
Fil rouge avalanche

D. Boissier, A. Talon

*Polytech' Clermont-Ferrand (CUST) / LGC
24 avenue des Landais – BP 206 – 63174 Aubière Cedex
daniel.boissier@polytech.univ-bpclermont.fr
aurelie.talon@polytech.univ-bpclermont.fr*

RÉSUMÉ. Cet exemple fil rouge vise à développer les notions, les méthodes et les démarches d'analyse de risque de la maison Cyberrisques au risque d'avalanche en station.

ABSTRACT. This Arienne example aims at presenting the notions, methods and approaches of the risk analysis included in the Cyberrisques House to the risk of avalanche in station.

MOTS-CLÉS : Avalanche, terminologie, réglementation, analyse qualitative de risque, analyse quantitative de risque, mitigation des risques.

KEYWORDS: Avalanche, terminology, standardization, qualitative risk analysis, quantitative risk analysis, risk mitigation.

AVERTISSEMENT

Ce fil rouge est issu à la fois de travaux réalisés en génie civil à l'université Blaise Pascal et pilotés sur les avalanches par R. Gourvès et D. Boissier et sur l'analyse de risques par D. Boissier et A. Talon :

- thèse de J.L. Burllet en 2002 sous la direction de D. Boissier et R. Gourvès,
 - travaux de fin d'études d'étudiants en troisième année de Polytech' Clermont-Ferrand : R. Barjot, K.D. Batoke, I. Bergzoll, J.L. Burllet, N. Collot, A. Dumousset, J. Marlaud, F. Martin, P. Martin, P. Meunier, J.C. Pellez, J.F. Thulliez,
 - travaux d'étudiants dans le cadre d'un module « analyse et de risques en génie civil » en dernière année de Polytech' Clermont-Ferrand : D. Clergue, F. Deneuille, A. Dorkel, J. Gardon, S. Hamacher, S. Heyman, J. Monpeu, L. Nguyen, T. Phamle, A. Touani.
-

0. Introduction

Objectifs

Cet exemple a un objectif d'illustration de la chaîne complète d'analyse de risques sur le problème des avalanches en station.

Limites

Comme pour tout problème d'ingénierie ce problème peut être abordé à plusieurs échelles. L'objectif de ce fil rouge n'est pas de décrire exhaustivement tous les problèmes possibles mais de résoudre un problème précis, à une échelle donnée.

Démarche

L'exemple fil rouge peut défilé à deux niveaux de détail :

- le premier niveau, très rapide, illustre seulement les principaux concepts (référéncés comme « fondamental » dans ce document),
- le deuxième niveau, plus précis, entre dans la physique des phénomènes, la mécanique des modèles, l'ingénierie des actions (référéncés comme « complémentaire » dans ce document).

Supports

Ce fil rouge utilise évidemment des notions et des méthodes qui sont définies dans les différentes étapes de la maison Cyberrisques. Ce fil rouge doit donc être suivi en s'y référant en permanence.

1. Etage 1 – Vocabulaire et perception du risque d'avalanche

Cette partie vise à introduire les concepts fondamentaux de l'analyse de risque dans le cas d'une avalanche en station.

1.1. Chapitre 1 – Vocabulaire du risque d'avalanche

1.1.1. Définition générale du risque d'avalanche

Le risque est une caractéristique de l'événement avalanche défini conjointement par :

- sa vraisemblance d'occurrence et son intensité,

- la gravité de ses conséquences.

1.1.2. Définition de l'aléa d'avalanche

L'aléa correspond à la probabilité d'occurrence d'une avalanche ; il s'agit du domaine de l'aléa et non de l'inconnu puisque des statistiques sur les avalanches sont disponibles, les causes de l'avalanche sont également connues et que ce sont les causes qui sont aléatoires.

L'aléa d'avalanche est caractérisé par son occurrence, son type, son énergie, sa géométrie,...

L'aléa est généralement de type naturel.

On distingue trois intensités de l'aléa avalanche :

- aléa fort : il exprime une intensité égale ou supérieure à la valeur de 30 kPa pour une probabilité d'occurrence centennale mais qui peut être plus fréquente pour un lieu donné,

- aléa moyen : il exprime une intensité inférieure à 30 kPa pour les événements de probabilité d'occurrence centennale même s'il est plus fréquent. Il représente un phénomène qui ne surprendrait pas totalement compte tenu de sa proximité avec l'aléa fort. En fonction des conditions topographiques et des données à disposition, il peut également servir de marge d'incertitude vis-à-vis de l'aléa fort,

- aléa faible : il exprime une intensité non qualifiée mais qui ne sera jamais de nature à endommager une construction normale et donc sans prescription particulière ; il ne génère qu'une attention spécifique pour des individus non protégés.

1.1.3. Définition de la vulnérabilité liée à l'aléa d'avalanche

La vulnérabilité exprime le niveau d'effet prévisible de l'avalanche sur les composants du système. Il s'agit d'une notion complexe intégrant divers paramètres :

- vulnérabilité économique,
- vulnérabilité humaine,
- communication...

Les acteurs en jeux dans une avalanche peuvent être classés en quatre types :

- usagers actifs (skieurs) et passifs (paysans, automobilistes),
- acteurs directs : service des pistes, sociétés,
- services de l'état : juridique, secours,
- médias.

4 Cyberrisques – Fil rouge avalanche

Les dommages peuvent être classés en quatre types :

- les dommages corporels :
 - morts,
 - blessés graves,
 - blessés légers,
- les dommages structurels :
 - habitations détruites,
 - routes coupées,
 - réseau électrique,
 - canalisation d'eau,
 - ...
- les dommages fonctionnels :
 - manque de marchandise,
 - moyens de communication coupés,
 - arrêt de fonctionnement des remontées mécaniques,
 - ...
- les dommages environnementaux :
 - érosion des zones,
 - destruction d'habitat animal,
 - ...

1.2. Chapitre 2 – Perception du risque d'avalanche

La perception du risque est différente selon :

- la culture : sportive ou non, montagnarde ou urbaine, jeune ou plus âgé
- les pays,
- les responsabilités et les assurances.

La loi impose aux mairies de permettre aux citoyens un accès libre à l'information par le biais de :

- journées de sensibilisation, affiches, panneaux,
- distribution de prospectus.

Il est également nécessaire :

- d’approcher les risques majeurs dans les programmes scolaires,
- que le maire présente un programme d’action communal sur les risques majeurs.

Ces actions d’information ont pour objectif d’adapter le comportement des utilisateurs à la menace.

La figure suivante représente une démarche de sensibilisation des utilisateurs au risque d’avalanche.

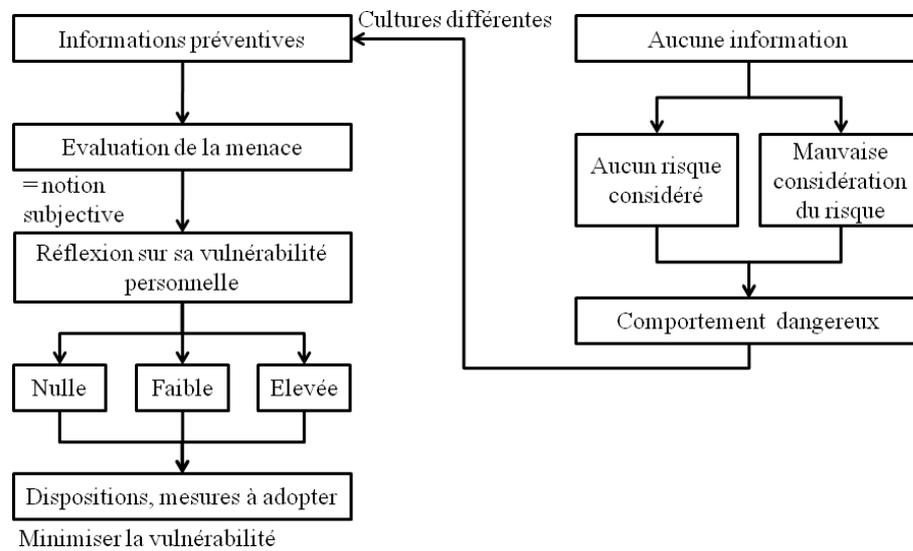


Figure 1. Démarche de sensibilisation au risque d’avalanche (Phamle et al. 2007)

2. Étape 2 – Classification des risques et analyse physique du système

Cette partie consiste à donner les principaux classements des risques existants et les bases de la mécanique, de la thermodynamique de la neige et de la mécanique des pentes.

