

**Projet de recherche sur le thème :**

## **RISQUES NATURELS ET PRÉVENTION**

**Réalisé avec la contribution de la FONDATION MAIF**

**Titre du projet :**

### ***Risques naturels et montagne***

***Mouvements de versants et risques hydrologiques associés et induits.  
Évaluation des méthodes et moyens de prévention et analyse des  
retours d'investissement. Information préventive***

**Coordonnateur du projet : ARMINES-CGI**

*ARMINES : Association pour la recherche et le développement des  
méthodes et processus industriels*

*CGI : Centre de Géologie de l'Ingénieur de l'École des Mines de Paris*

**Partenaires : LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées**

**CETE Lyon, Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de Lyon**

**CEMAGREF, Centre d'Étude du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts**

**ONF-RTM, Office National des Forêts - Restauration des Terrains en Montagne**

*[Texte rédigé par **Roger Cojean**, ([roger.cojean@ensmp.fr](mailto:roger.cojean@ensmp.fr))*

*responsable scientifique du projet de recherche,*

*Crédit photographique et origine des figures sont indiqués en fin de texte]*

## SOMMAIRE

1.	Problématique de la recherche engagée .....	1
2.	Quelques concepts importants relatifs aux risques naturels.....	3
3.	Les principes de l'étude.....	6
4.	Des méthodologies intégrées pour l'analyse des mouvements de versant et des phénomènes torrentiels.....	8
4.1	Les phénomènes torrentiels.....	8
4.1.1	Le phénomène « laves torrentielles ».....	8
4.1.2	La Ravoire de Pontamafrey (Savoie) .....	9
4.1.3	Le torrent du Pousset (Savoie) .....	11
4.1.4	Le bassin versant de l'Arbonne (Savoie) .....	12
4.1.5	Arbres d'événements et arbres de défauts.....	18
4.2	Les glissements de terrain et versants rocheux instables .....	20
4.2.1	L'analyse des mouvements de versant .....	20
4.2.2	L'écroulement du Mont Zandila (Valtelline, Italie).....	22
4.2.3	Le glissement coulée de La Valette (Ubaye, Alpes-de-Haute-Provence).....	24
4.2.4	Le glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes) .....	27
4.2.5	Le versant instable de Séchilienne (Isère, France).....	32
5.	Les risques naturels dans le monde, l'intérêt économique des investissements préventifs, la maîtrise des risques .....	36
6.	Conclusion.....	39
	Annexe: plan de l'ouvrage de synthèse.....	42

## 1. PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE ENGAGÉE

Dans le domaine des « *risques naturels* » chacun a pu être témoin, direct ou non, d'événements de nature catastrophique ou simplement porteurs de dommages (inondations, glissements de terrain, éboulements). Il a pu s'interroger sur la façon d'y faire face pour préserver au mieux la sécurité des personnes ou pour atténuer les effets dommageables de ces événements.

Devant une situation perçue globalement « à risque », trois questions principales viennent à l'esprit :

- ↳ Comment identifier tous les *scénarios possibles et réalistes*?
- ↳ Comment caractériser les *paramètres d'intensité* de chacun de ces scénarios?
- ↳ Pour chacun de ces scénarios, comment préciser un *délai d'occurrence*?

Ces trois questions sont fondamentales, mais très difficiles. Les réponses sont pourtant très attendues pour définir les méthodes et techniques de prévention adaptées et le cas échéant les plans de secours nécessaires.

*L'analyse de scénarios* est donc une démarche clé. Elle nécessite une connaissance approfondie du milieu naturel, très souvent largement transformé par les actions anthropiques. Pour les applications visées, une pratique du « terrain » est nécessaire et doit s'appuyer sur des investigations géologiques et géomorphologiques précises, faisant appel aux techniques les plus classiques : le travail du géologue de terrain, équipé de sa carte, son marteau et sa boussole, comme les plus sophistiquées : la géodésie spatiale par exemple. Une bonne connaissance des lois de la mécanique et de l'hydraulique ainsi que des techniques de modélisation et de simulation numérique aujourd'hui disponibles est également indispensable pour caractériser correctement les processus de déformation et rupture de versants instables ou d'écoulements torrentiels par exemple. Une représentation tridimensionnelle sur support SIG (systèmes d'information géographique) est de plus en plus attendue. Enfin le retour aux références naturelles dont la mémoire peut être disponible dans les archives de divers services de l'Etat et sociétés d'assurance doit être une préoccupation constante, car lui seul permet l'analyse critique des résultats produits par des modèles qui ne seront jamais que des représentations fragiles de la réalité, du moins pour les applications objets de cette recherche.

Les décisions qui dériveront de ces investigations ont évidemment un coût pour la communauté nationale (dispositifs de surveillance, ouvrages de protection, décisions quant à l'aménagement de l'espace). Il est donc sain de s'interroger sur *les processus de décision* eux-mêmes et sur *la justification économique de la prévention*. Or il faut faire le constat que l'on ne dispose en général que d'une connaissance partielle du phénomène naturel concerné (par exemple : versant instable menaçant une vallée ou phénomènes torrentiels affectant un bassin versant), des facteurs déclenchants, des conditions de réalisation des divers scénarios possibles. Cela signifie que l'on est confronté à des « univers de décision » qui peuvent être qualifiés d'incertains, où l'information nécessaire et recherchée peut être totalement inaccessible ou présente mais objectivement non quantifiable ni probabilisable. Les critères de décision économique s'en trouvent alors difficiles à justifier. Dans ces situations, très communes, différentes stratégies de prévention apparaîtront possibles. Elles devront être évolutives, c'est-à-dire aptes à s'adapter à la prise en compte d'informations nouvelles qui ont des chances d'apparaître au cours du temps, et capables d'apprentissage au vu de celles-ci. Enfin elles devront éviter toutes décisions à caractère irréversible. Dans le domaine des risques naturels, il faut donc apprendre à *gérer les incertitudes*, sachant que les investigations de terrain, les méthodes d'analyse de scénarios, les simulations numériques d'événements et

le retour aux références naturelles et aux archives permettent d'apporter une véritable aide à la décision. On entre là dans le domaine de la gestion des risques ou du management des risques, objet d'étude des cindyniques ou sciences des risques.

La recherche présentée ici et soutenue par la Fondation MAIF a été portée dès l'origine par cette perspective, où viennent se confronter des approches scientifiques très diverses.

## 2. QUELQUES CONCEPTS IMPORTANTS RELATIFS AUX RISQUES NATURELS

### *Les processus ou aléas naturels*

Le terme *aléa* désigne habituellement le *phénomène ou processus naturel* (en anglais : *natural hazard*), avec ses composantes géographiques, géologiques, climatiques. Ainsi, dans le domaine des risques théoriquement assurables, l'un des leaders mondiaux de la réassurance (Munich Reinsurance Co. ou Munich Re) retient la liste suivante de phénomènes ou aléas naturels : séismes et tsunamis, éruptions volcaniques avec coulées de laves, pluies de cendres, nuées ardentes ou lahars, cyclones tropicaux (ouragans ou hurricanes, cyclones et typhons), cyclones extratropicaux (tempêtes d'hiver) et tempêtes de mousson, tornades, orages (de pluie ou de grêle), brouillards marins, glaces et dérives d'icebergs, inondations, mouvements de terrain, avalanches, vagues de froid, sécheresses, incendies de forêt.

Le phénomène ou aléa naturel présente différentes caractéristiques physiques (se rapportant à des notions d'énergie, de durée, etc.) que l'on peut regrouper sous le terme général d'intensité. Dans une zone géographique donnée, en fonction d'une intensité considérée, des probabilités d'occurrence en rapport avec des durées de référence peuvent lui être associées. Une notion de période de retour de l'aléa, avec cette intensité, peut être définie. Ou bien, se fixant une durée particulière, on peut définir les probabilités d'occurrence de l'aléa considéré pour différentes intensités.

Ainsi, dans le domaine des inondations de plaine, pour un cours d'eau particulier et en une zone géographique bien définie, on peut définir l'hydrogramme ou d'autres paramètres d'intensité (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement) de la crue centennale (période de retour). Cet aléa doit être considéré comme susceptible de se réaliser tous les cent ans avec une probabilité de 1 (événement certain), tous les 10 ans avec une probabilité de 0.1, tous les ans avec une probabilité de 0.01. Sa réalisation, une année particulière, n'implique *a priori* aucune conséquence sur sa probabilité d'occurrence l'année suivante!

Ces notions peuvent être formalisées d'un point de vue mathématique. Cependant il faut souligner que la quantification de l'aléa naturel n'est pas toujours possible. La complexité du phénomène naturel (séismes, laves torrentielles, etc.) peut y faire obstacle, de même que son caractère non répétitif (mouvements de terrain, etc.) ainsi que le manque de données statistiques le concernant (périodes de sécheresse, etc.). Le cas des inondations de plaine apparaît en fait le plus propice à une analyse quantitative et statistique.

Il faut de plus rester prudent quant aux extrapolations des données statistiques dans le temps. Elles ne sont possibles que si les paramètres du milieu physique (naturel ou anthropisé) ont peu varié entre la période sur laquelle s'appuient le traitement statistique des données et la durée sur laquelle est faite la prévision. L'hypothèse de stationnarité nécessaire pour justifier toute projection sur l'avenir de données issues du passé doit être vérifiée. Suivant les cas considérés, cette hypothèse peut être réaliste ou non.

Sur ce sujet, deux échelles d'analyse méritent d'être distinguées:

À une échelle locale, le milieu physique naturel a pu être modifié et il faut en tenir compte. Ainsi une urbanisation rapide ayant conduit à une imperméabilisation partielle d'un bassin versant peut modifier considérablement le bilan hydrologique de ce bassin versant et en conséquence la réponse du milieu à tout événement pluviométrique. Il s'en suit que des données statistiques sur l'aléa inondation, datant de la période précédant cette urbanisation, ne seront pas directement utilisables. De même, des dispositifs de renforcements mécaniques en falaises

instables contribueront à limiter les chutes de blocs et les caractéristiques de l'aléa impact de bloc et arrêt sur une zone d'épandage au pied de ces falaises seront modifiées.

À une échelle globale, le milieu physique naturel peut être soumis à des règles d'évolution, évidentes sur le très long terme même si elles sont très difficiles à expliciter (domaine de la géoprospective sur des échelles de temps de 10 000, 100 000 ans et plus : les « temps géologiques », avec des processus de changements climatiques aux conséquences majeures telles que glaciations, variations de niveau des mers ou des processus tectoniques). À une échelle de temps de moins long terme: 10, 100 ou 1 000 ans, pour lesquelles l'action de l'homme peut être notable, certains de ces changements globaux sont perceptibles et doivent être considérés (changement climatique global, etc.).

### ***Les dommages et la vulnérabilité***

Les phénomènes ou aléas naturels génèrent des **dommages** : pertes en vies humaines, destructions de biens matériels, destruction ou altération de systèmes de production, atteinte à l'organisation sociale et institutionnelle, effets sur l'environnement (ressources actuelles ou potentielles, cadre de vie).

Certains de ces dommages sont facilement quantifiables, d'autres difficilement. Ils peuvent être rapportés à la valeur du patrimoine présent dans la zone considérée et l'on peut alors définir la **vulnérabilité** de la zone : coût des dommages/valeur du patrimoine.

Cette vulnérabilité est fonction de l'intensité de l'aléa naturel et des mesures et dispositifs de prévention et d'atténuation des effets de l'aléa qui auront éventuellement été mis en oeuvre.

On peut distinguer différentes catégories de dommages et de coûts, par référence à un ouvrage donné : coût de l'ouvrage seul (supposé fortement endommagé ou détruit), coût de gestion de crise et autres coûts (coût de remise en service de l'ouvrage après réparation, coût de manque à gagner lié à l'arrêt de fonctionnement de l'ouvrage, coûts induits par les conséquences sur l'environnement de l'endommagement de l'ouvrage, coûts liés à la destruction de matériel associé à l'ouvrage et coûts de pertes en vies humaines). On peut retenir trois grandes ensembles de coûts : coûts matériels stricts, coûts environnementaux et coûts humains. Si l'on convient de monétariser ces différents ensembles, il est possible de procéder à des analyses économiques spécifiques, fonction des différentes catégories de coûts.

### ***Les risques naturels***

La notion de **risque naturel** (*en anglais : natural risk*) peut être définie de façon schématique par l'équation :  $\text{Risque} = \text{Probabilité d'occurrence de l'aléa} \times \text{Dommages}$

D'une façon mathématique, le risque lié à un aléa particulier, dans une zone géographique donnée, peut se définir comme l'espérance mathématique des dommages dus à la réalisation de l'aléa considéré pendant la durée de référence.

Si l'ouvrage a été dimensionné pour résister à une intensité particulière d'un aléa donné, le risque attaché à l'ouvrage sera réduit d'une certaine quantité. Cependant, chacun a l'intuition d'une limite économique à la réalisation de travaux qui seraient destinés à placer l'ouvrage dans un contexte de « risque nul », situation irréaliste.

Plus précisément, le coût des mesures de renforcement et de protection (coût additionnel de l'ouvrage) croît de façon « exponentielle » pour les fortes valeurs des paramètres intensité de l'aléa considéré. Il en résulte une notion d'arbitrage économique nécessaire pour définir une intensité optimale de dimensionnement au delà de laquelle il n'est pas économiquement raisonnable de chercher à protéger un ouvrage. Mais la décomposition du coût total en coût matériel, coût environnemental grave et coût humain permet d'adapter un raisonnement économique qui serait sinon trop brutal.

Il faut cependant rester prudent par rapport à ce type d'approche théorique. Ainsi, l'application de règles de construction adaptées à certains aléas peuvent générer une aggravation du risque pour d'autres aléas (par exemple on a pris conscience il y a peu, de la concertation nécessaire entre spécialistes du génie paracyclonique et du génie parasismique qui n'ont pas les mêmes exigences techniques vis-à-vis des ouvrages et structures à protéger).

Observons aussi que des ouvrages de protection (dimensionnés par référence à un événement d'intensité donné avec une période de retour définie) peuvent induire des décisions d'aménagement sur certaines zones ainsi « protégées ». Or ces zones, qui n'auraient pas été aménagées sans ces ouvrages de protection, restent très vulnérables par rapport à des événements de plus forte intensité et de périodes de retour plus grande. Ce débat fondamental concerne en particulier l'aménagement de certaines plaines inondables, « à l'abri » de digues de protection et de certains espaces montagnards, « à l'abri » d'ouvrages paravalanches.

