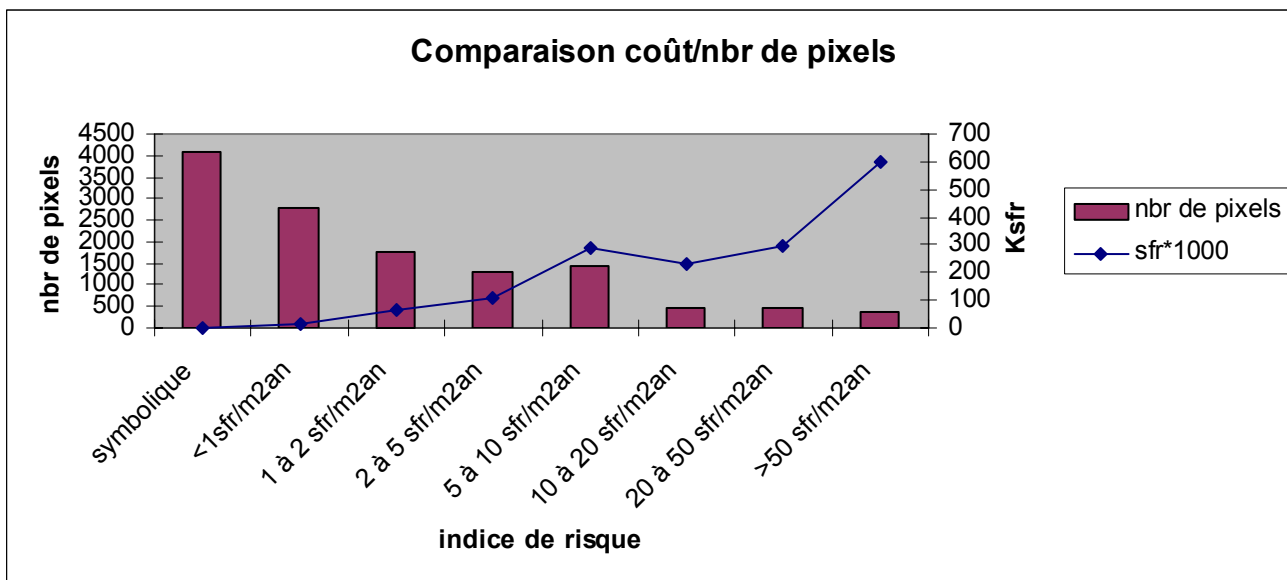


Figure 23 : Histogramme de comparaison coût par classe/nombre de pixels

Voici encore les mêmes données, représentées sous forme de tableau, avec en plus la proportion du total pour chaque classe :

Classes	Nombre de pixels	Coût classe (CHF)	Proportion du nbre total de pixels	Proportion du coût total
symbolique	4060	245	0.32	0.00
<1chf/m2an	2773	15'699	0.22	0.01
1 à 2chf/m2an	1762	61'442	0.14	0.04
2 à 5chf/m2an	1308	109'402	0.10	0.07
5 à 10chf/m2an	1442	288'397	0.11	0.18
10 à 20chf/m2an	482	231'952	0.04	0.15
20 à 50chf/m2an	444	295'926	0.04	0.19
>50chf/m2an	358	596'518	0.03	0.37
Total	12629	1'599'580	1.00	1.00

Si l'on se place d'un point de vue strictement pratique par rapport aux résultats obtenus, on peut affirmer que l'indice proposé est probablement fortement surévalué. Le coût total du risque d'inondation, au niveau matériel seulement, s'élève en effet à plus d'un million et demi de francs par an pour la seule zone du Bévieux.

Même si la zone en question a été justement choisie en fonction de son exposition au risque d'inondation, on peut difficilement imaginer une collectivité publique supportant une telle charge financière pour une zone d'un kilomètre comportant vraisemblablement moins d'une centaine d'habitants. Ceci dit, nous allons plutôt nous intéresser maintenant à l'influence des différents paramètres intervenant dans l'élaboration de l'indice, le fait de statuer sur l'ordre de grandeur dudit indice dépassant la portée de ce travail.