2.1. Chapitre 1 – Classification des risques

2.1.1. Risque acceptable et risque majeur

Un risque est dit acceptable lorsque l'on consent à vivre avec, en contre partie d'un bénéfice et dans la mesure où il est contrôlé. Des exemples de dommages acceptables sont : la destruction d'infrastructures légères, de végétation, l'arrêt d'exploitation (fermeture,...), la perte d'un ski, ...

Les caractéristiques d'un risque majeur sont : une faible fréquence et une gravité très importante (skieurs emportés, bâtiments détruits,...).

2.1.2. Classification et cartographie pour l'aménagement

Le recensement des avalanches a débuté à la fin du XIXe siècle en Savoie sous la forme d'une enquête permanente sur les avalanches (EPA). A la suite d'une avalanche qui a tué 39 adolescents à Val d'Isère (10 février 1970), une carte inventaire de tous les sites d'avalanche est mise en place sur décision du Conseil des Ministres : la carte de localisation des phénomènes d'avalanche (CLPA). L'EPA et la CLPA sont basées sur l'observation des sites d'avalanches et sur le recueil de témoignages.

Le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD) confie la réalisation de l'EPA et de la CLPA à deux exécutants :

- les services de terrain de l'ONF (Office national des forêts). Ses agents territoriaux ont pour tâche de recueillir en permanence les informations sur les nouveaux événements survenant et de les consigner.
- une unité de recherche du Cemagref basée à Grenoble, est chargée de coordonner et de centraliser les informations récoltées pour mettre à jour les bases de données, de réaliser, actualiser les cartes et diffuser les informations.

2.1.2.1. Enquête permanente sur les avalanches (EPA)

L'EPA est une chronique d'événements d'avalanche sur certains sites sélectionnés.

Le nombre de sites pour lesquels est réalisée l'EPA est limité. Souvent facilement observables, ils ont été choisis à l'origine en fonction des dégâts occasionnés en forêt. Aujourd'hui, ce sont plutôt les enjeux humains et la connaissance scientifique dans le temps des avalanches qui sont privilégiés. Il y a environ 4200 **sites EPA**, reportés sur les **cartes d'observation** de l'EPA.

Les agents de terrain de l'ONF notent les caractéristiques de l'événement dans leur **carnet d'avalanche**, chaque fois qu'une avalanche a lieu sur un site EPA :

date, enneigement, altitude de départ, d'arrivée, type d'avalanche... Toutes ces informations sont reportées sur un avis d'avalanche. Celui-ci est envoyé au Cemagref qui saisit les informations dans une base de données. Plus de 70 000 événements sont aujourd'hui disponibles sur le site www.avalanches.fr.

La figure 2 représente le plan national du dispositif de l'EPA, où les points verts représentent les sites en cours d'observations ou ayant été observés.

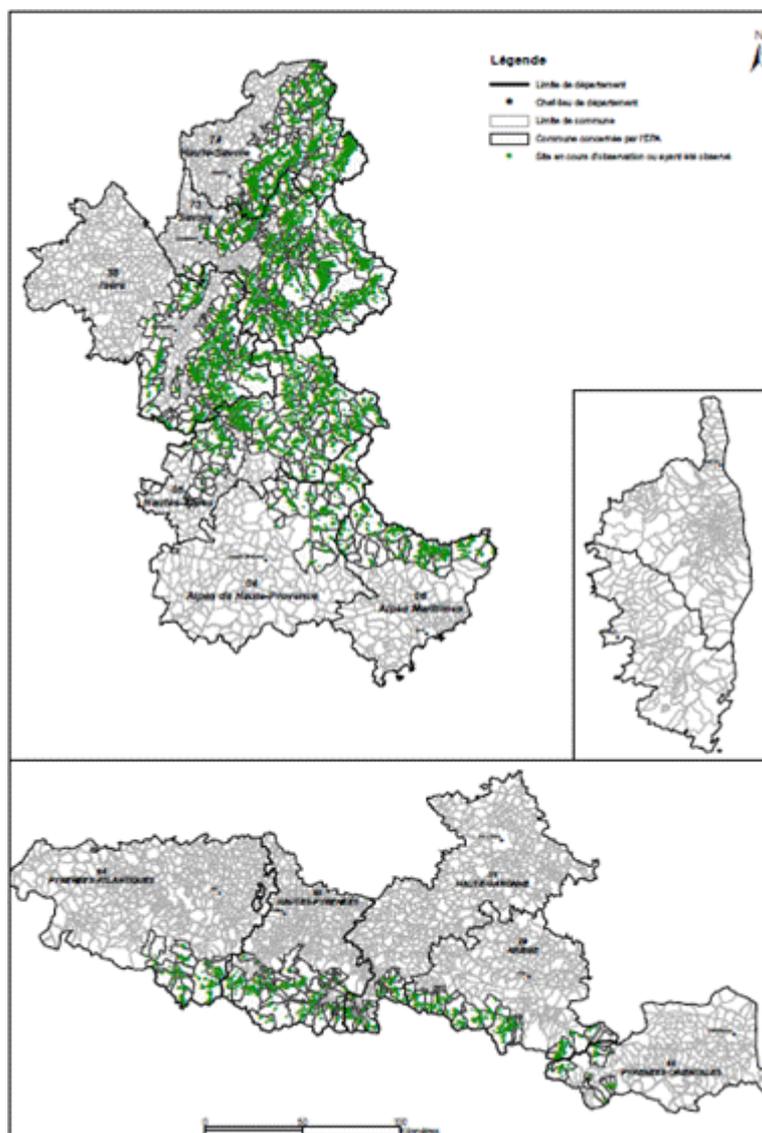


Figure 2. Plan national du dispositif de l'EPA (Avalanche, 2008)

Ces cartes existent au niveau national, (cf. figure 2) départemental et au niveau des sites eux-mêmes (cf. figure 3).