Sans doute d'autres approches permettant d'orienter les décisions relatives aux mesures de prévention mériteraient d'être considérées, s'appuyant sur des principes qui ne ressortent pas tous des champs techniques et économiques, mais se réfèrent au domaine de l'éthique et impliquent la prise en considération de « tiers absents » : générations futures, environnement.

### 3. LES PRINCIPES DE L'ÉTUDE

La *rétro-analyse d'événements* réalisés, ainsi que *l'analyse de scénarios* d'événements en cours de gestation ou identifiés comme possibles dans divers contextes, ont constitué la démarche de base de ce projet de recherche. Des *monographies détaillées* ont ainsi été constituées, prenant appui sur des *fiches-types d'analyse de scénarios* (phénomènes torrentiels et mouvements de versant de grande ampleur) préalablement établies. Ainsi des phénomènes torrentiels ont été analysés en Tarentaise sur les bassins versants de l'Arbonne et la Ravoire de Bourg-Saint-Maurice (Savoie) et en Maurienne sur les bassins versants de la Ravoire de Pontamafrey, du Saint-Bernard et du Pousset (Savoie). Des glissements de terrain et coulées boueuses ont été étudiés dans la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence), des glissements rocheux et éboulements à Boulc-en-Diois (Drôme), à Barjac (Lozère) et aux Eaux-Bonnes (Pyrénées-Atlantiques). Des versants instables de grande ampleur ont été analysés à La Clapière (Alpes-Maritimes) et Séchilienne (Isère).

Les monographies établies ont pris appui sur :

- ❑ une connaissance préalable des sites concernés par les partenaires du projet ;
- ❑ des investigations de terrain complémentaires ;
- ❑ des études de laboratoire portant sur la caractérisation pétrophysique, rhéologique et géotechnique de matériaux ;
- ❑ des modélisations et des simulations numériques de processus de génération, écoulement et dépôt de laves torrentielles, ainsi que de déformation et rupture de versant.

Ces travaux sur situations-types se sont nourris d'*analyses bibliographiques* relatives aux événements « mouvements de terrain et risques hydrologiques associés et induits ». Des *enquêtes techniques* auprès des services de l'Etat et sociétés d'assurance ont apporté des données complémentaires utiles au diagnostic sur l'intérêt économique de la prévention. Pour certaines de ces monographies les scénarios d'événements possibles et réalistes, leurs caractéristiques d'intensité et leurs délais d'occurrence ont été précisés. Différentes stratégies de prévention ont pu être élaborées et leurs conséquences économiques établies.

Les *fiches-types* préparées ont permis d'homogénéiser les approches des différents partenaires. Elles rassemblent en un même document les principaux items considérés comme références nécessaires pour toute analyse d'aléa et de risque relative soit aux mouvements de versant, soit aux laves torrentielles.

Elles comprennent 3 parties:

- ❑ Partie 1 : une description du versant (pour les mouvements de versant) ou du bassin versant (pour les laves torrentielles) ;
- ❑ Partie 2 : une analyse des scénarios possibles de déclenchement, de propagation et d'arrêt des masses rompues (pour les mouvements de versant), ou de génération, de chenalisation et de dépôts des matériaux (pour les laves torrentielles) ;
- ❑ Partie 3 : une analyse de vulnérabilité et de risque, ainsi qu'une présentation des moyens de prévention et de réduction des effets.

Ainsi toutes sortes de scénarios réalistes peuvent être identifiés, avec pour certains de leurs aspects des investigations détaillées sur le terrain (cartographie géomorphologique, prélèvement d'échantillons de sol pour essais au laboratoire, etc.), des travaux de simulation



numériques (logiciels de trajectographie ou de propagation de laves torrentielles, etc.), des analyses de vulnérabilité du bâti ou des études d'ouvrages de protection.

A titre d'illustration, la fiche-type relative aux laves torrentielles comporte, pour la partie 2 (analyse de scénarios de génération, propagation et dépôt de laves torrentielles) les rubriques suivantes:

- Processus d'initiation et volumes mobilisables à partir des zones sources identifiées dans le bassin versant ;
- Processus d'écoulement et de chenalisation des matériaux ;
- Processus d'arrêt et de dépôt des matériaux.

Chacune de ces rubriques est renseignée de façons détaillées sur des paramètres géologiques, géomécaniques, hydrologiques, rhéologiques, cinématiques ou morphologiques. Ainsi, la première rubrique fait référence à une typologie de 12 processus possibles d'initiation et mobilisation de laves torrentielles (cf. 4.1.4).

La fiche-type relative aux mouvements de versant de grande ampleur, pour la partie 2 (analyse de scénarios) comporte les rubriques :

- Processus de déformation et de rupture possibles au niveau de la zone source ;
- Modes de propagation possibles de la masse déstabilisée sur les pentes inférieures ;
- Mécanismes possibles d'arrêt et de dépôt.

Chacune de ces rubriques est renseignée de façons détaillées sur des paramètres géologiques, géomécaniques, cinématiques et énergétiques. Ainsi, la troisième rubrique fait référence aux distances maximales susceptibles d'être parcourues par les matériaux, à la formation possible d'un barrage en fond de vallée avec ses caractéristiques (volume, hauteur, perméabilité, etc.), aux caractéristiques d'un impact des masses glissées sur un plan d'eau ou retenue de barrage (caractéristiques géométriques et temporelles de l'impact, mode de transfert d'énergie des matériaux solides à la masse fluide, etc.).

Même si toutes les rubriques ne peuvent être renseignées de façon quantitative, leur seule présence force à rechercher toutes les caractéristiques de scénarios possibles, ce qui conduit à de premiers diagnostics qui seront ensuite complétés avec l'appui d'autres approches de terrain et de simulations numériques si cela est possible.

Cette recherche d'une « *exhaustivité réaliste* » peut présenter quelques difficultés. L'une d'elles réside dans la crainte d'être trop alarmiste et de perdre de sa crédibilité de spécialiste en envisageant des scénarios qui peut-être ne se réaliseront jamais. C'est bien pourquoi l'observation de scénarios réalisés, disponibles dans diverses sources bibliographiques ou l'analyse détaillée des situations retenues dans le projet (monographies détaillées) constituent un point important du projet de recherche.

## 4. DES MÉTHODOLOGIES INTÉGRÉES POUR L'ANALYSE DES MOUVEMENTS DE VERSANT ET DES PHÉNOMÈNES TORRENTIELS

### 4.1 LES PHÉNOMÈNES TORRENTIELS

#### 4.1.1 Le phénomène « laves torrentielles »

Dans le cadre de cette recherche, des travaux déjà engagés par les partenaires sur les processus de génération de *laves torrentielles*, d'écoulement et de dépôt sur les cônes torrentiels ont été poursuivis.

Les ingénieurs et techniciens forestiers ont pu décrire ces phénomènes torrentiels parfois spectaculaires et menaçants que sont les écoulements de laves torrentielles. Considérons cette description d'un forestier des Alpes-de-Haute-Provence, témoin oculaire privilégié de ces phénomènes :

*« À mes pieds, le lit du torrent, profond de huit mètres environ et large de vingt-cinq mètres, est presque à sec, malgré l'orage. Mais regardant en amont, dans la direction des chutes qui se trouvent à cet endroit, je vois une immense masse noire qui s'avance comme un mur et presque sans bruit, descendant le lit du torrent. C'était la lave qui venait de la montagne et qu'il m'était donné d'observer dans toute son intensité. (...) C'est un amalgame de terre et de blocs de grosseurs variées, ayant à peine la fluidité du béton. En avant, à moitié prise dans cette boue très épaisse, une avant-garde de gros blocs cubant parfois jusqu'à cinq et six mètres cubes semble poussée par la lave. Ces rochers, qui sont entraînés pendant quelques minutes, sont engloutis dans le chaos qui les suit dès qu'ils trouvent un obstacle qui les arrête. Ils sont alors remplacés par d'autres, qui sont poussés et bientôt engloutis à leur tour. (...) Cependant cette lave devient de plus en plus liquide et dès lors animée d'une vitesse toujours croissante. L'eau, arrivant avec une grande force, forme des lames qui atteignent jusqu'à 2 mètres de hauteur. (...) Elles entraînent ainsi les blocs assez gros qui souvent paraissent à la surface, s'entrechoquent sans cesse et font un épouvantable fracas. (...) Enfin l'eau devient presque claire, se creuse un passage au milieu des débris. ».*

Comment identifier les facteurs déclenchant ces processus au cours desquels le torrent se transforme en une suspension de forte concentration volumique solide, capable de charrier de très gros blocs ? Comment identifier les zones sources de matériaux solides (anciennes moraines glaciaires, dépôts de pente, dépôts en transit dans le lit du torrent, etc.) prêts à être mobilisés à l'occasion d'un orage violent ou dans des conditions particulières de dégel des sols et suivants quels processus d'initiation ? Comment caractériser les volumes ainsi disponibles pour être pris en charge par l'écoulement torrentiel ? Suivant quelles lois rhéologiques et quels processus d'écoulement ces matériaux vont-ils progresser dans le lit du torrent pour endommager les seuils et barrages de correction torrentielle, obstruer les gabarits des ponts et franchir les berges, submerger le cône torrentiel et détruire des habitats, couper des voies de communication ?

Derrière ces questions se profile l'analyse de scénarios qui doit rassembler divers spécialistes de l'analyse des risques d'une façon générale, mais aussi des spécialistes dans les domaines des sciences de la Terre, des sciences mécaniques et des sciences hydrologiques. Arrêtons nous sur quelques scénarios ayant fait l'objet d'investigations spécifiques dans le cadre de cette recherche. Leur description est instructive.

#### 4.1.2 La Ravoire de Pontamafrey (Savoie)

Divers auteurs ont étudié les coulées boueuses de cet affluent de l'Arc, la Ravoire de Pontamafrey en vallée de Maurienne). En effet, au printemps de l'année 1965, ce torrent produisit des coulées boueuses et laves torrentielles destructrices, endommageant les habitations du village de Pontamafrey, situé à la confluence du torrent avec l'Arc, coupant la route nationale N6 et la voie ferrée Paris-Turin (Figure 1).



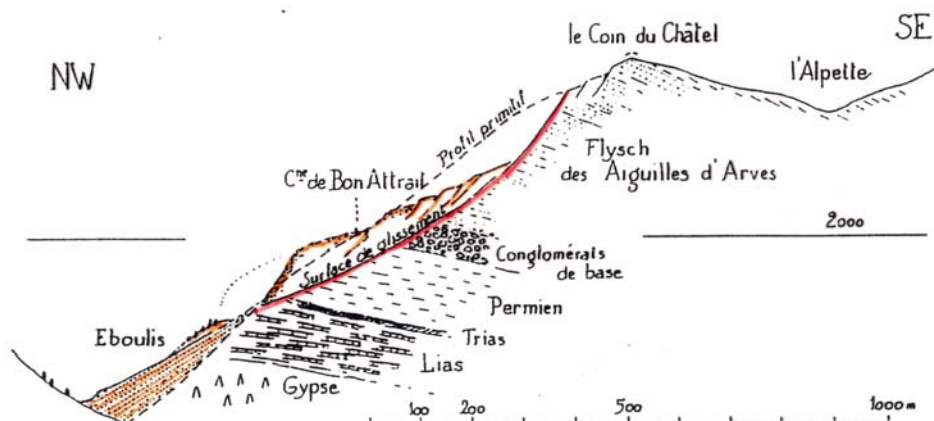
**Figure 1:** Lave torrentielle envahissant le village de Pontamafrey en 1965 (Savoie, France), Document d'archive ONF-RTM.

Le bassin versant de ce torrent, de superficie 12 km<sup>2</sup> environ, est dominé par des crêtes culminant à 2 700 m d'altitude (Figure 2). Un glissement de terrain, le glissement de Bon-Attrait affecte les hautes pentes en rive gauche et représente la zone source, zone de départ des laves torrentielles.



**Figure 2:** Le bassin versant de la Ravoire et le glissement de Bon-Attrait

La base du versant est constituée d'une épaisse masse de gypse, base de l'unité ultra-dauphinoise des Aiguilles d'Arves, dont le flysch forme les crêtes du massif du Grand-Coin (Figure 3). À la suite de ce glissement, des masses considérables de matériaux ont été mobilisées au printemps 1965 après une période pluvieuse.



**Figure 3:** Coupe géologique du glissement de Bon-Attrait (d'après J. Goguel, 1968)

Pendant plusieurs semaines, plus de 300 000 m<sup>3</sup> de matériaux se sont écoulés en laves torrentielles jusqu'à la vallée de l'Arc. Ces laves prenant naissance dans la zone de glissement, à 2 000 m d'altitude environ, rejoignaient le cône de déjection 6 km plus loin, à la cote 500 m.



**Figure 4:** Glissement de Bon-Attrait, zone source principale des laves torrentielles dans le bassin versant de la Ravoire de Pontamafrey

Des volumes considérables, de quelques millions de m<sup>3</sup>, sont aujourd'hui encore mobilisables dans cette zone source qui a progressivement évolué en talus d'éboulis très instable (Figure 4), tandis que des processus d'évolution régressive vers l'amont du versant se

développent. Différents scénarios d'occurrence de laves torrentielles ont été analysés en fonction des volumes susceptibles d'être libérés. Certains d'entre eux pourraient être catastrophiques, malgré les travaux de correction active et passive réalisés et l'existence de dispositifs de surveillance.

#### **4.1.3 Le torrent du Pousset (Savoie)**

Certains torrents ne se laissent pas facilement « corriger » par les forestiers, spécialistes de la Restauration des Terrains en Montagne (service RTM de l'ONF). Ainsi, le torrent du Pousset, affluent de l'Arc, enregistre régulièrement des crues majeures, dont la mémoire est conservée dans les archives RTM. A titre d'exemple, les années 1741, 1878, 1910, 1948, 1970, 1978, 1981, 1995 ont été marquées par des événements de type « laves torrentielles » qui pouvaient barrer partiellement le lit de l'Arc, entraînant parfois la formation d'un lac en amont et donc l'inondation de la vallée et générant des phénomènes d'érosion violente vers l'aval.

Le bassin versant de ce torrent est entièrement localisé dans l'unité tectonique de la « zone houillère briançonnaise », intensément plissée et faillée, constituée de grès, pélites et couches de houille transformée en anthracite. Une grande partie du bassin versant, qui s'étend sur 4,5 km<sup>2</sup> environ, fait partie d'un mouvement de versant de grande ampleur, hérité du dernier retrait glaciaire et encore légèrement actif aujourd'hui. Ainsi le torrent évide une masse de terrains très fortement déstructurés et s'enfonce profondément entre des berges de 5 à 10 m de hauteur par endroit. Le sous-cavage de ces berges conduit à des effondrements successifs et à la génération de glissements importants en constante évolution régressive.