On peut probablement confirmer, au vu des éléments ci-dessus, la forte influence sur les résultats des seuils choisis pour la **fréquence**. Comme nous l'avons déjà mentionné, ces seuils sont ceux proposés dans les recommandations fédérales et sont en fait une adaptation des seuils employés en hydrologie. Si les recommandations fédérales vont plutôt dans le sens d'un traitement au cas par cas en ce qui concerne les objets, on peut considérer par contre que l'extension de ces seuils à l'ensemble de la gamme des phénomènes naturels relève davantage d'une approche intégrative et globalisante.

Ceci dit, on peut envisager de **minimiser l'influence de ces seuils** en travaillant uniquement sur la fréquence de deux manières : Premièrement, on peut multiplier le nombre de seuils, mais dans ce cas de figure, ce sont les données sur les temps de retour, déjà pas évidentes à obtenir, qui vont poser problème. L'autre manière pourrait être d'envisager un traitement statistique sur la base d'événements passés ou de données climatiques, de manière à obtenir des seuils individualisés. On peut considérer cette dernière option comme générant passablement de travail supplémentaire, ce qui est toutefois relatif dans la mesure où cette approche se destine à priori à un travail de détail à grande échelle. Nous reviendrons sur ce dernier point dans la partie suivante.

On peut appliquer plus ou moins les mêmes remarques aux seuils de **vulnérabilité**, tout en sachant que ceux-ci ont par contre été choisis de manière relativement libre, et que leur influence sur le résultat final est moins importante que l'influence des seuils de fréquence.

Ici également, il semble que davantage de précision doive passer par une approche de la correspondance intensité - vulnérabilité par type de phénomène.

Pour ce qui est de la **correspondance entre la valeur au m2 et les catégories d'objets**, l'analyse des résultats ne nous permet pas d'ajouter d'éléments significatifs aux remarques précédemment faites. Toujours par rapport à ces remarques, on pourrait effectivement envisager une forme de correction de l'indice obtenu, par exemple par le biais d'un logarithme et selon une procédure à définir.

Enfin, pour ce qui est de la question **sémiologique**, nous avons conservé la même symbologie que dans l'approche précédente, le fait de passer de 6 à 8 classes ne justifiant pas, à notre avis, de changement à ce niveau.

7 Réflexions et propositions

Nous allons maintenant dans cette partie nous attacher à comparer les deux approches entre elles, ainsi qu'à proposer des utilisations pour chacune d'elles. Si l'on s'en tient, au premier abord, à une comparaison d'ordre graphique, plusieurs éléments sautent aux yeux :