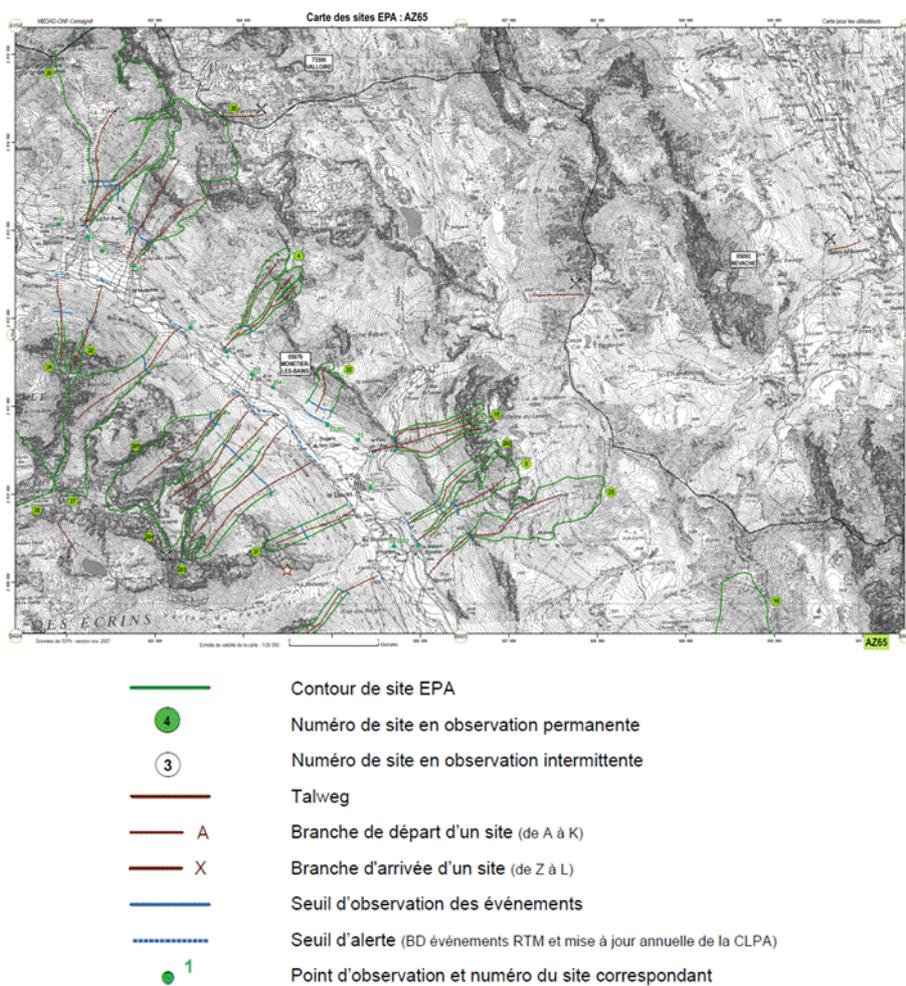


Figure 3. Dispositif de l'EPA au niveau d'un site (Avalanche, 2008)

2.1.2.2. Carte de localisation des phénomènes d'avalanches (CLPA)

La CLPA est un document informatif réalisé au 1/25000 décrivant les ampleurs maximales des phénomènes d'avalanches survenus dans le passé et observés avec précision et certitude. La CLPA indique essentiellement les emprises des

avalanches, c'est-à-dire les extensions maximales des événements connus. Elle est mise à jour chaque année. Tous les dix ans, une enquête récapitulative de mise à jour plus approfondie est menée.

Les informations sont collectées selon deux processus indépendants :

- le recueil de témoignages : les informations sont récoltées auprès de la population et dans tous les documents les plus accessibles (écrits, photographies, rapports, études, journaux, archives...) ; elles permettent de délimiter les emprises des avalanches connues. Elles sont ensuite numérotées et accompagnées d'une fiche signalétique.

- l'interprétation des événements passés : une photo-interprétation est réalisée à partir de stéréophotographies prises en été. Le chargé d'étude CLPA y cherche des « empreintes » d'avalanches : trouée dans la végétation, arbres cassés, éboulis... Des indices, invisibles sur les photographies (trouée sous les arbres), vont être recherchés sur le terrain pour compléter les informations de la photo-interprétation.

Les emprises maximales des événements sont tracées, de couleur différente pour les limites provenant de l'interprétation des événements passés (orange) ou grâce au recueil de témoignage (rose). On trouve aussi sur la carte l'indication des dispositifs fixes de protection paravalanche. Les cartes sont accompagnées d'une notice par massif PRA.

Les CPLA sont réalisées au niveau national, départemental (figure 4) et au niveau des sites eux-mêmes (figure 5).

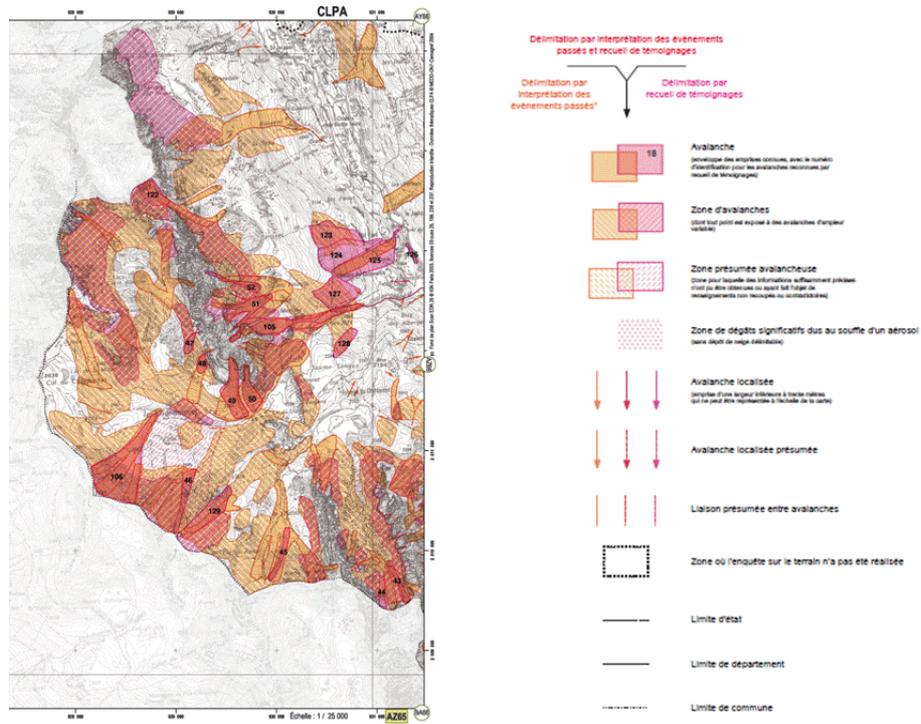


Figure 5. CPLA d'un site (identique à celui de la figure 3) – (Avalanche, 2008)

Les notices CPLA présentent une synthèse par massif sur les principales avalanches historiques observées et leur contexte. Elles accompagnent progressivement la mise à jour de la CLPA.

Malgré leur intérêt, elles ont une portée informative limitée :

- elles sont un produit accessoire de la CLPA, et ne remplacent pas la consultation de la carte. En effet, ces notices n'ont pas vocation à indiquer les avalanches historiques observées de façon exhaustive, à la différence de la carte et des fiches d'enquête.

- de plus, malgré les efforts des rédacteurs pour être le plus objectifs possible, ces synthèses conservent au moins partiellement un caractère subjectif lié au choix fait sur les événements jugés les plus importants.

Il est établi une fiche signalétique pour chaque emprise numérotée d'une CPLA et lors de chaque mise à jour de la carte. Elle présente les témoignages recueillis propres à l'avalanche concernée lors du report de l'emprise. La lecture des fiches est

donc très complémentaire de celle de la carte de la CLPA. La fiche indique les informations suivantes :

- le lieu de l'enquête et sa date apparaissent en tête de page. Sont également indiqués la commune de l'emprise CLPA et son numéro INSEE, le modèle de fiche, le numéro de l'emprise et le lieu-dit,
- les dispositifs de protection (s'il y en a),
- la fiche peut indiquer si l'avalanche s'est déclenchée en zone skiable, si on peut ajouter les observations d'un site EPA présent dans la zone de l'emprise, mais aussi si elle bénéficie d'informations relatives à une autre étude,
- le témoignage, inclus dans la fiche, renseigne sur l'historique de l'avalanche, son fonctionnement (après analyse des déclarations des témoins) et peut être complété par des archives (documentation dans la fiche).

2.1.2.3. Plan de prévention des risques d'avalanche (PPRA)

Les PPR sont établis d'après la loi Barnier du 2 Février 1995 sur la prévention des risques naturels (articles 562-1 à 562-9). Le domaine d'intervention d'un PPR est :

- les mesures de prévention, protection et sauvegarde (sécurité des personnes et organisation des secours),
- pour l'existant : des aménagements limités (<10% de la valeur des biens),
- pour les projets d'installations nouvelles :
 - intervention sur l'utilisation, l'exploitation et la réalisation de tout type de construction,
 - décision allant de la prescription à l'interdiction totale.

Un PPR s'ajoute au Plan Local d'Urbanisme (PLU) et oblige à la réalisation de travaux sur l'existant (délai maximum de 5 ans) lorsqu'il y a des cas extrêmes d'insécurité des personnes. Il permet le refus de la garantie des catastrophes naturelles par l'assurance.