La situation n'est guère plus sécurisante si l'on considère le cône de déjection du torrent et sa confluence avec la rivière en fond de vallée. Les Figure 5 et Figure 6 illustrent les dommages qui peuvent résulter de ces laves torrentielles. La situation actuelle de ce secteur s'est cependant nettement améliorée depuis le recalibrage du lit de l'Arc et les divers aménagements réalisés à l'occasion de la construction de l'autoroute de Maurienne.

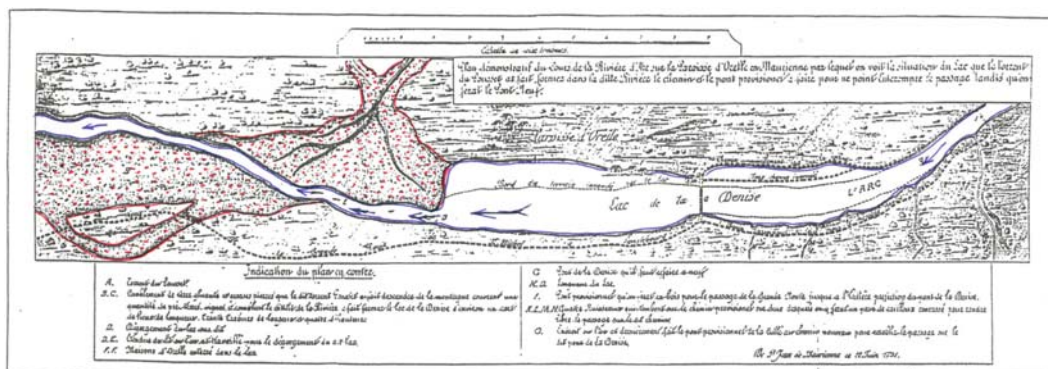


**Figure 5:** Le torrent du Pousset, alluvionnant à la confluence avec l'Arc, lui-même en crue, provoque l'envahissement de la chaussée de la route nationale N6 et l'érosion des rives opposées.



**Figure 6:** Dommages sur la route nationale N6 et la voie ferrée Paris-Turin, après la crue de l'Arc et l'activité torrentielle du Pousset en octobre 1994.

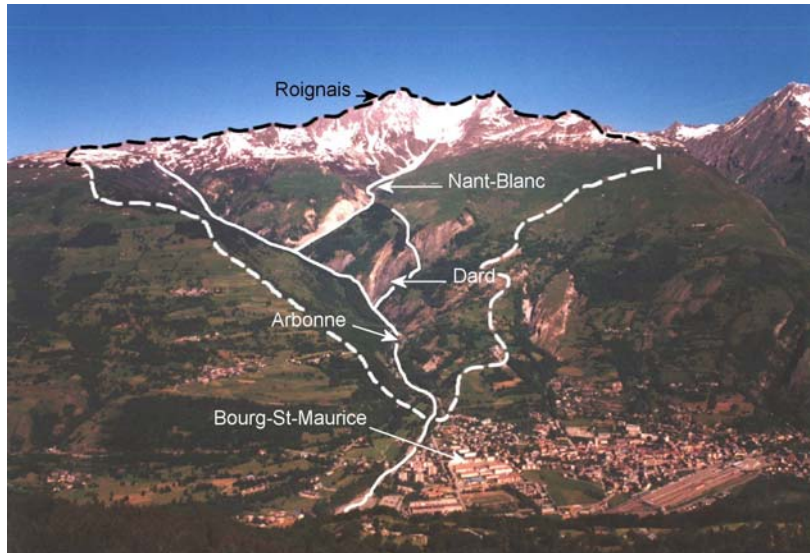
Le document d'archive de la Figure 7 montre les conséquences d'un événement comparable en 1741, relaté par P. Mougin dans son ouvrage de référence « Les torrents de Savoie ».



**Figure 7:** Lave torrentielle du Pousset et crue de l'Arc, juin 1741 (d'après P. Mougin, 1914)

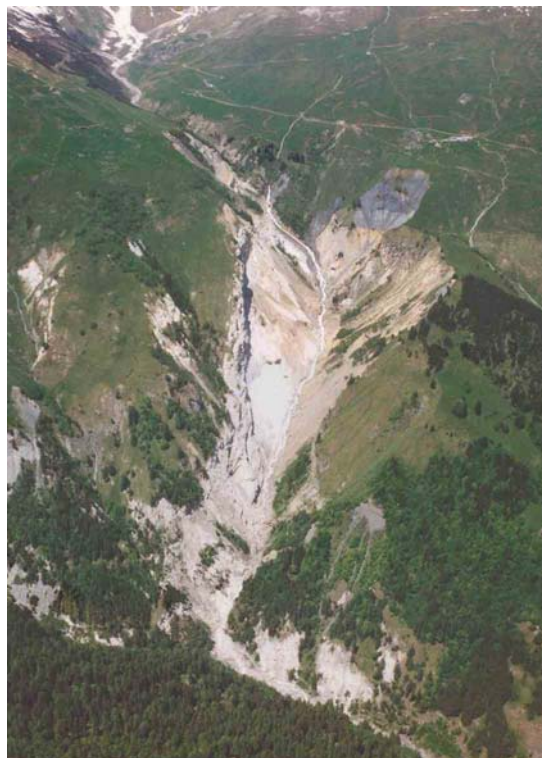
#### 4.1.4 Le bassin versant de l'Arbonne (Savoie)

Pour les études de scénarios développées dans ce projet de recherche, l'approche géomorphologique de terrain constitue une démarche initiale essentielle. Elle a permis, sur le bassin versant de l'Arbonne (Savoie) (Figure 8), d'identifier, caractériser et cartographier les principales zones sources, à partir desquelles se génèrent les laves torrentielles qui peuvent atteindre le cône de déjection du torrent, avant la confluence avec l'Isère. La ville de Bourg-Saint-Maurice est en partie construite sur ce cône de déjection.



**Figure 8 :** Vue générale du bassin versant de l'Arbonne

Le bassin versant, de 15 km<sup>2</sup> de superficie environ, se développe entre les cotes 2 995 m (pic du Roignais) jusqu'à la cote 800 m (confluence avec l'Isère) dans une zone de contact tectonique complexe, où la zone briançonnaise, constituée de grès, schistes et anthracite, vient chevaucher la zone valaisanne, constituée par les flyschs de Tarentaise. Le contact entre ces deux unités principales se réalise par l'intermédiaire de la zone des gypses et cargneules (Figure 9) et diverses écailles tectoniques.



**Figure 9:** Panorama des gorges du Nant-Blanc. Zone source de laves torrentielles, avec glissement et éboulement des versants de gypse et cargneule, sous-cavage des berges, reprise de dépôts torrentiels en transit en partie inférieure des gorges.

Travaux géologiques de terrain, photo-interprétation, échantillonnages de matériaux et caractérisations pétrophysiques et géotechniques au laboratoire ont conduit à l'établissement d'une carte géomorphologique détaillée orientée vers les principaux processus d'érosion des sols et de mouvements de versants (Figure 10). Des travaux de simulations numériques réalisés sur certaines zones sources ont permis d'illustrer les conditions de déclenchement résultant de la montée progressive d'un niveau piézométrique ou de la saturation des terrains par la descente d'un front d'infiltration (Figure 11).

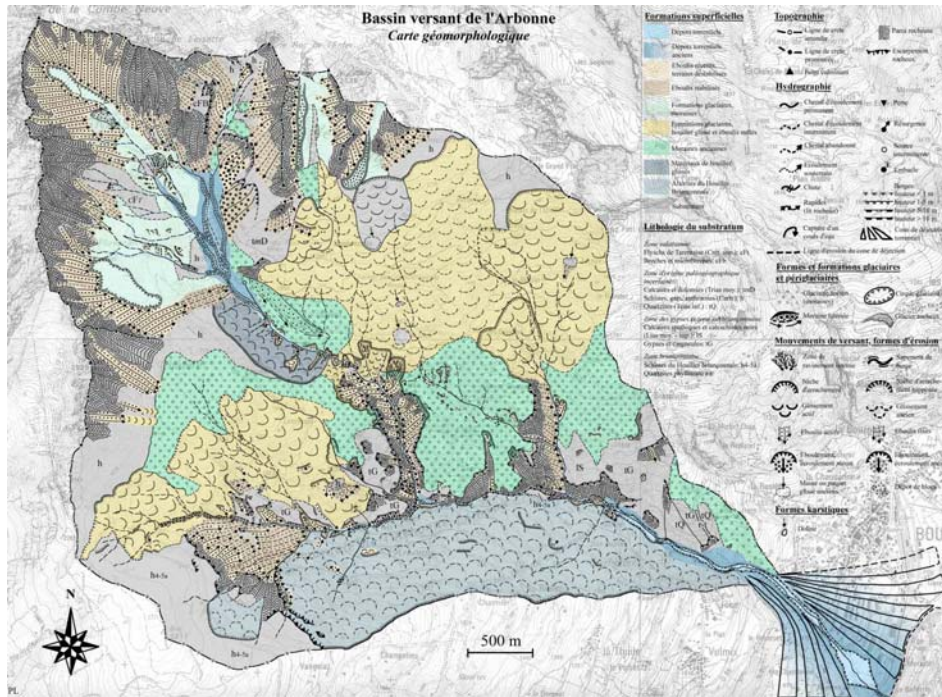


Figure 10: Carte géomorphologique du bassin versant de l'Arbonne (d'après P. Laugier, 2002)

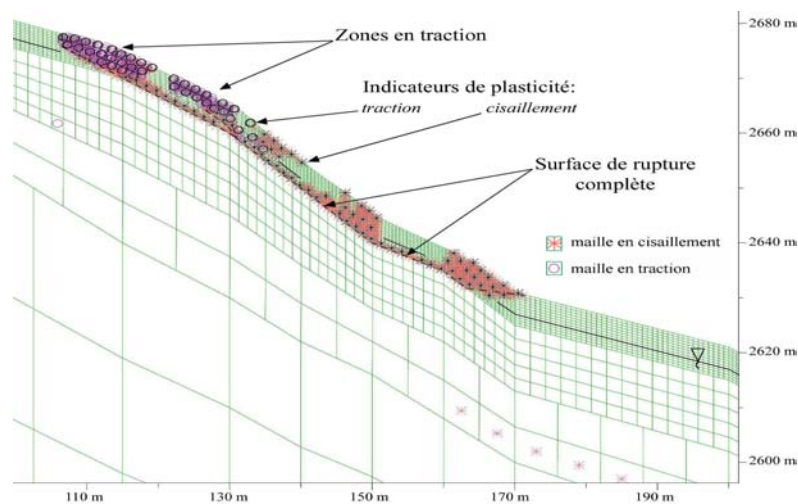


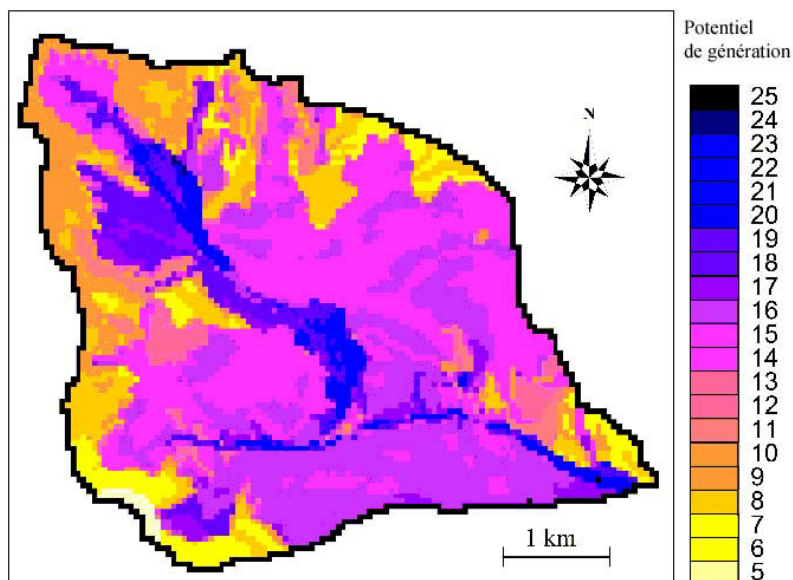
Figure 11: Simulation numérique d'une initiation par glissement de terrain, logiciel Flac (d'après P. Laugier, 2002)



Une méthodologie de cartographie de l'« Aléa génération de laves torrentielles » (ARMINES-CGI) a été établie, prenant appui sur l'identification de cinq facteurs de prédisposition majeurs. Ces facteurs, représentés par des indices prenant des valeurs numériques de 1 à 5, sont les suivants :

- ❑ pente des terrains ;
- ❑ conditions géologiques et hydrogéologiques ;
- ❑ érodabilité (incluant le rôle de la végétation) et mouvements de versant ;
- ❑ caractéristiques géotechniques (granularité) ;
- ❑ volumes disponibles à proximité du lit du torrent.

Chacun de ces facteurs a fait l'objet d'une cartographie. L'utilisation d'un outil SIG a permis de tester différents modes de pondération et d'agrégation des facteurs et de retenir la solution la plus pertinente, par comparaison avec notre connaissance du terrain et des événements laves torrentielles (Figure 12). Cette cartographie peut ainsi servir de base à différents projets de stabilisation des terrains et reboisement qui viseraient à intervenir le plus en amont possible par rapport aux phénomènes de génération de laves torrentielles.