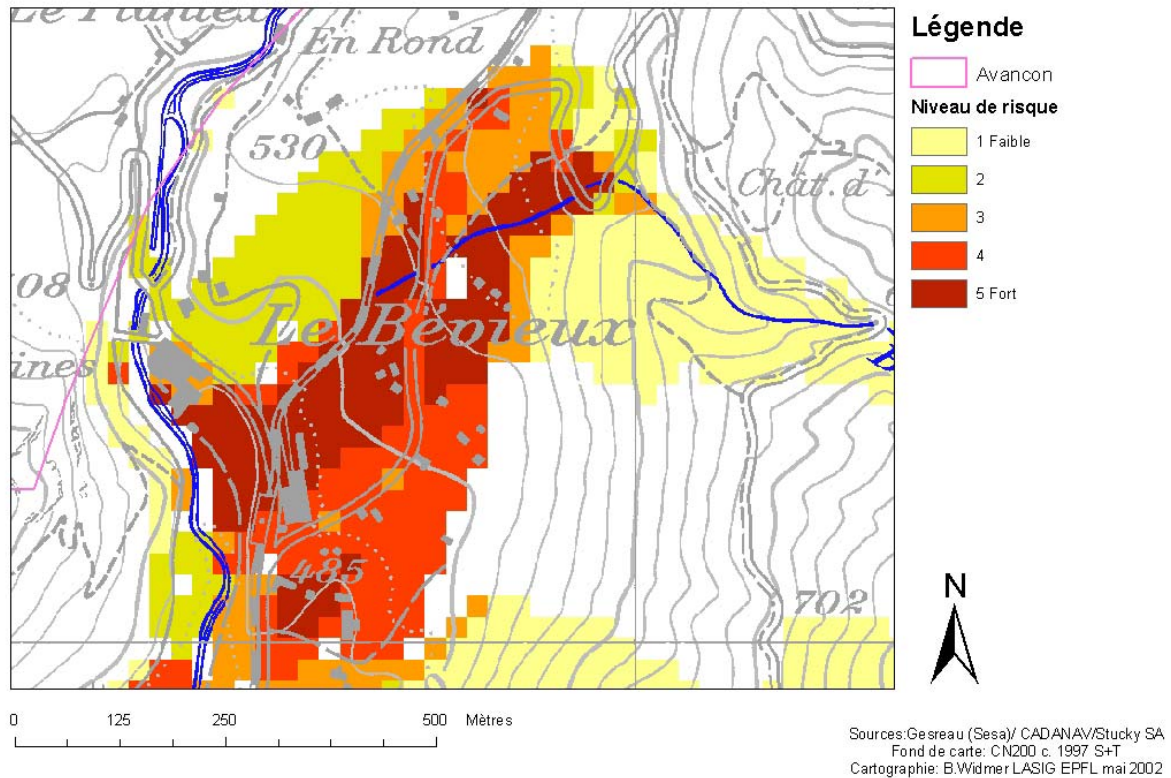


Figure 24 : Approche n°1 (risque matériel, variante 2, centré sur le Bévieux)