La procédure d'élaboration d'un PPRA est schématisée à la figure suivante.

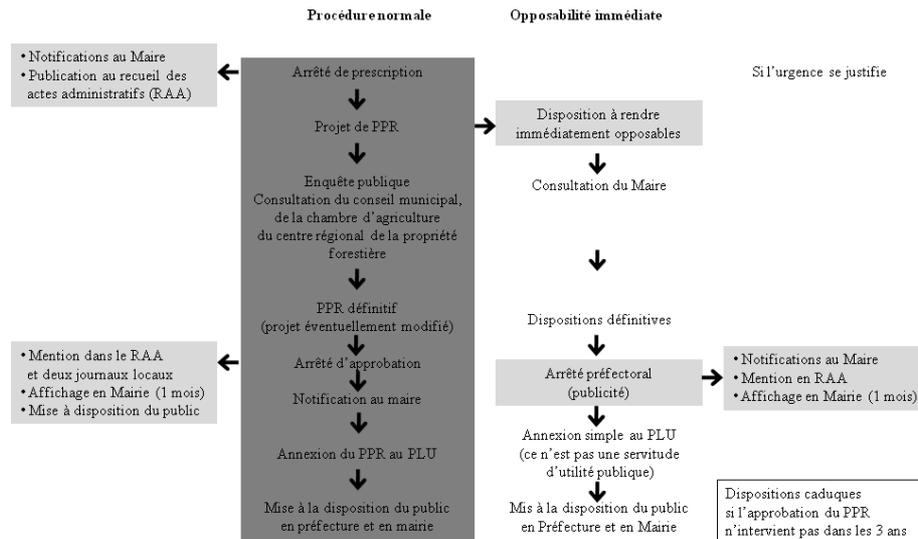


Figure 6. Procédure d'élaboration d'un PPR Avalanche (Primnet, 2008)

Les intervenants d'un PPR sont :

- les fonctionnaires des services déconcentrés de l'état,
- les élus des collectivités locales,
- les experts du domaine scientifique,
- les socioprofessionnels concernés par le risque d'avalanche (gestionnaires des domaines skiables, agriculteurs,...),
- les représentants d'associations locales ayant une connaissance particulière du patrimoine, des milieux et de leur histoire.

L'information associée au PPR circule du préfet au maire sous la forme d'un Document Communal Synthétique (DCS) et circule du maire à la population sous la forme d'un Document d'Information Communale sur les Risques Majeurs (DICRIM).

Après validation d'un PPR les documents mis en place sont :

- le schéma d'alerte,
- le plan de secours communal,
- le plan d'évacuation.

La carte des aléas étant le résultat d'une démarche d'expert reflétant en principe la réalité du terrain, elle n'est pas négociable. Le zonage réglementaire élaboré sous la responsabilité des services de l'Etat est présenté dans le tableau ci-après suivant une base de réflexion à engager avec des partenaires locaux en fonction des particularités de terrain. C'est à cette étape qu'intervient la concertation avec les élus.

Niveau d'aléa	Mesure de prévention technique	Espaces non urbanisés	Espaces urbanisés	
			Non protégés	Protégés
Majeur	Impossible techniquement	Inconstructible		
Fort	Difficiles techniquement ou très coûteuses et dépassant largement le cadre de la parcelle	Inconstructible		Inconstructible sauf exception
Moyen	Dépasant le cadre de la parcelle cadastrale (généralement à maîtrise d'ouvrage collective publique ou privée) et coûteuses	Inconstructible	Inconstructible sauf exception	Constructible sous conditions dont entretien forêt
Faible	Ne dépassant pas le cadre de la parcelle cadastrale (généralement à maîtrise d'ouvrage individuelle) et d'un coût modéré	Constructible sous conditions		Constructible sous conditions d'entretien des ouvrages de protection
Zone non directement exposée mais source d'aléa avalanche		Inconstructible + maintien forêt protection	Constructible sous conditions de maîtriser les conséquences des aléas	
AMV (Avalanche maximum vraisemblable)		Constructible avec réglementation pour organisation des secours		

Tableau 1. Zonage du risque d'avalanche (Primnet, 2008)

Dans un PPR :

– les zones d'aléa fort et le plus souvent moyen sont traduites (sauf exception) en zones inconstructibles (rouges avec l'indice R). L'Etat impose l'interdiction.

– les zones d'aléa faible sont traduites en zones constructibles assorties de faibles contraintes (bleues avec l'indice B + l'initiale du risque en minuscule) dont le respect concerne les particuliers (règles d'urbanisme, règles de construction). Les particuliers doivent prendre en compte les règles d'urbanisme et les règles de construction.

– si les zones d'aléa moyen d'un PPR ne correspondent à aucune zone constructible du PLU de la commune considérée, elles sont traduites en zones rouges. Dans le cas contraire, en Isère, elles sont traduites en zones violettes (avec l'indice B + l'initiale du risque en majuscule) où la collectivité publique ou privée doit réaliser les travaux de protection définis par les études.

En pratique, pour éviter le principe de constructibilité conditionnelle qui n'est pas autorisé dans le règlement du PPR, il existe deux types de zones violettes :

- une zone violette (éventuellement admissible), inconstructible en l'état, mais pouvant devenir constructible après études et travaux et sous réserve que les études n'infirmant pas cette possibilité. L'ouverture à la constructibilité nécessitera la révision du PPR ;
- une zone violette (admise), où le principe et les dimensions des travaux, sous maîtrise d'ouvrage collective, sont connus et portés en annexe au PPR : l'ouverture à urbanisation est conditionnée à la réalisation effective des travaux et à la vérification de leur conformité par le service commanditaire.

Les cartes de PPR Avalanche existent au niveau national, départemental et au niveau des sites eux-mêmes (figure 7 et 8).

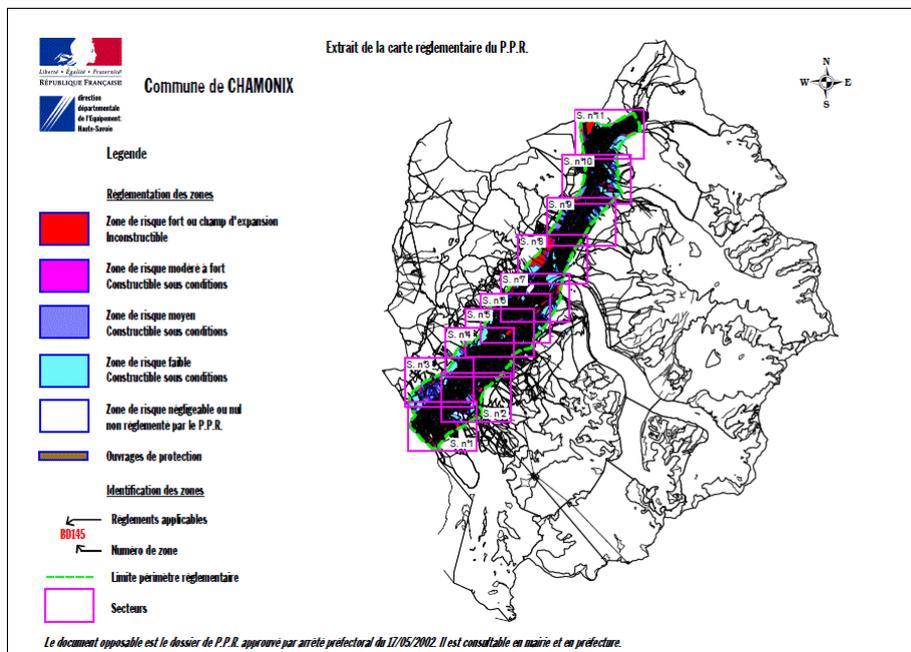


Figure 7. PPR Avalanche de la commune de Chamonix (Avalanche, 2008)