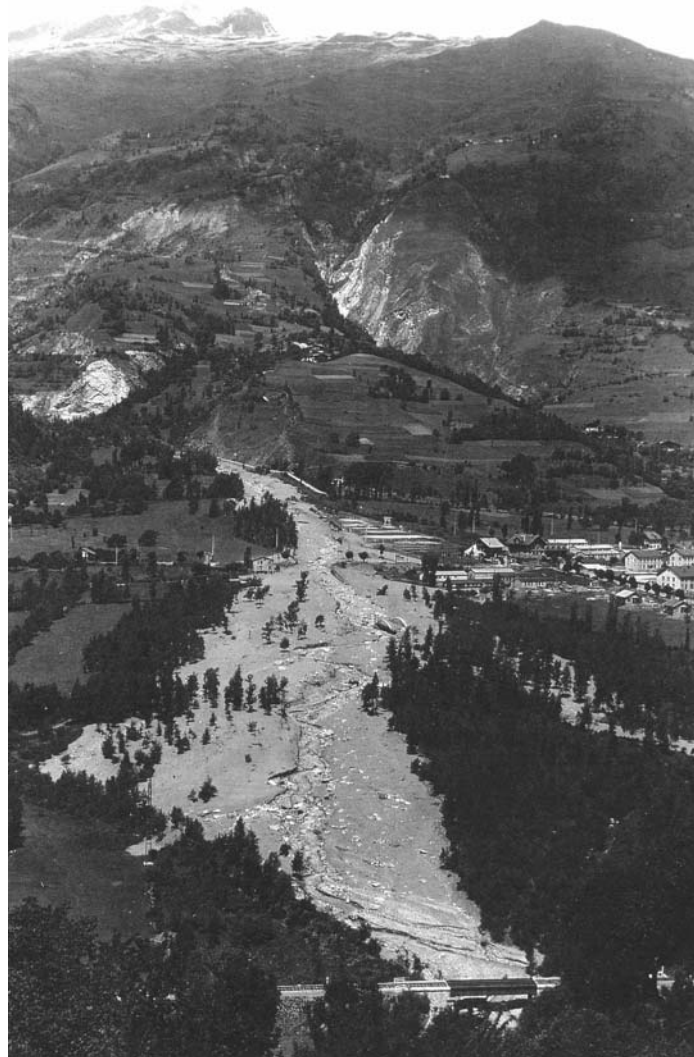


**Figure 12:** Carte de synthèse « Aléa génération de lave torrentielle », SIG PC Raster, Université d'Utrecht (d'après N. Cabane, 2001)

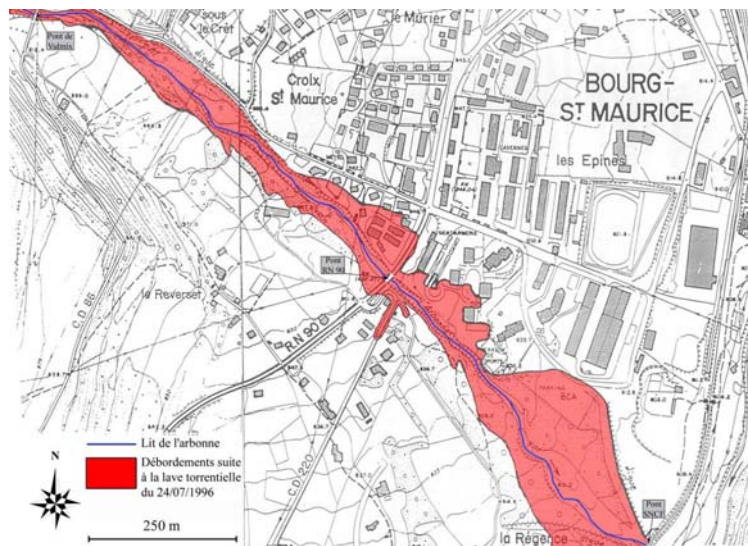
Les processus de génération (terme incluant l'initiation et la mobilisation) des laves torrentielles ont fait l'objet d'investigations particulières qui ont conduit à l'identification de 12 types généraux bien identifiés dans divers contextes géomorphologiques et hydrologiques (un grand nombre de ces processus peuvent se réaliser sur le bassin versant de l'Arbonne) :

- Type 1 : Erosion par impact de gouttes de pluie et de grêlons ;
- Type 2 : Ruissellement intense, érosivité créant rigoles et ravines ;
- Type 3 : Rupture de poches d'eau sous-glaciaires ;
- Type 4 : Fonte du permafrost et des lentilles de glace dans les sols gelés, fonte du manteau neigeux ;
- Type 5 : Liquéfaction de dépôts de pente granulaires ;

- Type 6 : Glissements de terrain mobilisés en coulées boueuses ou directement en laves torrentielles ;
- Type 7 : Mobilisation de formations de pente par brusque apport d'eau aux points d'émergence d'écoulements souterrains karstiques ;
- Type 8 : Glissements actifs fournissant du matériau solide au torrent ou liquéfiant par impact les dépôts saturés du torrent ;
- Type 9 : Eboulement ou glissement de terrain rapide bloquant le lit du torrent, puis mobilisation des matériaux en laves torrentielles ;
- Type 10 : Sous-cavages et ruptures de berges hautes et instables du torrent ;
- Type 11 : Mobilisation de dépôts de laves torrentielles en transit dans le chenal, due à l'élévation du niveau piézométrique de l'écoulement hypodermique et aux forces érosives de l'écoulement de surface ;
- Type 12 : Rupture de barrage naturel (« embâcles » de blocs ou de troncs d'arbres) dans le lit du torrent, puis impact de la vague sur des dépôts torrentiels saturés et mobilisés en laves torrentielles.

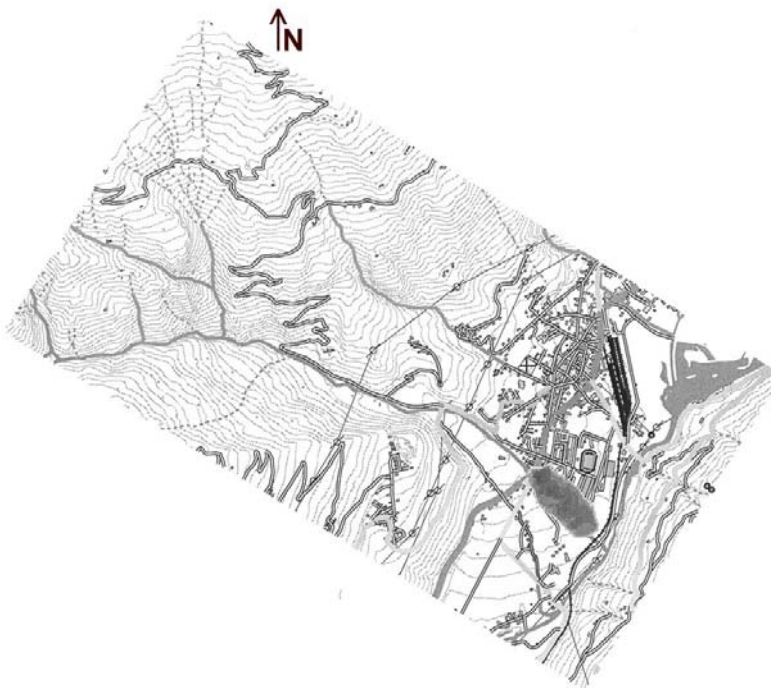


**Figure 13:** Débordement sur le cône de déjection lors de la crue de 1948



**Figure 14:** Débordement sur le cône de déjection lors de la crue de 1996

Une fois les matériaux mobilisés et engagés dans le lit du torrent, la caractérisation du comportement rhéologique du fluide est nécessaire ainsi que l'établissement de modèles d'écoulement susceptibles de simuler l'écoulement réel dans le lit du torrent avec d'éventuels débordements des berges et étalements sur le cône de déjection. Un modèle de comportement de type Herschel-Bulckley, reconnu comme valable pour les laves torrentielles qualifiées de boueuses (par opposition aux laves granulaires moins communes) est utilisé (CEMAGREF).



**Figure 15:** Simulation numérique de l'étalement d'une lave torrentielle de 300 000 m<sup>3</sup> sur le cône de déjection de l'Arbonne, à partir du pont de la route nationale (d'après D. Laigle, 2002)

Des modèles d'écoulement 1-D en chenal et 2-D d'étalement sur une surface de topographie connue et dérivée d'un Modèle Numérique de Terrain sont utilisés. Une analyse paramétrique permet d'identifier des scénarios critiques de débordement et d'obtenir des simulations des surfaces susceptibles d'être recouvertes par les dépôts de laves torrentielles. Des études de sensibilité des résultats numériques aux différentes hypothèses de calculs et paramètres du modèle sont réalisées. Des validations des modèles, par comparaison avec des événements réels (Figure 13 et Figure 14), sont réalisées. Enfin, des procédures de traitement des données de calcul des modèles numériques sont réalisées afin de pouvoir représenter ces données dans un environnement géoréférencé (Figure 15).

#### 4.1.5 Arbres d'événements et arbres de défauts

Il est clair que les éléments précédemment présentés sont à la source d'une analyse de scénarios pertinente. Celle-ci peut prendre appui sur des techniques d'analyse héritées de l'analyse des risques industriels. En effet, on peut observer qu'un bassin versant susceptible de générer des laves torrentielles constitue un « système géomorphologique et hydrologique » présentant un amont et un aval (notion que l'on retrouve aussi dans les systèmes industriels, les process de traitement, etc.). Dans un bassin versant on peut identifier des facteurs déclenchants (avec les « arbres d'événements » correspondants, *event tree method*), susceptibles d'entraîner des conséquences dommageables pour l'aval. De même, considérant un enjeu particulier (digue de protection, voie ferrée) dans ce bassin versant ou sur le cône de déjection du torrent, il importe de rechercher alors tous les scénarios réalistes susceptibles de conduire à des effets dommageables sur cet enjeu (avec les « arbres de défauts » correspondants, *fault tree method*). La recherche des facteurs déclenchants et des « composants » potentiellement défaillants, les tentatives pour cerner les probabilités de déclenchement et de défaillance des constituants des systèmes et comprendre les enchaînements possibles doivent inspirer nos démarches d'analyse de scénarios dans le domaine des risques naturels.

Avant d'appliquer ces méthodes, une connaissance approfondie du milieu est évidemment nécessaire et doit s'acquérir par des investigations de terrain et de laboratoire, de nature géologique, géomorphologique, hydrogéologique et géotechnique. L'établissement de fiches-type d'analyse de scénarios, la réalisation d'une cartographie de facteurs de prédisposition et d'un zonage de l'aléa « génération de laves torrentielles » participent de cette démarche. Une recherche d'archives (en particulier aux services de Restauration des Terrains en Montagne de l'ONF) relatant l'activité torrentielle passée reste évidemment indispensable afin d'évaluer les intensités et fréquences des phénomènes torrentiels et comprendre le comportement hydrologique du bassin versant.

Différents arbres d'événements et arbres de défauts, relatifs au bassin versant de l'Arbonne ont été ainsi construits. Ils ont permis de mieux définir la gamme des scénarios possibles pour diverses situations climatiques conduisant au déclenchement de laves torrentielles.

L'étude de divers arbres d'événement conduit à identifier un ensemble de séquences qui se différencient par les volumes mobilisés et le comportement des ouvrages de protection en place. Ces dispositifs de protection (barrages, digues situées en amont immédiat de la route nationale pour canaliser un grand volume de lave et de crue torrentielle, lit du torrent dégagé de tout dépôt dès le sommet du cône de déjection) jouent un rôle fondamental dans le

déroulement des séquences. De même, le dimensionnement de certains ouvrages de franchissement du lit de l'Arbonne (route nationale, voie ferrée), par leur gabarit, interfèrent avec le déroulement de l'événement. Enfin le mode de remplissage de la plage de dépôts, lors des arrivées des laves successives, contrôle d'éventuels processus de débordement sur le cône de déjection.

L'étude des arbres de défaut et l'inventaire des dommages possibles, contre lesquels il importe de se prémunir, conduisent ainsi à souligner l'importance des situations suivantes :

- dommages aux digues canalisant le lit du torrent dans son parcours à l'entrée du cône de déjection ;
- obstruction du passage supérieur de la route nationale N90 au-dessus de l'Arbonne, avec débordements latéraux ;
- dommages concernant des habitations et aménagements divers sur le cône de déjection et résultant de l'occurrence d'une lave de fort volume comblant l'espace aménagé en plage de dépôt dans la partie inférieure du cône de déjection et débordant de cet espace ;
- dommages à la voie ferrée en partie aval du cône de déjection.

Pour ces deux méthodes, la succession des événements considérés peut être analysée dans le cadre de la théorie des graphes, prenant en compte des probabilités d'occurrence pour chacun des événements considérés, analysant l'indépendance ou non de ces événements.

Dans les situations étudiées il faudrait être en mesure d'attribuer des probabilités d'occurrence à chaque événement élémentaire et aux séquences en résultant. Dans le cas des systèmes industriels une analyse des fréquences des pannes des composants permet de déterminer un taux de panne pour chacun d'entre eux et de développer une telle approche probabiliste. Mais les systèmes naturels sont fort complexes et nos données d'archives, très précieuses, sont cependant insuffisantes pour tirer des conclusions de nature statistique sur des événements initiateurs qui nous semblent par ailleurs fortement non stationnaires. On pourrait espérer avoir des éléments plus concrets sur les taux de défaillance partielle ou totale des ouvrages de correction torrentielle, du bâti, de la voirie. La connaissance des types de dépendance entre ces défaillances possibles et la prise en compte de probabilités conditionnelles permettraient de définir la probabilité d'occurrence de telle ou telle séquence identifiée comme réaliste.

Nous sommes encore loin de cet objectif, peut-être d'ailleurs bien théorique. Cependant, le seul développement de la démarche d'analyse des arbres d'événements et des arbres de défauts a le mérite de forcer *la recherche de scénarios réalistes* et de les « révéler » en quelque sorte, ce qui permet alors de concevoir les dispositifs ou ouvrages permettant de limiter les dommages qui pourraient résulter de tels scénarios et de mettre en œuvre les méthodes de surveillance adaptées.

## 4.2 LES GLISSEMENTS DE TERRAIN ET VERSANTS ROCHEUX INSTABLES

### 4.2.1 L'analyse des mouvements de versant

Les glissements de terrain, et mouvements de versant d'une façon générale, représentent une famille très diversifiée. Dans le domaine alpin, le creusement quaternaire des vallées a préparé de multiples zones de versant prédisposées à l'instabilité. Ne subissant que quelques retouches sous les climats actuels, ces zones portent tout l'héritage morphologique des périodes glaciaires et continuent d'évoluer lentement ou par crise. Cela peut être le cas de versants de moyenne ou grande ampleur qui évoluent très lentement et qui nous semblent stables uniquement parce qu'ils ne sont pas l'objet de mesures précises. Dans d'autres contextes, l'action directe de l'homme peut accélérer une évolution naturelle, quand sont engagés des travaux mettant en cause imprudemment des équilibres précaires.