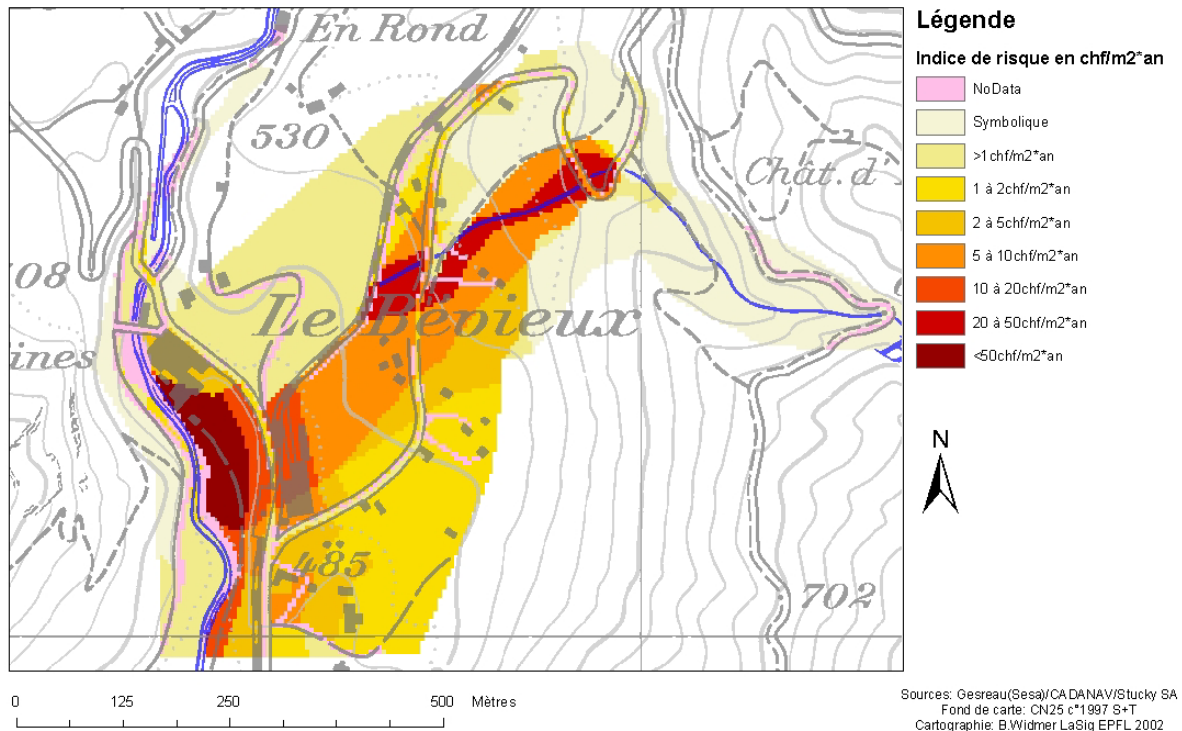


Figure 25 : Approche n°2 (Indice de risque matériel, le Bévieux)

Le premier élément marquant dans cette optique tient à la taille des pixels des zones à risques. Nous sommes en effet passé de 25m (mètres) de coté dans l'approche 1 à 5m de coté dans l'approche 2. Egalement, nous relevons que ce sont encore une fois les mêmes zones qui sont mises en avant du point de vue du risque, avec cependant une finesse et des nuances nettement plus importantes dans la figure 25 (cf. : grande diagonale centrale dans les deux figures). Enfin, certaines zones représentées comme ne présentant pas de risque dans la figure 24 sont devenues des zones dites « NoData » (pas de donnée) dans la figure 25 (lit de la rivière, routes et chemins notamment). Ceci est dû d'une part à la taille des « buffers » (cf. : glossaire) employés pour la rasterisation de certaines données vecteur (routes, chemin de fer) et d'autre part au « trous » dans le fichier des zones d'affectation (dessertes de villas, etc.).

Quelques remarque également au sujet de la résolution : L'emploi du maillage de 25m dans la première approche se justifie par la configuration des données de base, notamment le modèle numérique de terrain (MNT) et les cartes préliminaires de danger. Egalement, la carte de catégories d'objet ayant été établie par CADANAV dans le processus de priorisation possédant une maille de 25m, nous avons décidé d'employer dans un premier temps le même maillage pour l'établissement de notre propre carte des objets à protéger (cf. : 4.1. MCD). Ainsi, toutes les cartes de risque produites dans cette approche ont un maillage de 25m.

Dans la deuxième approche, par contre, en sachant que l'échelle est beaucoup plus grande, nous avons converti les zones d'affectation, ainsi que les routes et voies de chemin de fer (la zone en question ne comprend ni pylône électrique, ni objet Opam) de vecteur en raster avec un maillage de 5m, de manière à obtenir une carte des catégories d'objet plus précise. Nous avons procédé de même avec la carte de danger, en considérant que si nous avons une carte réelle comprenant séparément les intensités et les temps de retour à disposition, il serait ridicule de lui appliquer un maillage de 25m, bien trop grossier pour ce type de carte.

En effet, des exemples de telles cartes, trouvés dans les recommandations fédérales, nous montrent que l'échelle employée (et recommandée pour les cartes de danger) est le 1 : 5000^{ème}. Dans ce cas de figure, un pixel de 25m correspond à 5mm, ce qui paraît beaucoup d'un point de vue strictement graphique.

Les versions originales des cartes des figures 24 et 25 correspondent à une échelle de 1 :5000^{ème}. Il nous semble qu'à cette échelle, le maillage employé dans l'approche 1 est trop grossier. Nous réserverions ce dernier pour des échelles allant jusqu'au 1.25'000^{ème}, correspondant aux cartes indicatives de danger. D'un autre côté, le degré de finesse proposé dans l'approche 2 n'est peut-être pas des plus adapté lors de l'utilisation de plus petites échelles. La multiplication du nombre de pixels (multipliés par 25), augmentant d'autant la taille des fichiers, à surface couverte égale.