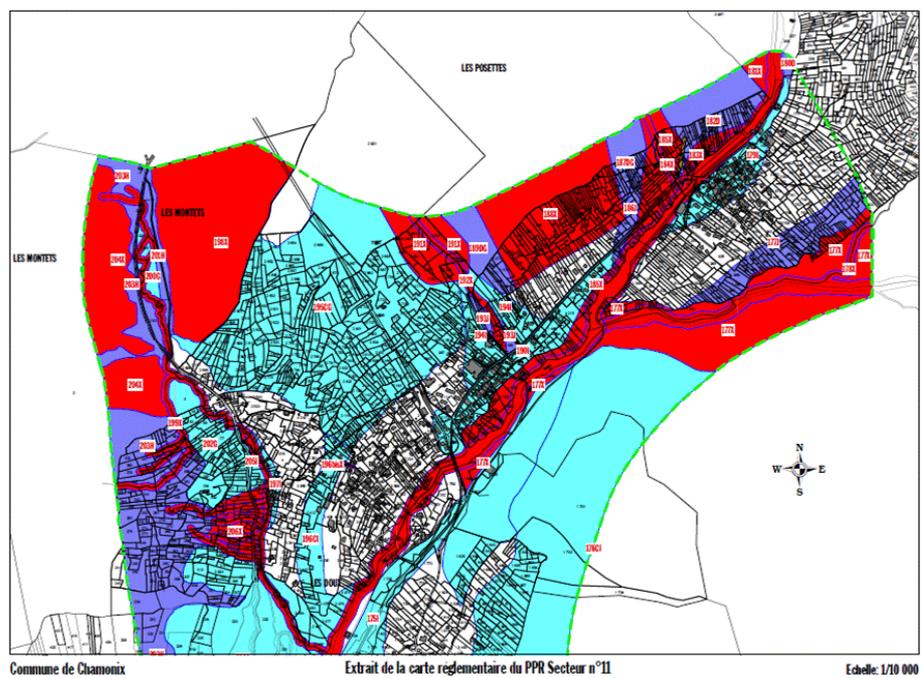


Figure 8. PPR Avalanche du secteur 11 de la commune de Chamonix (Avalanche, 2008)

Les trois phases de la vie d'un PPR sont schématisées à la figure suivante.

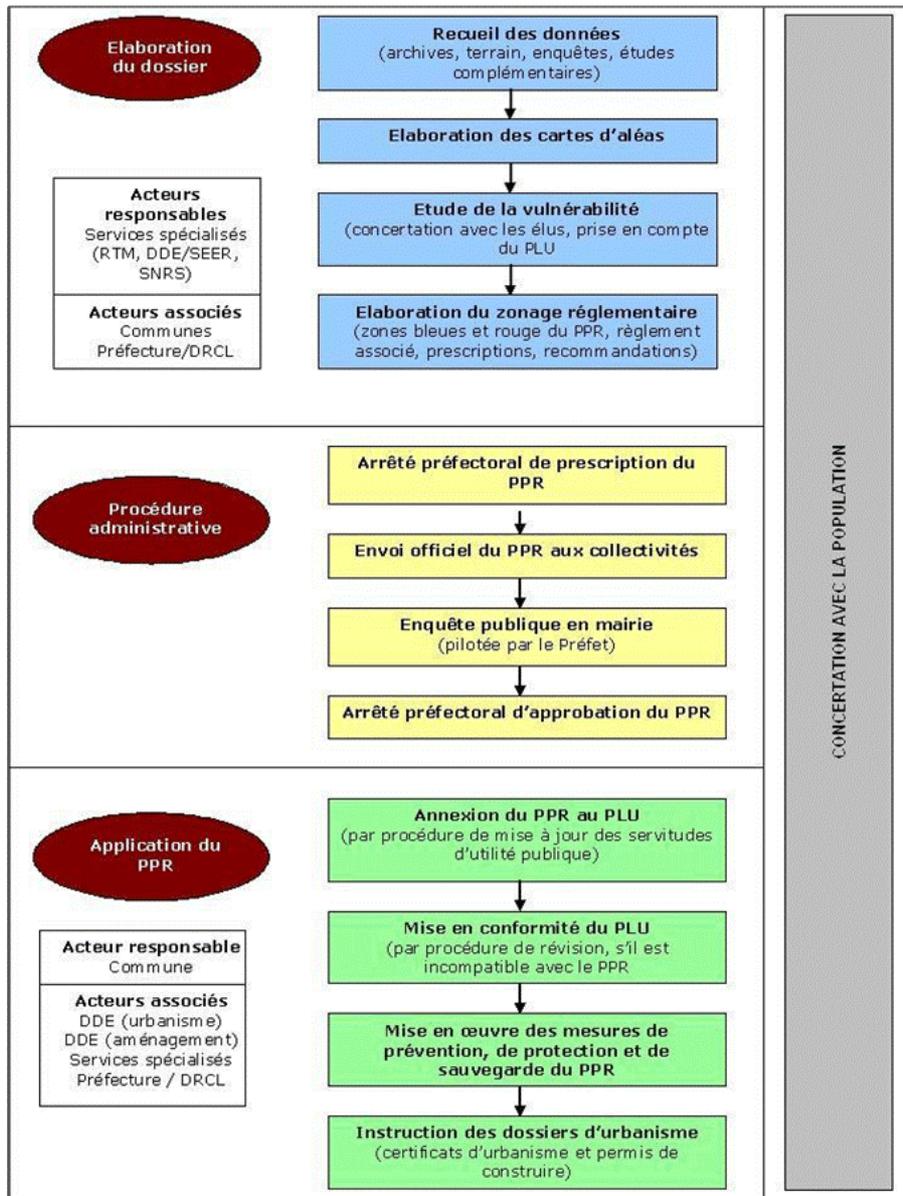


Figure 9. Trois phases de la vie d'un PPR (Memento, 2008)

2.1.3. Echelle européenne du risque d'avalanche

L'échelle européenne a été créée par le groupe de travail des services européens de prévision du risque d'avalanche. Elle est en vigueur depuis l'hiver 1993/1994 et a remplacé les anciennes échelles nationales. Elle est utilisée dans les pays suivants : Allemagne, Andorre, Autriche, Espagne, France, Italie, Pologne, Royaume-Uni (Ecosse), Slovaquie, Slovénie, Suisse.

Degré de danger	Stabilité du manteau neigeux	Probabilité de déclenchement	Conséquences pour les voies de communications et les habitations / Recommandations	Conséquences pour les personnes hors pistes / Recommandations
1 	Le manteau neigeux est en général bien stabilisé.	Des déclenchements ne sont en général possibles que par forte surcharge** sur de très raides pentes raides extrêmes. Seules des coulées et de petites avalanches peuvent se produire spontanément.	Pas de danger.	En général, conditions sûres.
2 	Le manteau neigeux n'est que modérément stabilisé sur quelques pentes raides*. Àilleurs, il est bien stabilisé.	Des déclenchements sont possibles surtout par forte surcharge** et sur quelques pentes indiquées dans le bulletin. Des départs spontanés d'avalanches de grande ampleur ne sont pas à craindre.	Guaire de danger d'avalanches spontanées.	Conditions favorables dans la plupart des cas. La prudence est surtout conseillée lors de passages sur des pentes raides aux positions et altitudes indiquées dans les bulletins.
3 	Le manteau neigeux n'est que modérément à faiblement stabilisé sur de nombreuses pentes raides*.	Des déclenchements sont possibles parfois même par faible surcharge** et surtout sur de nombreuses pentes indiquées dans le bulletin. Dans certaines situations, quelques départs spontanés d'avalanches de taille moyenne, et parfois assez grosse, sont possibles.	Parties exposées menacées spontaniquement. Des mesures de sécurité sont à recommander dans certains cas.	Conditions partiellement défavorables. L'appréciation du danger d'avalanche demande de l'expérience. Il faut éviter autant que possible les pentes raides aux positions et altitudes indiquées dans les bulletins.
4 	Le manteau neigeux est faiblement stabilisé sur la plupart des pentes raides*.	Des déclenchements sont probables même par faible surcharge** sur de nombreuses pentes raides. Dans certaines situations, de nombreux départs spontanés d'avalanches de taille moyenne, et parfois grosse, sont à craindre.	Des parties exposées mises en danger pour la plupart. Des mesures de sécurité sont à recommander.	Conditions défavorables. L'appréciation du danger d'avalanche demande beaucoup d'expérience. Il faut se limiter aux terrains peu raides et prendre en considération les zones de départ d'avalanches.
5 	L'instabilité du manteau neigeux est généralisée.	Spontanément, de nombreux départs de grosses avalanches sont à craindre y compris en terrain peu raide.	Danger aigu. Toutes les mesures de sécurité sont à recommander.	Conditions très défavorables. La renonciation aux activités de sports de neige est recommandée.