Les structures géologiques déterminent les *facteurs de prédisposition* à l'instabilité. Travaux géologiques de terrain, prospections géophysique, sondages, télédétection, etc. permettent de bien identifier ces facteurs de prédisposition qui s'imposeront lors de la conception des modèles numériques qui seront élaborés par la suite. La caractérisation des *matériaux constitutifs* (sols et roches, massifs de sols et massifs rocheux) représente une deuxième étape essentielle où géologues, mécaniciens des sols et mécaniciens des roches doivent coopérer. Prenant appui sur la caractérisation minéralogique et micro-structurale des matériaux, l'étude des *comportements rhéologiques* sous divers types de sollicitations mécaniques et hydriques s'impose au laboratoire et in situ. Elle peut être très difficile, de par la complexité et la variabilité des structures et des matériaux géologiques. Les moyens expérimentaux d'aujourd'hui permettent cependant des progrès constants dans l'étude des comportements statiques ou dynamiques des sols saturés ou non saturés, des roches et des discontinuités de toutes natures. Les comportements à long terme des matériaux et les processus de vieillissement doivent aussi être analysés, prenant en compte tous les aspects mécaniques et physico-chimiques.

*Les processus de déformation, les différents stades de rupture ou de réactivation d'anciennes surfaces de cisaillement*, les conditions du développement de *la rupture progressive* des matériaux et des massifs de sols et de roches ont retenu notre attention dans les différentes analyses de terrain et travaux de simulations numériques. Dans ces analyses globales d'un versant nous avons recherché aussi à bien reconnaître le caractère « dominant » du massif, milieu continu ou milieu discontinu, en vue de s'orienter vers les outils de modélisation numérique les plus adaptés. Pour les grands mouvements de versant, les conditions de propagation et d'arrêt des masses glissées ont constitué aussi des sujets d'analyse pour la définition des scénarios réalistes. *Les comportements hydrologiques et hydrogéologiques* des versants naturels, parfois couplés aux comportements mécaniques, ont retenu aussi notre attention, avec un enjeu important, considérant les rôles multiples et primordiaux de l'eau dans une grande majorité de processus de rupture de versants.

Les *facteurs déclenchant* les processus mécaniques et hydrauliques à l'origine des instabilités doivent évidemment être étudiés avec précision. En effet ils se présentent en amont d'arbres d'événements qui peuvent avoir des conséquences parfois dramatiques. Par exemple, toute l'histoire hydrique d'un sol avant tel événement pluviométrique exceptionnel doit être étudiée pour comprendre la réaction du versant. L'objectif est bien sûr l'identification de relations causales devant permettre des interventions judicieuses et précoces dans une perspective de *gestion des risques*. *L'auscultation* des versants instables

mis sous *surveillance* (GPS, radar, géodésie spatiale, ...) apporte des informations précises qu'il faut déchiffrer, parfois avec l'aide bien utile de *la modélisation*. Ce dialogue nécessaire entre la modélisation et la surveillance des versants instables a été établi dans le cadre des études détaillées des sites sélectionnés.

Enfin, les *références naturelles*, analysées sous toutes leurs facettes, doivent rester une base vers laquelle se retourner pour alimenter nos réflexions théoriques. La grande variété des types de mouvements de versant répertoriés dans les nombreuses classifications géologiques, géomorphologiques ou géotechniques témoignent du fait que les processus mécaniques intervenant dans la déstabilisation d'un versant sont multiples et fortement dépendants des structures géologiques, des comportements rhéologiques des matériaux constitutifs, des types de sollicitations mécaniques, des conditions hydrauliques présentes, des échelles géométriques en cause. Fauchages gravitaires, déformations profondes de certains versants, glissements de terrain, avalanches de débris, glissements et écroulements de grande ampleur ne peuvent pas être analysés, à l'évidence, suivant les mêmes méthodes, les mêmes concepts mécaniques et hydrauliques, les mêmes modèles numériques. Dans toutes nos applications, il faut accepter de revenir à la réalité-terrain grâce à *l'observation et la mesure* pour « juger » de la distance du modèle au réel.

On peut ajouter que certaines situations, en rapport avec la gestion des risques naturels dans le domaine des mouvements de versant et qui se révèlent dramatiques, *ne résultent pas* d'une méconnaissance des aléas ou des facteurs déclenchants, d'une aptitude limitée des scientifiques à réaliser certaines simulations numériques ou d'une sous-estimation de la vulnérabilité des enjeux. Ce qu'il faut souligner, c'est beaucoup plus, parfois, un manque « d'imagination » (qui doit évidemment prendre appui sur une connaissance approfondie du milieu naturel) dans l'analyse des « scénarios possibles et réalistes » et la définition de leurs paramètres d'intensité et délais d'occurrence. Le scénario d'écroulement du Mont Zandila (Valtelline, Italie) est une illustration malheureuse de cette situation (4.2.2). Dans d'autres contextes de mouvements de versants pour lesquels la gestation est lente, la surveillance s'appuyant sur l'analyse des conditions géologiques de terrain et l'aide ponctuelle de la modélisation est la clé de cette gestion des risques, comme on le verra pour le glissement-coulée de la Valette (Alpes-de-Haute-Provence) en 4.2.3, le mouvement de versant de grande ampleur de La Clapière (Alpes-Maritimes) en 4.2.4 et le versant instable de Séchilienne (Isère) en 4.2.5.

#### 4.2.2 L'écroulement du Mont Zandila (Valtelline, Italie)

A la suite de pluies abondantes en Juillet 1987 sur la haute Valtelline ou vallée de l'Adda (Alpes italiennes), de nombreux glissements, laves torrentielles et inondations ont affecté toute cette région. Sur les pentes du Mont Zandila culminant à 2 900 m, une fissure ouverte de 600 m d'extension apparut le 25 Juillet (Figure 16). Le versant, constitué de roches de diverses natures très fracturées (diorites, gabbros et gneiss) présentait un couloir d'éboulis sur la limite Nord amont, drainé par le torrent du Val Pola. Le 19 Juillet ce torrent avait construit un cône de déjection suffisant pour barrer le cours de l'Adda et former un lac de 1 à 5 mètres de profondeur qui s'étendait sur environ 100 m vers l'amont.

Les chutes de blocs répétées des 25, 26 et 27 Juillet avaient conduit les autorités à évacuer les hameaux et villages de Morignone, San Antonio, Poz et Tirindre. Le 28 Juillet au matin, une masse considérable de roches fracturées se mit à glisser obliquement sur une fracture majeure vers le ravin de Val Pola, puis se transforma rapidement en une avalanche de roches qui dévala les 1 200 m de dénivelé et détruisit instantanément le village de Morignone (Figure 17).



**Figure 16:** Vue aérienne du versant et de la vallée de l'Adda avant la catastrophe



**Figure 17:** Vue aérienne du versant du Mont Zandila après la catastrophe

La masse principale remonta le flanc opposé de la vallée sur 300 m de hauteur. Une partie s'écoula vers l'aval, une autre vers l'amont dans le lac créé par le torrent de Val Pola. Sous l'impact, une vague se forma instantanément et remonta vers l'amont en projetant à 140 m de hauteur les alluvions boueuses accumulées au fond du lac et détruisit les villages de Poz, San Antonio et Tirindre pour venir mourir à 2 500 m de sa zone de départ. Sa vitesse initiale estimée fut d'environ 120 km/h. Sa hauteur de 95m au départ était encore de 20 m à 1 km de distance. Le village d'Aquilone (à 2 100 m en amont du Val Pola) n'avait pas été évacué complètement et près de 30 personnes y laissèrent leur vie (Figure 18).





**Figure 18:** Vue (vers l'aval) de l'écroulement du Mont Zandila (d'après M. Govi, 1989)

L'Adda fut ainsi bloquée par une masse de 40 millions de m<sup>3</sup>, formant un barrage de 30 à 90 m de hauteur dans sa partie centrale sur une emprise de plus de 2 000 m. La montée des eaux de l'Adda (0,5 m par jour) derrière ce barrage naturel conduisit à des travaux immédiats de pompages pour éviter le risque d'une rupture et la formation d'une débâcle torrentielle qui aurait été dévastatrice pour l'aval. En même temps, 2 tunnels de dérivation étaient creusés dans le flanc rive gauche de la vallée. Le flanc du Mont Zandila continuant de présenter des signes d'instabilité, une instrumentation en liaison radio avec un centre d'alerte était installée au dessus de l'escarpement sommital de l'écroulement.



**Figure 19:** Travaux de remodelage du cours de l'Adda (vue vers l'aval)

A la base du versant, le barrage naturel fut remodelé (Figure 19) et un lit artificiel avec déversoir en béton recréé pour l'Adda (dans l'hypothèse de fortes crues futures ou de blocage des tunnels) avec des structures dissipatrices d'énergie limitant les risques d'érosion du barrage naturel.

On peut dire que cette rupture fut prévue par les spécialistes italiens, mais le scénario complet, dans ses aspects les plus étonnants, n'avait pas été identifié.

L'exposé de ce scénario d'événement montre l'importance d'une analyse de risque capable d'identifier :

- tous les « arbres d'événement » possibles et réalistes par rapport à un événement déclenchant ;
- tous les arbres de défaut susceptibles de conduire à des dommages sur un enjeu particulier.

Dans ce domaine des risques liés aux mouvements de versant, comme dans celui relatif aux phénomènes torrentiels, les techniques d'analyse des risques, développées spécifiquement pour le domaine des « risques industriels », peuvent aussi apporter des éléments de nature méthodologique.

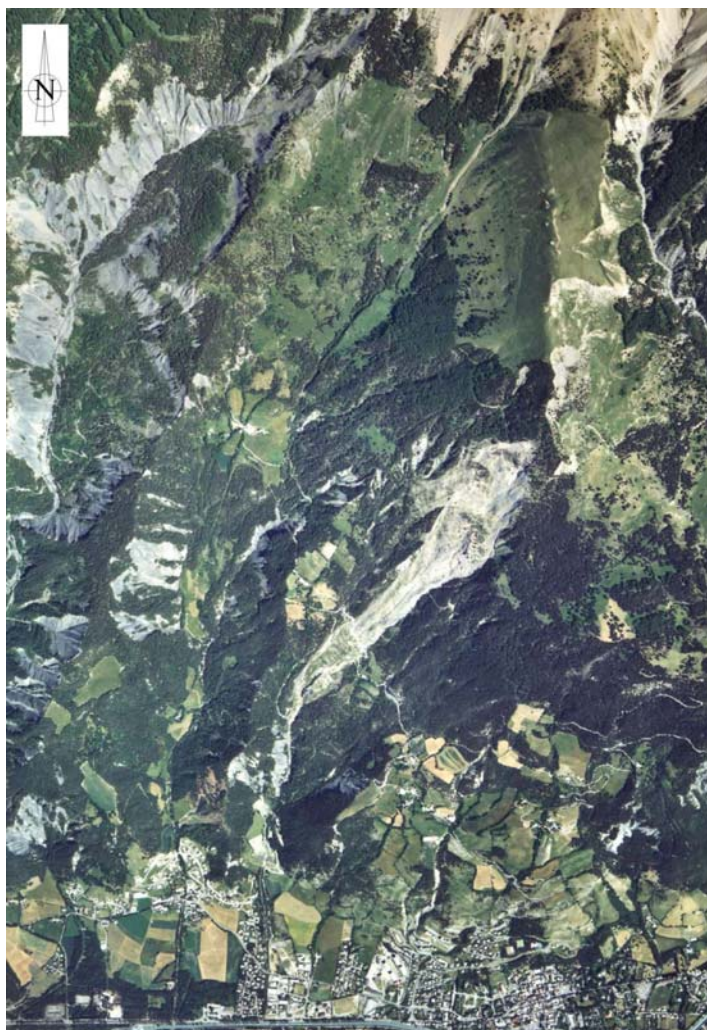
#### ***4.2.3 Le glissement coulée de La Valette (Ubaye, Alpes-de-Haute-Provence)***

Le glissement-coulée de la Valette se réalise dans les marnes du Callovo-Oxfordien (les Terres Noires), au contact avec les flyschs à Helminthoïdes crétacés des nappes de l'Embrunais. Il concerne environ 10 millions de m<sup>3</sup>. Le contexte structural et morphologique de la fenêtre tectonique de Barcelonnette fait apparaître les Terres Noires en fond de vallée et jusqu'à mi-hauteur des versants (Figure 20).



**Figure 20:** Vue aérienne du glissement-coulée de La Valette (au premier plan le cône de déjection du torrent, à l'arrière plan le contact tectonique marnes du Callovo-Oxfordien / nappes de l'Embrunais)

Lorsque les marnes du Callovo-Oxfordien affleurent avec une pente suffisante pour que le ruissellement génère une érosion particulière, il apparaît un relief de type « bad-lands ». Par contre, sur des pentes de faible inclinaison, l'eau imprègne les terrains et les conditions favorables aux phénomènes de solifluxion et de glissement-coulée sont présentes. Une végétation hygrophile est présente, avec mousses et prêles (lieux-dits : les Sagnes). Par ailleurs, de nombreuses fractures affectent les Terres Noires et les flyschs supérieurs, constituant autant de drains au sein du massif et sont à l'origine de sources et sagnes sur le versant. Parfois des sources de fort débit, certaines à l'origine de phénomènes de suffosion, sont visibles, certains de ces écoulements se réalisant avec entraînement de fines argileuses ou silteuses. A l'évidence des écoulements souterrains, hypodermiques ou plus profonds, contribuent à la déstabilisation de ces pentes.