Il est cependant clair que rastériser avec une maille plus fine n'ajoute aucunement de l'information, si les données que l'on rastérise sont déjà grossières. Sur ce point, il n'est effectivement peut-être pas très pertinent d'employer des mailles de 5m pour établir des cartes de risque alors que la modélisation aboutissant aux cartes de danger se base sur un MNA comprenant une unique valeur d'altitude par carré de 25m de côté. Cependant, on peut considérer qu'on anticipe ici la très attendue extension du MNA laser à maille de 1m à toute la Suisse (actuellement surtout réservé aux zones urbaines)

Ces considérations, basées sur l'examen des cartes produites, sont en rapport direct avec l'utilisation que nous envisageons pour les deux approches. Ces dernières sont, à notre avis, plutôt complémentaires que concurrentes en terme d'échelle de représentation.

Nous suggérerions d'utiliser plutôt la première approche, plus facile à mettre en oeuvre, pour **identifier** des zones à risque prioritaires, en travaillant à une échelle moyenne (entre le 1 : 100'000^{ème} et le 1 : 25'000^{ème}). La deuxième approche pourrait elle être utilisée comme **aide à la décision** lorsque des zones particulièrement menacées sont identifiées et qu'il faut par exemple se décider à débloquer un budget (et évaluer la rentabilité de cette action) pour la construction d'un ouvrage de protection permettant de sécuriser la zone, ou lorsqu'il faut se prononcer sur une éventuelle évacuation.

Enfin, pour ce qui est des utilisateurs potentiels de ce type d'approches, nous voyons deux grands axes : les services publics concernés et les assurances. Pour ce qui est du **secteur public**, les compétences étant hiérarchisées du niveau communal au niveau fédéral, on peut penser que plus l'approche sera fine, moins

le niveau hiérarchique sera élevé. D'un autre côté, ceci dépend beaucoup du type de mesure de protection envisagé, si leur mise en place s'inscrit dans un projet ou constitue une action isolée, et du niveau de compétence requis.

Pour ce qui est des **assurances**, sur lesquelles l'influence de la pression économique est plus marquée, on peut penser que la deuxième approche propose un produit plus adapté.

Ceci dit, il faudrait encore déterminer si les économies ou profits envisagés compensent les coûts de mise en oeuvre d'une application réelle d'une telle approche, autrement dit si l'opération est rentable.

8 Conclusion

La question de l'évaluation du risque au sens large est une question commune à tous les êtres humains. Nous effectuons tous quotidiennement plusieurs de ces évaluations, sans même forcément s'en rendre compte : risque d'effectuer un achat et d'être déçu, risque de prendre la route et d'avoir un accident ou encore risque de sortir de chez soi et de rencontrer le voisin à qui l'on a pas envie de parler. La question du risque a ceci de fondamental que le risque porte atteinte à la sécurité et que la sécurité correspond hiérarchiquement au deuxième niveau de besoin fondamental (cf. : pyramide des besoins en sociologie), juste après les besoins physiologiques (se nourrir, dormir). Curieusement, c'est justement dans les pays les plus développés, là où justement la sécurité est la plus garantie, que la question du risque se pose le plus.

Quoi qu'il en soit, lorsque l'être humain évalue un risque, il fait intervenir un certain nombre de paramètres pour obtenir cette évaluation. Cette évaluation sera d'autant plus complexe que le nombre de ces paramètres sera important.

Il en va de même dans la question des risques naturels, ainsi que dans le présent travail. Dans les deux approches proposées, nous avons opté pour des expressions simples comportant peu de paramètres, pour plusieurs raisons.

Premièrement, dans une application concrète dans un SIG, les données doivent être disponibles, de bonne qualité et utilisables dans le SIG. Ensuite, la multiplication des paramètres rendent la gestion dans le SIG plus complexe, et peuvent induire un effet de fausse précision dans les résultats, pas forcément facile à déceler et d'autant plus grave si cela débouche sur une évaluation fautive, justifiée sur la base du nombre de paramètres. Enfin, la pluridisciplinarité liée à la question du risque naturel, oblige, lors de la mise en place de l'outil d'évaluation, à communiquer par le biais de plusieurs langages (informatique, hydrologique, géographique, etc.). La communication s'établissant notamment sur la base des moyens en matière de vocabulaire, ceci nous a incité à faire preuve de modestie dans notre étude.