Explications: **Surcharge: - forte (par exemple skieurs groupés, engins de damage, explosif) - Spontané: sans intervention humaine
- faible (par exemple skieur seul, promeneur) - Exposition: point cardinal vers lequel est tournée une pente
* Le terrain exposé au danger d'avalanche est décrit de manière plus détaillée dans le bulletin d'avalanches (altitude, exposition, topographie, etc.)
- Exposé: signifie dans ce cas 'particulièrement exposé au danger'
→ Pentes raides: pentes d'inclinaison supérieure à environ 30 degrés
→ Terrain peu raide: pentes d'inclinaison inférieure à environ 30 degrés
→ Pentes raides extrêmes: défavorable en ce qui concerne l'inclinaison (la plupart des cas pentes d'inclinaison supérieure à environ 40 degrés), la configuration du terrain, la proximité de la crête, la rugosité du sol.

Tableau 2. Echelle européenne du risque d'avalanche (SLF, 2008)

2.2. Chapitre 2 – Analyse physique du système

Dans cette partie ne sont traitées que les avalanches en station.

2.2.1. Avalanches

2.2.1.1. Approche système de l'avalanche en station

Le risque n'a de sens que par rapport à un système qui intègre : des composants, des sollicitations, des relations entre ces composants et des limites.

Les composants du système associé au risque d'avalanche en station sont : les pentes, les individus, les habitations, les infrastructures et les espaces naturels.

Ce système est sous la sollicitation de la météo.

Les actions d'ingénierie possibles sur ce système sont :

- vis-à-vis des pentes : créations d’ouvrages, réalisation de purges, travail de la neige,
- vis-à-vis des individus : information, formation
- vis-à-vis des habitations : plan d’occupation des sols (POS), protections, dispositifs constructifs, PPRA,
- vis-à-vis des infrastructures : protection, construction,
- vis-à-vis des espaces naturels : végétalisation,
- vis-à-vis de la météo : meilleure prévision.

Les échelles d’étude possibles de ce système sont :

- vis-à-vis de l’échelle géométrique : le massif, la station, la pente,
- vis-à-vis de l’échelle temporelle : la saison, l’épisode, la nuit / le jour, l’événement.

Les limites fixées pour ce système sont :

- vis-à-vis du domaine : on se limite à une station de sport d’hiver,
- vis-à-vis des sollicitations : on n’intègre pas les sollicitations sismiques,
- vis-à-vis des conséquences : on n’intègre pas les enjeux environnementaux, ni ceux liés à l’agriculture,...
- vis-à-vis des prévisions : on s’intéresse aux prévisions relatives à la pente,
- vis-à-vis de l’ingénierie (actions possibles sur le système), on s’intéresse à :
 - la prévision du risque (acquisition de données et développement de modèles),
 - la mise en œuvre d’actions préventives (ouvrages, purges, balisages,...).

2.2.1.2. Phénomène d’avalanche

Au niveau du phénomène d’avalanche, on distingue trois types d’avalanche :

- l’avalanche de poudreuse (*cf.* figure 10),
- l’avalanche de plaque (*cf.* figure 11),
- l’avalanche de neige humide (*cf.* figure 12).

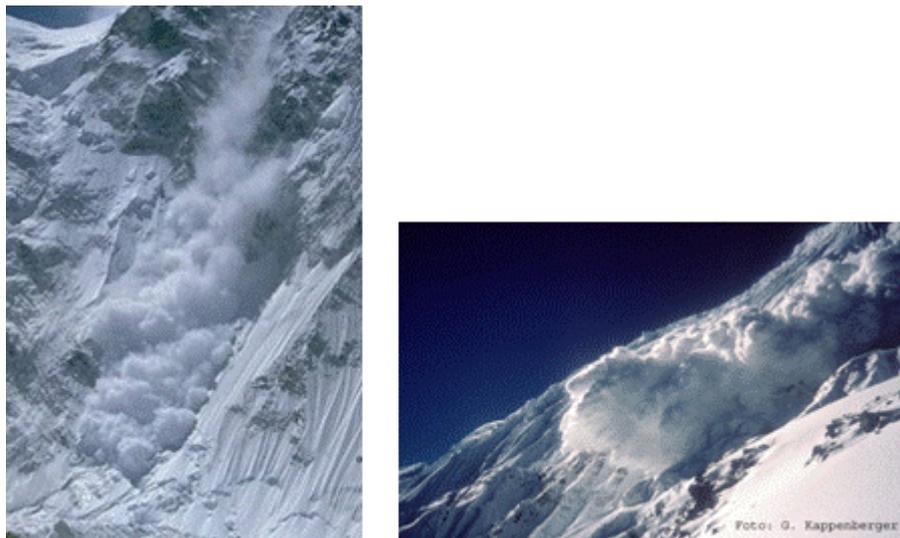


Figure 10. *Avalanches de poudreuse (Avalanche, 2008)*

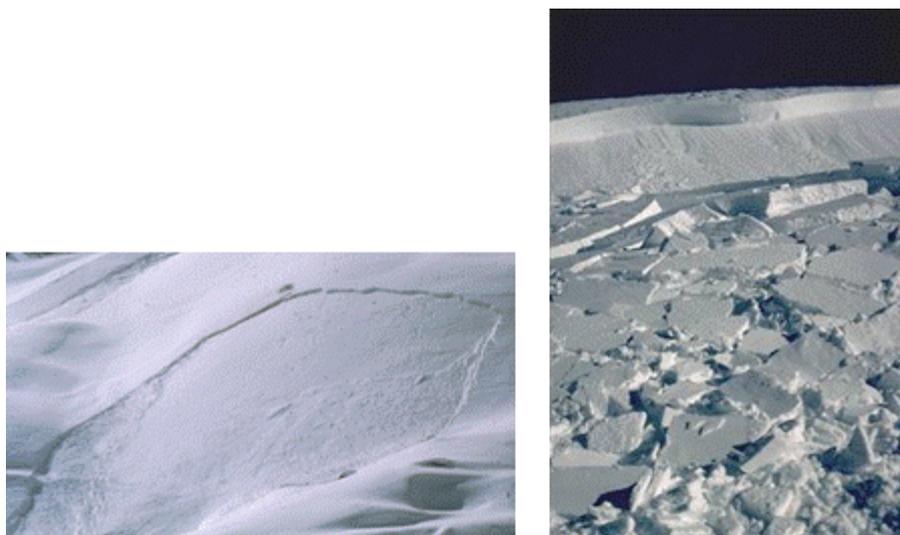


Figure 11. *Avalanches de plaque (Avalanche, 2008)*

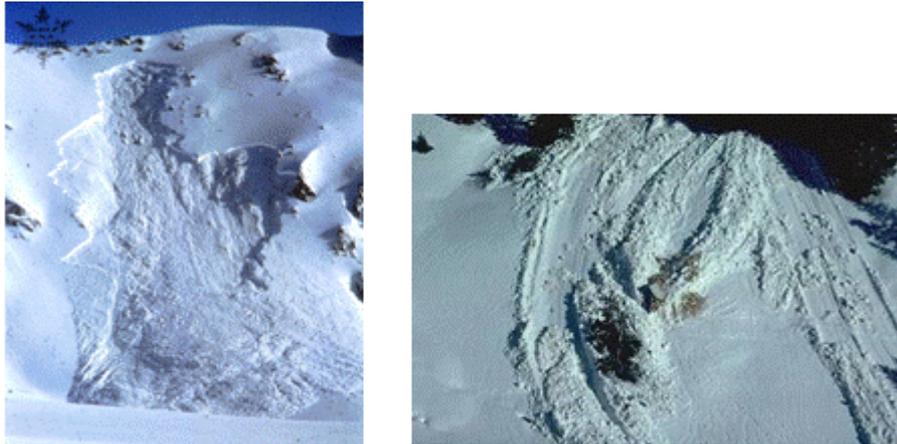


Figure 12. *Avalanches de neige humide (Avalanche, 2008)*

Au niveau du massif, on distingue plusieurs types d'avalanche :

- l'avalanche de fond (cf. figure 13),
- l'avalanche coulante (cf. figure 14),
- l'avalanche de vallée (cf. figure 15).