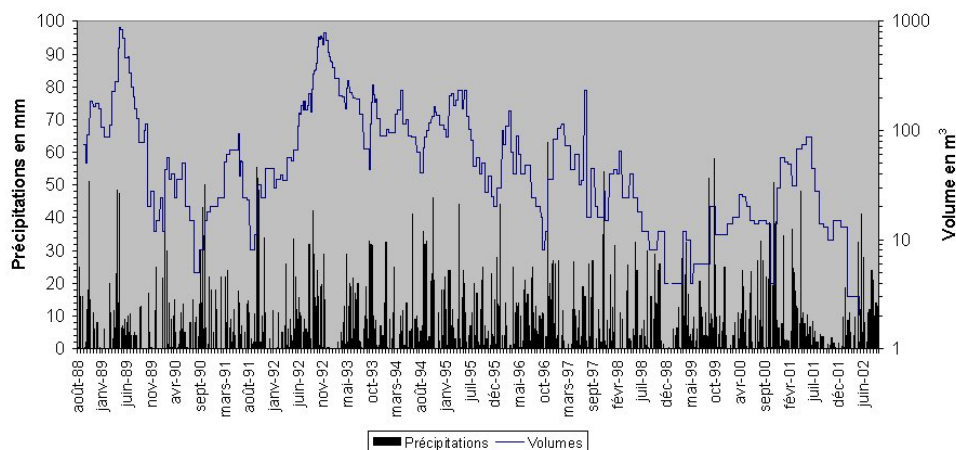


**Figure 21:** Photographie aérienne (2000) montrant l'emprise du glissement et son évolution régressive vers l'amont et l'ouest du versant

Le glissement de La Valette s'est déclenché lors du printemps 1982, à la suite de la fonte des neiges, en partie supérieure du versant (Rocher Blanc, vers la cote 1 800 m) au-dessus du contact Terres Noires / flyschs. Cette rupture, de type circulaire, a déstabilisé la masse rocheuse et créé une surcharge sur les terrains aval (marnes du Callovo-Oxfordien et

moraines glaciaires). L'évolution du glissement peut se suivre en photographie aérienne, en mesurant les surfaces concernées : 26 ha en 1983, 32 ha en 1984 et 50 ha en 1985. Ensuite, jusqu'en 1988, plusieurs coulées se sont déclenchées depuis le front du glissement à la cote 1 400 m pour s'étaler jusqu'à la cote 1 200 m, soit sur une longueur de 500 m (volume ainsi déplacé : environ 50 000 m<sup>3</sup>). Un piège à matériaux, de capacité de stockage 100 000 m<sup>3</sup> environ, a alors été réalisé en amont de la zone habitée (la Valette) située sur le cône de déjection du torrent du même nom. Ce piège est destiné à retenir les premiers matériaux de coulée, tout en laissant passer les écoulements liquides, et donnerait un temps d'évacuation suffisant pour l'habitat concerné, en cas de nécessité.

L'évolution préoccupante du versant a conduit à la mise en place d'un système de surveillance par caméra infrarouge et levés topographiques réguliers. La caméra est opérationnelle de manière continue et reliée par téléphone aux autorités départementales. Sur le plan de la protection active, de premiers travaux de drainage superficiel, un remodelage et un ensemencement des terrains glissés, ainsi que la dérivation du torrent de Serre (torrent voisin en rive droite) ont été réalisés en 1988 et 1989. En outre, des forages avec pause de drains subhorizontaux ont été implantés en tête du glissement. Des fossés de drainage et des tubes en PVC permettent d'évacuer les eaux de ruissellement en dehors du glissement. Ces différents travaux de drainage ont été réalisés par les services ONF-RTM et cette première phase s'est terminée en 1990. Le glissement-coulée a ensuite lentement évolué, avec diverses accélérations des mouvements en rapport avec les conditions pluviométriques et la maintenance du dispositif de drainage, repris en 1993, 1995, 1999 et 2001 (Figure 22).



**Figure 22:** Relation entre pluviométrie et volumes transitant au travers d'un profil repère, premiers travaux de drainage terminés en 1990, reprise de ces travaux en 1993, 1995, 1999 et 2001, (d'après G Le Mignon, 2003)

Le glissement-coulée de la Valette a fait l'objet d'analyses de scénarios d'évolution suivant des processus, soit de glissements régressifs vers les parties supérieures du versant, soit de coulées boueuses vers les parties inférieures du versant et le cône de déjection du torrent de La Valette et sa confluence avec l'Ubaye. Depuis quelques années, alors que le glissement-coulée est moins actif dans sa partie centrale, une évolution régressive est cependant en cours, vers l'amont et latéralement (Figure 21 et Figure 23). Dans les zones d'évolution régressive, certaines des fractures semblent résulter de la réactivation de fractures plus anciennes, le glissement de la Valette apparaissant comme une réactivation d'un mouvement de versant plus ancien et plus important s'étendant vers l'ouest du versant.



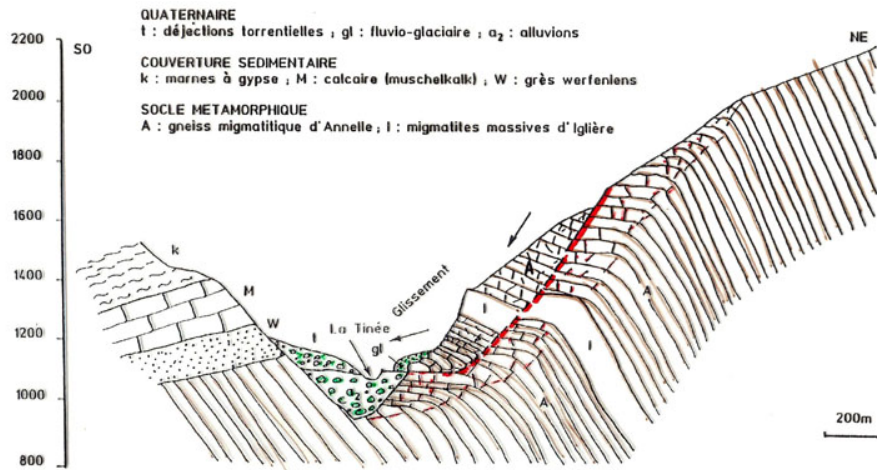
**Figure 23:** Évolution régressive vers l'amont du versant

Les simulations numériques (ARMINES-CGI) ont illustré le rôle des conditions hydrogéologiques : niveaux des surfaces piézométriques et des fronts d'infiltration. Les études hydrologiques et hydrogéologiques de terrain ont permis de comprendre le fonctionnement hydrogéologique du versant et le rôle de l'eau dans les processus de remobilisation. En particulier, les mesures de débit, température et minéralisation ont permis de mettre en évidence que la zone du glissement présentait sa propre signature (par la minéralisation des sources et venues d'eau repérables sur le glissement et par les débits faibles mais persistants en période d'étiage des nappes). Ce modèle de comportement hydrologique et hydrogéologique est utile à la définition des procédures de drainage.

#### ***4.2.4 Le glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes)***

Avec cet exemple nous rentrons dans le domaine des mouvements de versants de grande ampleur, avec des techniques de surveillance spécifiques et une problématique de gestion des risques complexe.

Ce glissement est situé près de Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes). Son évolution sur une trentaine d'années présente des caractéristiques étonnantes. Le glissement concerne une pente rocheuse, s'étageant entre les cotes 1 100 m (base du versant) et 1 700 m (les sommets culminant à 3 000 m), et se développant sur près de 1 km le long de la Tinée. La structure géologique de la base du versant fait apparaître une formation dite des gneiss d'Annelle dans laquelle s'intercale la barre concordante des migmatites d'Iglière plus rigide (c'est la partie nord-ouest du massif cristallin du Mercantour, la vallée de la Tinée étant creusée au contact avec la couverture mésozoïque). Les surfaces de foliation de ces roches métamorphiques, de pendage contraire à la pente du versant, sont fortement déformées à proximité du versant (héritage structural et phénomène de fauchage gravitaire consécutif au retrait des grands glaciers de vallée à la fin des glaciations du Quaternaire) (Figure 24).



**Figure 24:** Coupe géologique du glissement de La Clapière (d'après J-P. Follacci, 1987)

Le versant présentait des signes d'une instabilité ancienne peu inquiétants jusque vers la fin des années 70. Les signes de faiblesse sont devenus plus probants à partir de 1978 et conduisent en 1984 à dévier l'ancienne route départementale circulant au pied du versant. Les chutes de blocs sont en effet nombreuses. À partir de 1985, des désordres morphologiques évidents apparaissent (Figure 25) et vont en s'accroissant : gonflement de la partie inférieure du versant (Figure 26), escarpement sommital de plusieurs dizaines de mètres de hauteur (Figure 27), déclenchement d'une évolution régressive vers les pentes supérieures du versant (Figure 28).



**Figure 25:** Vue d'ensemble du glissement en 1986



**Figure 26:** Déplacement de la base du versant vers la Tinée et déformation de l'ancienne route départementale en 1989

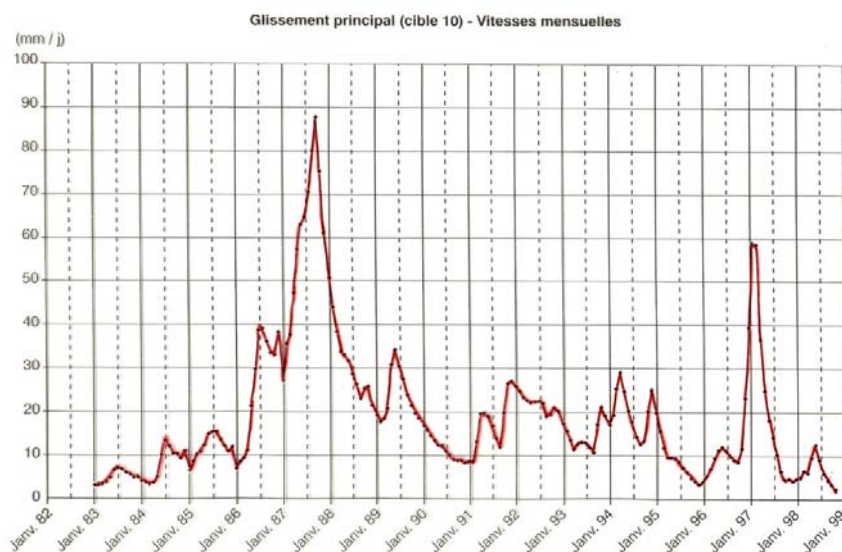


**Figure 27:** Vue d'une partie de l'escarpement supérieur en 1989



**Figure 28:** Évolution régressive vers les pentes supérieures du versant en 1989

Entre temps, en 1982, un ensemble de vingt-quatre cibles (progressivement complété) est implanté sur le versant par le CETE Méditerranée. La mesure de leurs déplacements depuis le versant opposé par distancemètre infrarouge permet de suivre l'évolution de l'instabilité. À partir de 1983, le mouvement peut être décrit comme résultant d'un mouvement de dérive auquel se surimpose des fluctuations saisonnières en rapport avec la période de fonte des neiges : accélérations en mai, juin, juillet, puis décélération (Figure 29). Les vitesses obtenues, croissantes de 1983 à 1986, font craindre pour le mouvement de dérive une évolution de type exponentielle ou asymptotique.



**Figure 29:** Vitesses mensuelles d'une cible représentative du mouvement d'ensemble (d'après J-P. Follacci, 1999)



Les déplacements cumulés ont atteint pour certaines cibles 5 m à la fin de 1984, 10 m à la fin de 1985, 20 m à la fin de 1986, près de 60 m à la fin de 1987. En 1984, les vitesses moyennes d'un ensemble représentatif de cibles atteignaient un maximum de 8 mm/j au moment de la fonte des neiges (juin, juillet), 12 mm/j en 1985 à la même époque, 26 mm/j en 1986 à la même époque, 60 mm/j en 1987 (plus tardivement, en septembre), alors que certaines cibles atteignaient 80 mm/j pendant trois mois consécutifs de cette année, et ponctuellement 120 mm/j.

Pendant ces années, la transformation du versant sur le plan géomécanique et morphologique était intense et son évolution générale a été jugée très alarmante en 1987. Des scénarios d'écroulement de grande ampleur, pouvant barrer le cours de la Tinée et inonder le village de Saint-Étienne-de-Tinée (Figure 30) juste en amont ont été considérés comme réalistes (parmi d'autres scénarios possibles moins catastrophiques). La rupture éventuelle du barrage naturel qui serait alors constitué produirait par ailleurs des désordres importants vers l'aval. Il en a résulté, par mesure de précaution, le creusement d'une galerie de dérivation de la Tinée à la base du versant de rive droite. La masse rocheuse susceptible de s'écrouler était estimée à environ 60 millions de m<sup>3</sup>. En 1988, cependant, l'évolution bien régulière des années 1983 à 1986, fortement perturbée en 1987 (vitesses importantes tardives jusqu'en septembre), ne se confirme pas du tout (Figure 29) : l'accélération saisonnière liée à la fonte des neiges n'apparaît pas sans que l'on puisse identifier une explication climatique et hydrologique à ce sujet.



**Figure 30:** Vue d'ensemble du glissement en septembre 1989, le village de Saint-Etienne-de-Tinée à gauche, en amont

Assistait-t-on à une rémission du mouvement, l'évolution « normale » pouvant reprendre à la prochaine sollicitation hydraulique du massif (pluies de la mauvaise saison, prochaine fonte des neiges) ? Ou bien les déplacements cumulés (induisant un déchargement en tête du versant instable, un chargement en pied) ont-ils apporté un nouvel état de stabilité durable ? Ou bien la fracturation de la masse rocheuse, qui s'est nécessairement développée en profondeur avec les déformations très importantes subies par le versant, a-t-elle conféré au massif une plus forte perméabilité qui le rend moins sensible aux sollicitations hydrauliques ?

Ces différentes hypothèses doivent toutes concourir à l'explication de l'évolution du phénomène qui a pu alors être observée.

Depuis cette période, le versant a poursuivi son évolution morphologique à un rythme ralenti, les vitesses moyennes annuelles tombant à environ 10 mm/j dans les années 90, avec cependant quelques crises notables (en 1997 notamment). Une tendance générale au ralentissement est aujourd'hui enregistrée, conduisant à exclure l'idée de scénarios catastrophiques et à réduire le dispositif de surveillance (au niveau traitement des mesures automatisées).



**Figure 31:** Vue d'ensemble du glissement en 2000

#### ***4.2.5 Le versant instable de Séchilienne (Isère, France)***

Le versant instable de Séchilienne se présente en rive droite de la vallée de la Romanche, à environ 15 km au sud-est de Grenoble. Il domine la route nationale N91 en fond de vallée qui donne accès aux stations de l'Alpe-d'Huez et des Deux-Alpes par Bourg-d'Oisans, avant de rejoindre Briançon par le col du Lautaret, puis l'Italie. Immédiatement en amont se trouve le village de Séchilienne et au pied du versant le hameau de l'Île Falcon. L'importance des enjeux, en cas d'une rupture d'une partie de ce versant, est donc évidente.

Le mouvement de versant se présente dans la série des « schistes satinés », au sein du rameau externe de la chaîne de Belledonne. L'héritage structural, multiphasé, a conduit à la formation de structures faillées complexes où prédominent deux familles de failles décrochantes, de direction N20° à N30° et N120° à N140°. Le massif de micaschiste est ainsi

prédécoupé en « lanières » verticales orientées parallèlement à la direction E-W du versant. La décompression du versant, consécutive au retrait glaciaire, s'est accompagnée d'une certaine ouverture de ces fractures. L'instabilité se développe ainsi depuis la cicatrice verticale des « Ruines de Séchilienne » bien visible depuis le bas de la vallée jusqu'au sommet du mont Sec et la partie ouest du versant (Figure 32).