Pour ce qui est des perspectives futures, il pourrait être intéressant de voir comment se comportent les méthodes proposées dans une étude concrète, avec des données de bases réelles, notamment en matière de cartes de danger, et de meilleures possibilités d'évaluation. Toujours au niveau de ces perspectives, il paraît important de mentionner qu'au niveau mondial, les catastrophes naturelles sont en augmentation continue depuis les années 60, ceci principalement parce que de plus en plus de gens habitent dans des zones à risque (BRYANT E.A., 1991, p.273).

Egalement, de nombreuses études climatiques, que ce soit au niveau suisse ou mondial, montrent une augmentation de l'occurrence de phénomènes extrêmes, pouvant déboucher sur des épisodes catastrophiques, (source : M. Rebetez) et s'attendent même à une affirmation de cette tendance dans les années à venir. Ces éléments remettent en question de nombreux éléments de l'évaluation du risque naturel, et notamment la question de la prise en compte des temps de retour des phénomènes.

9 Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Caroline Gassie et Régis Caloz du LaSig ainsi qu'Emmanuele Alexakis de Wsl pour leur encadrement tout au long de ce travail et leurs efforts de relecture.

Un grand merci à toute l'équipe du LaSig ainsi qu'à Sandrine Dürler, pour le cadre de travail enrichissant et stimulant.

Je tiens également à remercier Jean-Marc Lance du SESA et Richard Metzger de l'Hydram pour leurs précieux conseils.

Merci à Martine Rebetez pour sa disponibilité et pour m'avoir permis d'effectuer mon mémoire dans de si bonnes conditions.

Merci enfin à tous ceux qui m'ont soutenu, d'une manière ou d'une autre, pendant ces quelques mois.

10 Glossaire

Cette partie définit un certain nombre de termes, notamment d'ordre technique, présents dans l'étude. Cette liste, non exhaustive, est destinée à préciser (ou rappeler) certains points de détail si besoin est.

Attribut : Les attributs représentent les données de base décrivant les différentes entités et relations du modèle conceptuel. Chaque entité se voit donc ainsi assigner un certain nombre d'attributs par l'intermédiaire desquels on pourra interroger la base de données.

Buffer : Dans un SIG, zone tampon s'étendant à une distance définie d'un point ou d'une ligne, leur attribuant ainsi une surface.

Élément à risque : population, propriété, activité économique, service public ou bien environnemental situé dans un lieu exposé au danger, directement ou indirectement

Entité : Les logiciels de systèmes d'informations géographiques distinguent principalement 3 types d'entités sémantiques représentées par des tables. Il s'agit des **entités spatiales**, des **entités a-spatiales** et des **relations**. On entend par entité spatiale tout objet déterminé par des coordonnées dans un repère géographique donné et pouvant être directement représenté sur une carte. Les entités a-spatiales sont tous les objets pas directement représentables en tant que tel sur une carte, en particulier les attributs liés à une entité spatiale par une relation. Les relations, elles, constituent des tables permettant de faire les liens entre les différentes entités de la base de donnée.

Identifiant : Une table pouvant contenir plusieurs occurrences, il convient de faire la distinction entre les différentes occurrences, de déterminer parmi les attributs retenus celui ou ceux qui constitueront l'identifiant de la table considérée. Il s'agit en fait de déterminer un seul ou une combinaison d'attributs qui définissent de manière univoque chaque occurrence de la table.

Intensité (d'un phénomène) : appréciation de l'ampleur d'un phénomène dangereux (spécifique à chaque type de danger)

Modèle numérique d'altitude (M.N.A) : Fichier de type image comprenant une valeur d'altitude par pixel représentant la topologie de la zone considérée (Egalement appelé MNT ou modèle numérique de terrain).

Opam (objet) : Objet géographique (entreprise) présentant un risque particulier soumis à l'ordonnance (fédérale) pour la protection contre les accidents majeurs (OPAM).