Figure 13. *Avalanche de fond (Avalanche, 2008)*



Figure 14. *Avalanche coulante* (Avalanche, 2008)



Figure 15. *Avalanche de vallée* (Avalanche 2008)

Une avalanche peut se décomposer selon les éléments génériques suivants (cf. figure 16) :

- une zone de départ (bassin d’accumulation),
- une zone découlement (gorge),
- une zone d’arrêt (cône de déjection).

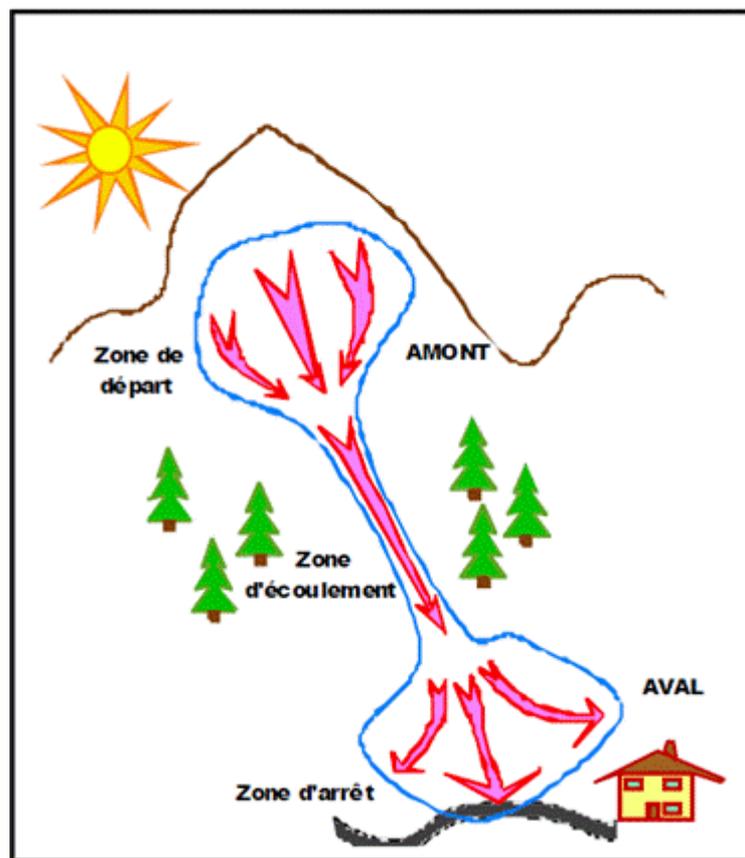


Figure 16. Schéma de déroulement d'une avalanche (Avalanche, 2008)

Le tableau suivant regroupe une classification morphologique des avalanches selon des critères essentiels (la morphologie du site, sa topographie et son exposition, les propriétés physiques du manteau neigeux dans la zone de départ, la cause du déclenchement, la forme du décrochement, la dynamique de l'écoulement, les caractéristiques du dépôt, la situation de l'événement dans la chronologie nivo-météorologique) caractérisant une avalanche.

ZONES	CRITÈRES	CARACTÈRES DISTINCTIFS	
Zone de départ	Type de départ	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Départ spontané : causes internes au manteau neigeux (avalanche spontanée) ◆ Départ provoqué : causes externes au manteau neigeux (avalanche provoquée) <ul style="list-style-type: none"> ● non humaines (comiche, sérac, animal, ...) ● humaines <ul style="list-style-type: none"> - involontaire (avalanche accidentelle) - volontaire (avalanche artificielle) 	
	Forme de départ	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Départ ponctuel : avalanche partant d'un point (départ sous forme de poire, ou de cône) ◆ Départ linéaire : avalanche partant d'une ligne (avalanche de plaque) 	
	Qualité de la neige	Teneur en eau liquide	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Nulle : avalanche de neige sèche ◆ Faible : avalanche de neige humide ◆ Forte : avalanche de neige mouillée
		Cohésion	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Faible : avalanche de neige pulvérulente ◆ Faible à modérée : avalanche de plaque friable (tendre) ◆ Forte : avalanche de neige de plaque dure
		Type de neige	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Récente : <ul style="list-style-type: none"> ● non ventée : neige fraîche ou particules reconnaissables ● ventée : particules reconnaissables ou grains fins ◆ Évoluée : grains fins, faces planes, particules reconnaissables ou grains ronds
Position du plan de glissement	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Dans l'épaisseur du manteau neigeux (avalanche de surface) ◆ Sur le sol (avalanche de fond) 		
Zone d'écoulement	Forme du terrain	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Pente ouverte (avalanche de versant) ◆ Couloir ou gorge (avalanche de couloir) 	
	Dynamique (ou Type d'écoulement)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Avec nuage de particules de neige : <ul style="list-style-type: none"> ● au niveau du front (avalanche en aérosol) ● derrière le front (avalanche avec panache) ◆ Sans nuage (avalanche coulante) 	
	Neige reprise	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Avec ◆ Sans 	
	Présence de blocs et/ou d'autres éléments	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Avec (blocs tabulaires, glace, rochers, arbres) ◆ Sans 	
Zone de dépôt	Rugosité superficielle	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Faible (dépôt fin) ◆ Forte (dépôt grossier : blocs, boules) 	
	Qualité de la neige	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Humide (dépôt humide) ◆ Sèche (dépôt sec) 	
	Souillure visible	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Avec (avalanche souillée : terre, rochers, arbres) ◆ Sans (avalanche propre) 	

Tableau 3. Classification morphologique des avalanches (Avalanche, 2008)

2.2.1.3. Système mécanique et état ultime

Le système mécanique des forces antagonistes comprend : la force de traction (F_T) et la force de résistance (F_R).

Les trois composantes de ce sous système mécanique sont : le manteau neigeux (couches et matériau neige), les sollicitations et la pente.

Le déclenchement d'une avalanche correspond à une rupture d'équilibre dans le manteau neigeux (cf. figure 17) : $F_T > F_R$.

Que le déclenchement soit naturel ou accidentel, le mécanisme de rupture d'équilibre est identique (cf. figure 17).

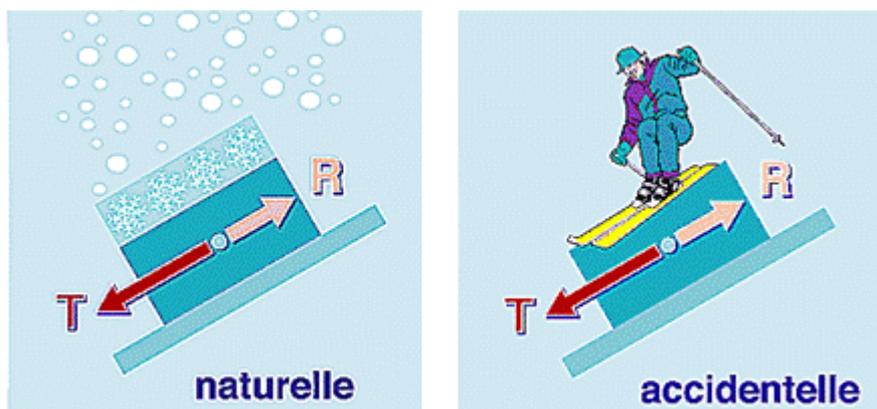


Figure 17. Mécanisme de rupture d'équilibre

2.2.1.4. Difficulté de la prévision mécanique

Il existe une variabilité spatio-temporelle importante des propriétés mécaniques du manteau neigeux et de la neige, par conséquent il est difficile de connaître précisément l'état de ce manteau neigeux et il est difficile d'utiliser des modèles mécaniques pour le caractériser.