**Figure 32:** Vue d'ensemble du versant instable de Séchilienne, avec au premier plan l'Ile Falcon et la déviation de la route nationale N91. La cicatrice verticale des « Ruines de Séchilienne » limite à l'est la zone instable.

Les études géologiques de terrain et par photographies aériennes ont permis, progressivement avec l'aide des données de la surveillance, de délimiter l'instabilité (dont le volume total est estimé à 100 millions de m<sup>3</sup>) et d'identifier plusieurs zones en mouvement avec différents degrés d'activité, définies aujourd'hui comme suit :

- une zone frontale très active, d'un volume d'environ 3 millions de m<sup>3</sup>, à l'origine de chutes de blocs dans le couloir des ruines de Séchilienne ;
- une partie moins active d'un volume de 20 à 25 millions de m<sup>3</sup> ;
- une large zone en mouvement lent.

La surveillance du versant a commencé en 1984 et s'est peu à peu développée (CETE Lyon), avec aujourd'hui un dispositif d'ensemble qui permet une véritable télésurveillance et qui comprend principalement :

- un réseau de mesures géodésiques classiques et GPS ;
- un dispositif permettant de mesurer en continu les déplacements de cibles depuis le versant opposé (station automatique théodolite et distancemètre infra-rouge) ;
- des capteurs extensométriques (permettant de mesurer l'ouverture des fractures les plus actives) interrogés par balises radio (télémessure) ;

- un distancemètre radar (nouvelle technique de mesure de distance par radar micro-ondes) installé et validé depuis quelques années ;
- une station météorologique (pluviométrie et nivométrie)

La mise en oeuvre progressive de ce dispositif de surveillance, l'analyse et le traitement des données de mesure, confrontés à une connaissance géologique et structurale du site qui s'est peu à peu affinée, ont permis de faire évoluer la démarche d'analyse de scénarios au cours de ces dernières années. Dans le même temps, une stratégie de prévention dont le caractère évolutif doit être souligné a pu se mettre en place.

Ainsi, à la fin des années 90 les scénarios suivants ont fait l'objet d'analyses détaillées quant aux dommages potentiels, aux techniques de prévention ou d'atténuation des effets adaptées, aux plans de secours nécessaires :

- auto-stabilisation du mouvement de versant. Pas d'éboulement ;
- éboulement de 5 millions de m<sup>3</sup> ;
- éboulement de 7 millions de m<sup>3</sup> ;
- éboulement de 25 millions de m<sup>3</sup> ;
- éboulement de 100 millions de m<sup>3</sup>.



**Figure 33:** Représentation du site et illustration de certaines des mesures de prévention (in Anonyme, 2001)

A cette première liste de scénarios, dont les derniers étaient très alarmants, ont été associés la définition de dommages potentiels, une évaluation des risques, une analyse des impacts économiques. Les impacts potentiels suivants peuvent être précisés :

- en cas de chutes de blocs importantes et du fait de la propagation des produits de l'éboulement : destruction du hameau de l'Ile Falcon et coupure de la N91 avec des conséquences économiques importantes pour toute la vallée et les stations d'altitude ;
- en cas de barrage de la Romanche : inondation en amont du village de Séchilienne ;
- en cas de submersion et destruction du barrage : onde de crue susceptible de dévaster en aval la partie de Vizille proche du lit de la Romanche ainsi que les champs captant AEP (pour l'alimentation en eau potable de Grenoble) et d'atteindre les zones industrielles de Pont-de-Claix (avec usines de type « Sévésos ») ainsi que les faubourgs de Grenoble ;

- impact économique direct, résultant du coût des diverses techniques de prévention mises en œuvre (décrites ci-après) et indirect, résultant de décisions relatives à l'aménagement du Territoire (en particulier, non implantation d'industries en aval du site du fait de la menace).

Des mesures de prévention ou de limitation des dommages en cas de rupture ont été décidées et mises en œuvre (Figure 33) avec :

- la construction d'un merlon de protection destiné à retenir environ 3 millions de m<sup>3</sup> ;
- l'expropriation des habitants de l'Île Falcon dans le cadre la loi du 2 février 1995 (dite loi « Barnier ») ;
- la construction en 1999-2000 d'une galerie hydraulique et de reconnaissance, en rive gauche de la Romanche, permettant d'écouler un débit de 60 m<sup>3</sup>/s en cas d'un scénario avec obstruction partiel du lit de la Romanche. Ce débit ne représente que la moitié du débit de crue annuelle. Un véritable ouvrage de dérivation hydraulique de la Romanche a été envisagé ;
- la consolidation du dispositif de télésurveillance du site, permettant en temps réel la détection d'événements anormaux et, avec intervention d'experts, le déclenchement de pré-alertes ;
- l'élaboration de plans de secours et d'intervention, avec dispositif d'évacuation d'urgence.

Puis, l'amélioration de la connaissance du comportement du versant et la volonté de rattacher une *intensité de scénario* à un *délai d'occurrence* a conduit un collège d'experts, mandaté par la DPPR, à formaliser les scénarios de la façon suivante :

- ↳ à très court terme (moins d'un an) ou court terme (de 1 an à 10 ans): *scénarios probables* de chutes de blocs et ruptures de masses rocheuses de quelques centaines à quelques milliers de m<sup>3</sup> ;
- ↳ à court terme (de 1 an à 10 ans): *scénario envisageable* d'un éboulement en masse d'environ 3 millions de m<sup>3</sup>. Évolution régressive vers l'amont possible (mais faibles volumes concernés à court terme). Scénario d'un éboulement de 20 à 25 millions de m<sup>3</sup> très improbable;
- ↳ à moyen terme (entre 10 et 50 ans): *scénario peu probable* d'un éboulement de 20 à 25 millions de m<sup>3</sup> ;
- ↳ à long terme (entre 50 et 100 ans): *scénario quasiment impossible* d'un éboulement de 100 millions de m<sup>3</sup>.

Le cas du versant instable de Séchilienne constitue un cas d'étude exceptionnel. Les travaux scientifiques et techniques réalisés à ce jour, ainsi que les études de scénarios d'événements, permettent d'illustrer la démarche mise en œuvre dans ce projet de recherche.

Il importe en effet d'apporter une justification économique de la prévention, même lorsque les processus de décision se construisent dans le cadre d'« univers de décision » qui peuvent être qualifiés d'incertains, l'information nécessaire et recherchée étant difficilement accessible ou mal quantifiable ou probabilisable. Les différentes stratégies de prévention possibles, en fonction des divers scénarios, doivent donc être évolutives, c'est-à-dire aptes à s'adapter à la prise en compte d'informations nouvelles qui apparaissent au cours du temps. La gestion des incertitudes correspondantes doit se réaliser en s'appuyant, dans les cas d'études concernés, sur des investigations de terrain précises, des méthodes d'analyse de scénarios, des simulations numériques d'événements, sans oublier le retour aux références naturelles et aux archives qui permettent d'apporter une véritable aide à la décision.

## **5. LES RISQUES NATURELS DANS LE MONDE, L'INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DES INVESTISSEMENTS PRÉVENTIFS, LA MAÎTRISE DES RISQUES**

On estime que les différents aléas naturels (séismes, mouvements de terrain, cyclones) ont tué au cours des trente dernières années plus de cinq millions de personnes, ont fait deux milliards de sinistrés et créé des pertes économiques considérables. Le nombre de victimes des catastrophes majeures augmente régulièrement depuis 1960, avec un taux de croissance de 6 % par an, plus du double du taux de croissance démographique mondiale.

Il semble que cette situation résulte d'une dégradation accrue du milieu naturel (déboisement suivi d'érosion des sols, modification des microclimats, etc.) et d'une expansion urbaine irréfléchie : développement de mégalopoles sans plan d'urbanisation dans certains pays en voie de développement, constructions sans aucune technique de prévention dans certains pays ou sans respect des normes de construction.

Les conséquences économiques, pour nombre de pays en voie de développement, sont catastrophiques. Ainsi, pour les pays d'Amérique centrale, les conséquences pour le seul secteur public s'élèvent à environ 3 % du PNB en moyenne. On estime qu'avec des taux de croissance démographique de 3 % environ pour certains de ces pays, ceux-ci devraient enregistrer une croissance économique supérieure à 5 % pour ne pas connaître la récession et accéder à un véritable développement. Le passage du cyclone Mitch en novembre 1998, sur le Honduras et le Nicaragua, a fait au moins 11 000 morts et près de trois millions de sans-abri. Selon l'ONU il a anéanti en trois jours 20 années d'efforts de développement dans cette région. Les catastrophes naturelles peuvent donc représenter un véritable frein au développement pour ces pays. Les causes multiples de cette situation sont la grande pauvreté de certains de ces pays, le caractère peu monétarisé de leurs économies, le mauvais contrôle de l'aménagement de l'espace et le non respect de normes de construction adaptées. Dans le cas des pays industrialisés, il a été développé un ensemble de mesures visant à atténuer les effets des phénomènes naturels dangereux. Les pertes en vies humaines sont bien moindres. Cependant, les dommages matériels directs restent importants.

Il faut remarquer que le coût des actions nécessaires à la réduction des dégâts est en général très inférieur aux pertes économiques évitées. En Californie (période 1970-2000), le ratio correspondant a été estimé à 12 % pour les glissements de terrain, 20 % pour les risques sismiques et volcaniques, 60 % pour les inondations. L'intérêt économique des investissements préventifs est bien plus grand quand ils s'intègrent dans des schémas de développement urbain et régional. Le Japon, pays très exposé, a démontré que les effets de la plupart des catastrophes naturelles peuvent être nettement atténués, à condition toutefois que les acteurs économiques respectent complètement les règles établies. Le séisme de Kôbe en 1995 a montré qu'il n'en était pas toujours ainsi.

Un concept fort de gestion des risques doit être de plus en plus affirmé, incluant prévention, secours et réparation, suivant une approche systémique, clé de la maîtrise des risques naturels.

Celle-ci doit s'appuyer sur un ensemble d'actions complémentaires :

- ↳ L'analyse des risques, combinant l'identification et l'évaluation de l'intensité des aléas et de la chaîne temporelle des facteurs déclenchants, avec l'estimation de la vulnérabilité du milieu et des établissements menacés. Cette analyse permet de sélectionner les solutions

les plus adaptées et les actions prioritaires permettant d'éviter la réalisation des scénarios les plus dommageables, réduire la probabilité d'occurrence de certains d'entre eux, atténuer leurs effets ou limiter l'extension des aires d'influence ;

- ↳ La définition des moyens de prévention et de réduction des effets (ou mitigation) des catastrophes naturelles. Ceux-ci concernent :
  - l'orientation de l'urbanisation dans les zones les moins exposées et les moins fragiles ;
  - la modification des actions anthropiques génératrices de risque ;
  - l'application de normes de construction adaptées (réglementation parasismique, paracyclonique, etc.) ;
  - la réalisation d'ouvrages correctifs (stabilisation de pentes, régulation des cours d'eau, lutte contre l'érosion, ouvrages paravalanche, etc.)
  - la mise en œuvre de dispositifs de surveillance des phénomènes dangereux, destinés à suivre leur évolution et contribuer au déclenchement des alertes si nécessaire ;
  - l'organisation de systèmes d'alarme et de secours.
- ↳ La mise en place de mécanismes de gestion du risque
  - le niveau politique devant fixer la nature et l'intensité des risques pris en compte, les degrés de protection et la couverture du risque désirée ;
  - le niveau juridique et administratif devant assurer la mise en place des organes de planification, de financement et d'exécution des actions préventives, des actions de secours et des actions d'indemnisation des victimes, basées sur une politique d'assurance contre les catastrophes naturelles.
- ↳ L'information, la formation et l'éducation des jeunes et moins jeunes.

Rappelons que la France s'est progressivement constituée une doctrine de la gestion des risques en même temps qu'un dispositif législatif et réglementaire s'élaborait. Ainsi les plans de surfaces submersibles (PSS) ont été créés en 1935. Les périmètres de risque définis par l'article R.111-3 du code de l'urbanisme en 1961 faisaient référence au fait que « la construction sur des terrains exposés à des risques tels que : inondation, érosion, affaissement, éboulement, avalanche, peut, si elle est autorisée, être subordonnée à des conditions spéciales ». La loi d'orientation foncière instituant en 1967 les Plans d'Occupations des Sols (P.O.S.) créait la notion de zones ND protégées notamment en raison de risques naturels.

C'est cependant en 1972 que la prévention des risques naturels, et tout spécialement des mouvements de terrain, commence véritablement avec l'établissement d'un Plan ZERMOSS (Zones Exposées aux Risques de Mouvements du sol et du Sous-sol) et les cartographies de ces aléas au 1/25 000. Puis la loi du 13 juillet 1982, relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles, institue un système d'indemnisation prenant appui sur les sociétés d'assurance. Dans le même temps, le décret d'application de cette loi stipule que l'État élabore et met en application les Plans d'Exposition aux Risques Naturels prévisibles (P.E.R.) « qui déterminent notamment les zones exposées et les techniques de prévention. Ils valent servitude d'utilité publique et sont associés aux P.O.S. ». (Documents d'urbanisme devenus depuis peu P.L.U. : Plans Locaux d'Urbanisme). La loi du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs impose la prise en compte des risques majeurs dans l'aménagement et l'urbanisme.

Le Conseil interministériel du 24 janvier 1994 donne un nouvel élan à la politique de prévention des risques naturels majeurs, avec la création du Plan de Prévention des Risques Naturels prévisibles (PPR), un programme de restauration et entretien des rivières, de rénovation de l'annonce des crues, de protection des lieux habités contre les inondations, et la possibilité de déplacer des populations soumises à des risques très importants, réalisables à court terme,

lorsque aucune autre mesure de mise en sécurité n'est possible. La loi du 2 février 1995 complète et précise le dispositif général en permettant l'expropriation (et l'indemnisation) de biens exposés à des risques menaçant gravement les vies humaines et en transformant officiellement les P.E.R. en P.P.R. (Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles).

Les P.P.R. conduisent à l'établissement d'un zonage réglementaire au 1/5 000 (en zones urbaines) ou 1/10 000 (en zones rurales), basé sur une évaluation des différents aléas naturels et des enjeux socio-économiques et humains. Les zones rouges (d'aléa fort à très fort) sont *a priori* inconstructibles. Les zones bleues (d'aléa moyen) sont constructibles sous certaines conditions. Les zones blanches (d'aléa faible ou négligeable) sont constructibles. Ce zonage cartographique est accompagné de deux livrets : le rapport de présentation et le règlement qui précisent la nature des mesures de prévention, protection et sauvegarde attachées à chaque type de zone.