Permafrost : Sol restant gelé tout au long de l'année

Phénomène : processus dangereux caractérisé par une géométrie et un mécanisme (naturel : inondation, avalanche, effondrement, etc..)

Pixel : Contraction de *picture element* (élément d'image), unité élémentaire constitutive d'une image. Le terme est utilisé notamment pour les images satellitaires numériques.

Raster (fichier) : Fichier dans lequel les unités d'observation sont les éléments d'une trame (pixels) constituant une maille régulière. Les caractéristiques du territoire sont décrites par des valeurs associées à chaque pixel.

Système d'Information Géographique (S.I.G) : Système permettant de centraliser et de stocker un grand nombre de données (géographiques ou autres), de les traiter selon les besoins de la décision et finalement de les restituer et les transmettre sous une forme adaptée aux attentes des destinataires (utilisateurs de la base de donnée).

Shapefile : Contraction de *shape* (forme) et de *file* (fichier). Format de fichier en mode vecteur propre à Arc View.

Table : Dans le monde relationnel, les tables sont utilisées à des fins de représentation des éléments du monde réel. Chaque table doit représenter uniquement un seul type d'objets.

Valeur W : Valeur d'un élément à risque W : valeur économique ou nombre d'unités de chaque élément à risque (homme, animal) situé en un lieu donné.

Vecteur (fichier) : Fichier dans lequel les unités d'observation sont représentées par des entités élémentaires : points (0 dimensions), lignes (1 dimension), surfaces (2 dimensions). Des caractéristiques descriptives peuvent leur être associées sous forme d'attributs, généralement gérées dans une base de données associée.

Vulnérabilité : degré de perte (ou de dommage) causé par un phénomène dangereux d'intensité fixée à un ou plusieurs éléments à risque

11 Bibliographie

OUVRAGES

- 1) BAILLY A., 1998, « *Les concepts de la géographie humaine* », Armand Colin, Paris
- 2) BORTER P., 1999, « *Risikoanalyse bei gravitaten Naturgefahren* », Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- 3) BRYANT E. A., « *Natural Hazards* », Cambridge University Press, Cambridge
- 4) CADANAV, 2002, « *Projet CADANAV. Rapport final-version provisoire* », EPFL, Lausanne
- 5) DENEGRÉ J, SALGE F., 1996, « *Les systèmes d'information géographiques* », Que sais-je, P.U.F., Paris
- 6) GOLAY F., CALOZ R., CLARAMUNT C., 1996, « *Les données hybrides :structures et opérations* », EPFL, Lausanne
- 7) LATELTIN O., 1997, « *Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire* », OFAT, OFEE , OFEFP, Berne
- 8) LOAT R., PETRASCHECK A., 1997, « *Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire* », OFAT, OFEE , OFEFP, Berne
- 9) MUSY A., 1998,« *Hydrologie appliquée* », *H*G*A*, Bucarest
- 10) Office fédéral des forêts, Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches,1984, « *Directives pour la prise en considération du danger d'avalanches lors de l'exercice d'activités touchant l'organisation du territoire* » Office fédéral des forêts, Berne, Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches, Davos

11) SMITH K., 2001, « *Environmental Hazards : Assessing risk and reducing disaster* », Routledge, London

12) TILLE D., 2001, « Conception et réalisation d'un géorépertoire pédologique », DGR-Sirs, Lausanne

13) ZEILER M., 1999, « *Modeling our world, the ESRI guide to geodatabase design* » ESRI, Redlands (US)

ARTICLES

D'ERCOLE R., 1994, « *Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologies, modes d'analyse* », Revue de Géographie Alpine, N°4.

INTERNET

Utilisation des S.I.G dans le développement durable :
<http://www.fao.org/sd/frdirect/gis/intro.htm>

Informations sur les S.I.G : <http://lasig.epfl.ch>

Informations sur le projet CADANAV : <http://lasig.epfl.ch/projets/cadanav>