Des situations particulières de risques majeurs (La Clapière, Séchilienne) font l'objet de décisions spécifiques (mise en place de dispositifs de surveillance, réalisation de travaux importants de prévention) engageant différents services de l'État, voire des comités d'experts.

D'une façon plus générale, la prise en compte des risques naturels dans l'aménagement du Territoire et l'organisation de la prévention relèvent en France des compétences de plusieurs directions ministérielles : la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques ou DPPR du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, avec un rôle particulier de coordinateur interministériel, la Direction de l'Eau de ce même ministère, la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales, la Direction de l'Architecture, de l'Urbanisme et de la Construction du Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, la Direction de la Sécurité Civile du Ministère de l'Intérieur, de la Sécurité intérieure et des Libertés locales. Les services déconcentrés de l'État (en régions et départements) jouent un rôle important dans la mise en œuvre, sur le terrain, des décisions ministérielles. Les maires des communes ont en charge la sécurité (en particulier en rapport avec les risques naturels, et donc l'organisation des secours), sauf événements majeurs pris en charge par l'État : plans ORSEC et plans de Secours ou d'Urgence (cas de risques particuliers type Séchilienne). Les maires doivent veiller aussi au respect des réglementations d'urbanisme et organiser l'information préventive des populations.

La politique de prévention des risques naturels repose ainsi sur un partage, parfois complexe et discuté, des compétences de trois partenaires : l'État, les collectivités territoriales et la société civile.



## 6. CONCLUSION

Cette recherche a été consacrée au thème général « *Risques naturels et prévention* », ciblée sur les risques naturels en montagne et plus précisément « *les mouvements de terrain et risques hydrologiques associés et induits* ». L'évaluation des méthodes et moyens de prévention, l'analyse des retours d'investissement et l'information préventive ont constitué des objectifs ou des préoccupations qui ont orienté les travaux réalisés par les différents partenaires du projet. Certains de ces objectifs étaient très ambitieux et sans doute les réponses apportées ne sont-elles que partielles.

Les *phénomènes naturels* concernés par le projet ont été les éboulements rocheux, les glissements de terrain, les coulées boueuses, les laves torrentielles et écoulements torrentiels violents. Les scénarios où certains de ces phénomènes peuvent être associés ont été plus spécialement analysés, tels que glissements et coulées boueuses, glissements et laves torrentielles, éboulements de grande ampleur susceptibles de créer un barrage de vallée avec inondation en amont, puis rupture et débâcle en aval.

La *problématique* considérée a pu être décrite comme suit :

- Nous pouvons décrire les risques naturels par des arbres d'événements possibles qui surviennent dans des systèmes géodynamiques (bassin versant torrentiel, grande vallée alpine), aujourd'hui encore en cours d'évolution, alors que les enjeux et la vulnérabilité des zones menacées se transforment également au cours du temps, les échelles de temps considérées étant d'ordre décennal à centennal.
- Cependant, nous sommes confrontés à un milieu naturel complexe, en partie transformé par l'homme, avec sa variabilité spatiale et des processus très généralement non stationnaires. Ceci rend très difficile toute démarche de prévision et tout diagnostic de scénario d'événement (avec la définition des paramètres essentiels d'intensité et de délai d'occurrence).
- Dès lors, comment adapter nos méthodes de prévention ? Pour tel niveau de protection recherché, comment définir une action de surveillance, des travaux de protection ou de limitation des effets, des règles quant à l'utilisation de l'espace qui soient efficaces sur le long terme (sur plusieurs dizaines d'années) ? Quels coûts accepter pour ces investissements de prévention, en considérant les coûts initiaux et les coûts de maintenance sur le long terme, et pour quels retours d'investissement attendus (à supposer que cette notion soit pertinente pour le contexte concerné) ?
- Enfin, quelles conclusions tirer d'une plus juste connaissance de ces phénomènes pour mieux définir les diverses politiques d'assurance contre les risques naturels ?

Nous avons, dans cette recherche, contribué à répondre, modestement, à ces questions en développant une méthodologie d'étude, associant enquêtes techniques auprès des services de l'Etat, enquêtes auprès de sociétés d'assurance, études bibliographiques et surtout *études détaillées et rétro-analyses de situations types* bien documentées dans plusieurs sites alpins où les enjeux actuels ou à venir sont bien définis.

À l'issue de ce projet, il apparaît qu'il reste nécessaire *d'améliorer notre connaissance des phénomènes naturels* eux-mêmes (laves torrentielles, grands éboulements en particulier) : facteurs de prédisposition d'ordre topographique et géologique, facteurs déclenchants, scénarios possibles d'évolution au cours du temps et dans l'espace. Cette connaissance initiale est

évidemment à *la base de la prévention*. Nous avons aussi mis l'accent sur les apports et limites de la modélisation et des simulations numériques de processus particuliers, ces techniques apportant une aide à l'analyse et à la prise décision, mais ne pouvant se substituer à la mise en œuvre d'autres approches de type qualitatif basées sur l'expérience et relevant d'une démarche d'expert. Nous avons aussi, dans ce projet de recherche, évalué certaines *méthodes et moyens de prévention*, clarifiant le domaine du possible par rapport à différents types de situations à risque. Dans de rares cas, lorsque les données économiques sont suffisantes, une évaluation économique a pu être réalisée.

Nous espérons que les résultats de cette recherche pourront contribuer à donner un éclairage nouveau sur des *politiques de prévention réalistes*, répondant ainsi en partie à certaines propositions d'action qui concluaient le « Rapport Bourrelier » sur l'analyse des politiques publiques de prévention des risques naturels (*La prévention des risques naturels. Rapport de l'instance d'évaluation présidée par Paul Henri Bourrelier. La Documentation française, septembre 1997*).

La diffusion des outils de connaissance issus de cette recherche se fera au travers de l'édition d'un ouvrage de sensibilisation et de formation sur le sujet, qui s'intégrera dans une démarche d'information préventive. Son plan détaillé est présenté en annexe.

---

### Crédit photographique :

- ARMINES - CGI : Figures 2, 4, 8, 9, 19, 21, 23, 26, 27, 28, 30
- LCPC et CETE Lyon : Figure 25
- CETE Méditerranée : Figure 31
- CEMAGREF : Figure 15
- ONF-RTM : Figures 1, 13 et 14
- IGN : Figure 21

### Sources bibliographiques à l'origine de figures ou photos :

- Anonyme (2001) : *Le risque : un site sous très haute surveillance et Les parades : mieux vaut prévenir que guérir*, in Prisme, le Journal des services de l'Etat en Isère, n° 12 (n° spécial : Séchilienne : au-delà du risque...) (Figures 32 et 33)
- Cabane N. (2001) : *Facteurs de prédisposition à la génération des laves torrentielles. Utilisation d'un outil SIG. Application au bassin versant de l'Arbonne*. Mémoire de DEA, Ecole des Mines de Paris, CGI, 23p. et annexes (Figure 12)
- Cojean R (1993) *Les mouvements de versants et la stabilité des talus. Analyse, modélisation, prévention*. Cours de l'École des Mines de Paris, CGI, 106p. et annexes (Figures 2, 30, 26, 27, 28, 30)
- Cojean R. et Staub I. (1998). *Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises*. 8<sup>e</sup> Congrès de l'AIGI, Vancouver, 21-25 septembre 1998, vol. 3, pp. 2075-2082 (Figure 4)
- Follacci J-P (1987) : *Les mouvements de versant de la Clapière à Saint-Etienne de Tinée (Alpes-Maritimes)*, Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, 150/151, pp. 39-54 (Figure 24).
- Follacci J-P (1999) : *Seize ans de surveillance du glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes)*, Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, 220, pp. 35-51 (Figure 29).
- Goguel J. (1968) : *Les enseignements du glissement de Pontamafrey*. Bull. BRGM, série 2, section 2, n°3, pp 55-62. (Figure 3)
- Govi, M. 1989, *The 1987 Landslide on Mount Zandila in the Valtellina, Northern Italy*, Landslide News, N°3, pp. 1-3. (Figure 18)
- Laigle D (2002) *Représentation des résultats de simulation d'étalement de laves torrentielles dans un environnement géoréférencé: Application au cône de déjection du torrent de l'Arbonne (Bourg-Saint-Maurice, Savoie)* 12p., CEMAGREF, in Rapport final, Projet de recherche Risques naturels et prévention, Fondation MAIF. (Figure 15)
- Laugier P. (2002) : *Contribution à l'analyse des risques naturels en montagne par l'étude géologique et géotechnique de scénarios de mouvements de versants et laves torrentielles. Application à la région de Bourg-Saint-Maurice (Savoie, France)*. Thèse de doctorat en Géologie de l'Ingénieur, École des Mines de Paris, CGI. 333p. et Annexes. (Figures 10 et 11)
- Le Mignon G. *Rôles de l'eau dans le déclenchement et la remobilisation de glissements-coulées. Applications à la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Thèse de Doctorat en Géologie de l'Ingénieur, École Nationale des Ponts et Chaussées, CGI, soutenance prévue en 2003. (Figure 22, d'après données Météo-France et ONF-RTM)
- Mougin P. (1914) : *Les torrents de Savoie*. 1251 p., Grands Etablissements de l'Imprimerie Générale, Grenoble (Figure 7)
- Rebeyrotte E. (1995) : *Le projet de liaison ferroviaire Lyon-Turin*. Revue Travaux n° 705, pp38-45. (Figure 5)
- Site internet : <http://www.univ-savoie.fr/> (Figures 16 et 17)
- Vassiliadis G. et Emphoux V. (1998) : *L'autoroute face aux risques naturels*. Revue Travaux n° 745 (n° spécial : L'autoroute de la Maurienne). pp100-105. (Figure 6)

### Rapport final du contrat de recherche Fondation MAIF :

- Cojean R.<sup>(1)</sup>, Durville J-L<sup>(2)</sup>, Effendiantz L.<sup>(3)</sup>, Fleurisson J.A.<sup>(1)</sup>, Goueffon M.<sup>(5)</sup>, Laigle D.<sup>(4)</sup>, Laugier P.<sup>(1)</sup>, Le Mignon G.<sup>(1)</sup>, Pollet N.<sup>(1)</sup>, Pothérat P.<sup>(2)</sup>, Richard D.<sup>(4)</sup>, Thénevin I.<sup>(1)</sup>, (2002). *Risques naturels et montagne : Mouvements de terrain et risques hydrologiques associés et induits. Evaluation des méthodes et moyens de prévention et analyse des retours d'investissement. Information préventive*, Rapport Final, 290p, Contrat Fondation MAIF.  
<sup>(1)</sup> : ARMINES-CGI, <sup>(2)</sup> : LCPC, <sup>(3)</sup> : CETE Lyon, <sup>(4)</sup> : CEMAGREF, <sup>(5)</sup> : ONF-RTM

## ***Risques naturels et montagne***

### ***Mouvements de versants et risques hydrologiques associés et induits. Évaluation des méthodes et moyens de prévention et analyse des retours d'investissement. Information préventive***

#### **INTRODUCTION**

#### **1. LES RISQUES NATURELS : MÉTHODES D'ANALYSE ET ÉVALUATIONS ÉCONOMIQUES**

- 1.1 Aléas naturels. Vulnérabilité. Risques naturels**
- 1.2 La politique publique de prévention des risques naturels en France**
- 1.3 Les méthodes d'analyse des risques et d'évaluation économique des décisions de prévention**
- 1.4 L'intérêt économique des investissements préventifs**

#### **2. LES MOUVEMENTS DE VERSANTS ET LES PHÉNOMÈNES TORRENTIELS : DÉFINITION DES PROCESSUS, MÉTHODES D'ÉTUDE, APPORTS DE LA MODÉLISATION. SCÉNARIOS D'ÉVÉNEMENTS**

- 2.1 Introduction**
- 2.2 Mouvements de versants**
  - 2.2.1 Typologie des mouvements de versants*
  - 2.2.2 Méthodologies des reconnaissances géologiques et géomorphologiques*
  - 2.2.3 Mécanismes de déformation et rupture des versants instables et modélisation*
  - 2.2.4 Chutes de blocs et éboulements de faible ampleur*
  - 2.2.5 Critères de mobilité des mouvements gravitaires rapide de grande ampleur. Modèles de propagation*
- 2.3 Phénomènes torrentiels**
  - 2.3.1 Processus de génération des laves torrentielles*
  - 2.3.2 Modélisation de l'écoulement et du dépôt des laves torrentielles : méthodologie d'étude*
  - 2.3.3 Exemple d'évaluation de l'aléa généré par les laves torrentielles sur un cône de déjection de torrent, par l'utilisation de modèles numériques*
- 2.4 Scénarios d'événements et fiches-types d'analyse.**

#### **3. ÉTUDES DÉTAILLÉES DE SITUATIONS TYPES**

- 3.1 Glissements de terrain et mouvements de versant de grande ampleur**
  - 3.1.1 Rôles de l'eau dans la remobilisation du glissement-coulée de La Valette (Alpes-de-Haute-Provence) et simulations numériques*
  - 3.1.2 Le mouvement de versant de Séchilienne (Isère). Prise en compte de l'héritage structural et simulation numérique*
  - 3.1.3 Le versant instable de Séchilienne (Isère). Méthodologie de surveillance et analyse de scénarios*
  - 3.1.4 Le glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes). Chronologie du management du risque*

### **3.2 Phénomènes torrentiels**

3.2.1 *Mécanismes de génération des laves torrentielles dans les Alpes françaises*

3.2.2 *Le torrent de l'Arbonne (Savoie) : scénarios de génération, d'écoulement et de dépôts de laves torrentielles*

3.2.3 *Simulation numérique de génération de laves torrentielles du torrent de l'Arbonne (Savoie)*

3.2.4 *Représentation des résultats de simulation d'étalements de laves torrentielles dans un environnement géoréférencé : application au cône de déjection du torrent de l'Arbonne (Savoie)*

## **4. LA PRÉVENTION : MÉTHODOLOGIES ET TECHNIQUES, LIMITES ET COÛTS**

### **4.1 Introduction**

### **4.2 Scénarios d'événements, dommages et coûts**

4.2.1 *Mouvements de versant de grande ampleur*

4.2.2 *Phénomènes torrentiels*

### **4.3 Cartographie des aléas pour l'établissement des Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles**

### **4.4 Les aspects législatifs et réglementaires relatifs aux risques naturels en montagne**

## **5. CONCLUSION**