Il est également difficile de prévoir les sollicitations exercées sur le manteau neigeux dans la mesure où elles sont multiples et variables.

Il est aussi difficile d'avoir un modèle géométrique cohérent du fait de la complexité des pentes.

2.2.1.5. Facteurs aléatoires agissant sur le manteau neigeux

Les facteurs aléatoires agissant sur le manteau neigeux sont :

- les facteurs liés à la météorologie :
 - épisodes neigeux,
 - épisodes de transformation : vent, soleil, température.
- les facteurs liés aux autres sollicitations :
 - skieurs, animaux,

- pisteurs et purges. Des observations statistiques sont disponibles pour modéliser le caractère aléatoire d'une avalanche, mais il est difficile de trouver des variables statistiques explicatives.

L'avalanche est un aléa du fait :

- de la difficulté de prévision :
 - de son occurrence,
 - de ses caractéristiques.
- qu'elle est la conséquence de causes aléatoires multiples,
- qu'elle est la conséquence de phénomènes mal connus,
- qu'elle est la cause de dangers dont on maîtrise mal les conséquences.

2.2.2. Matériau neige

2.2.2.1. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du matériau neige sont basées sur la théorie de la mécanique des sols. Il s'agit d'un matériau multiphasique dont les ordres de grandeur des principales caractéristiques sont présentés dans le tableau suivant.

Masse volumique	20 kg/m ³ : neige fraîche
	500 kg/m ³ : neige ancienne
Cohésion	8 à 35 kPa : $\rho = 300$ à 460 kg/m ³
	0 à 20 kPa : $\rho < 300$ kg/m ³
Résistance compression	$\sigma_t = 58.3 (\rho / \rho_{\text{glace}})^{2.65}$ pour faces planes et gobelets
	$\sigma_t = 79.7 (\rho / \rho_{\text{glace}})^{2.39}$ pour tout autre type de neige
Module d'Young	$E = 2642 \rho_0^{2.826}$ (en kPa)

Tableau 4. Ordre de grandeur des principales caractéristiques de la neige

2.2.2.2. Différents types de grains

Il existe différents types de grains :

- les cristaux de neige fraîche, qui présentent une cohésion de frittage fragile et se maintiennent sur des pentes raides (*cf.* figure 18),
- les grains fins qui présentent une bonne cohésion de frittage (*cf.* figure 19),
- les grains à faces planes (*cf.* figure 20),
- les gobelets qui présentent une cohésion de frittage nulle et provoquent le glissement des couches supérieures (*cf.* figure 21),
- les grains ronds qui présentent une cohésion capillaire et une cohésion de regel qui rend cette cohésion plus résistante (*cf.* figure 22).

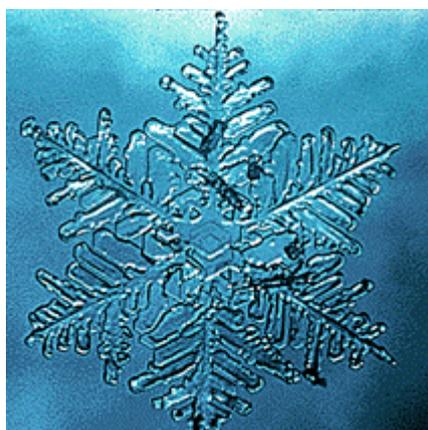


Figure 18. *Cristaux de neige fraîche (Météo France, 2008)*

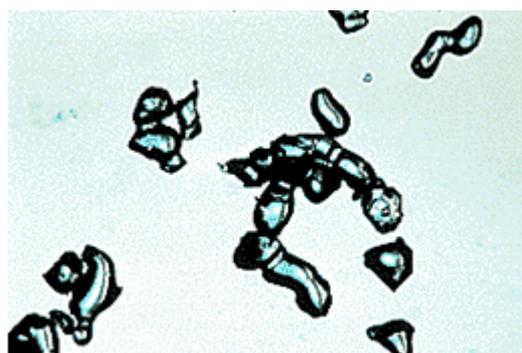


Figure 19. *Grains fins (Météo France, 2008)*

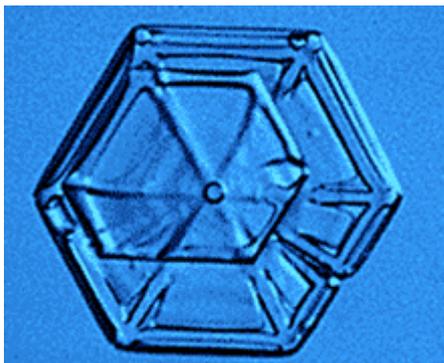


Figure 20. *Grains à face planes* (Météo France, 2008)

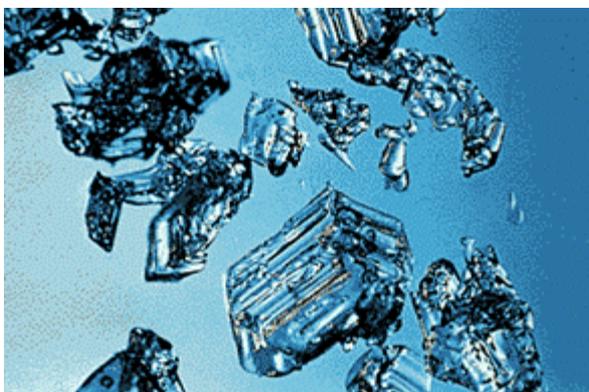


Figure 21. *Gobelets* (Météo France, 2008)



Figure 22. Grains ronds (Météo France, 2008)

2.2.2.3. Phénomène de frittage

Le phénomène de frittage (*cf.* figure 23) correspond à la création d'un pont de glace entre deux grains. Le nombre de ponts est plus important lorsque les grains sont de petite taille. Ce phénomène a un effet stabilisant sur le manteau neigeux, ce qui est dû à l'augmentation de la cohésion ; mais ce phénomène favorise aussi la propagation des fissures en rigidifiant le matériau.

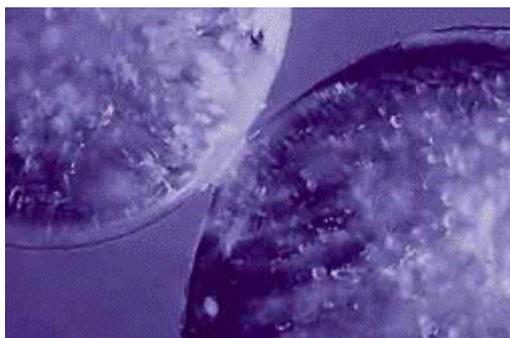


Figure 23. Phénomène de frittage (Anena, 2008)

2.2.3. *Manteau neigeux*

2.2.3.1. Stratification et échelles de variabilité

La stratification du manteau neigeux (*cf.* figure 24) se fait selon un mode de dépôt éolien ; l'ordre de grandeur de la vitesse de dépôt est d'un centimètre par dix minutes. En comparaison, un lœss, dépôt éolien lui aussi, a une vitesse de dépôt d'un centimètre par siècle (Burlet, 2002).

Plusieurs échelles de variabilités de la stratification peuvent être considérées :

- la variabilité temporelle : horaire, journalière (jour, nuit ou matin après midi), hebdomadaire, annuelle, séculaire, millénaire,
- la variabilité spatiale : verticale ou latérale d'une part, centimétrique, métrique à décimétrique d'autre part.

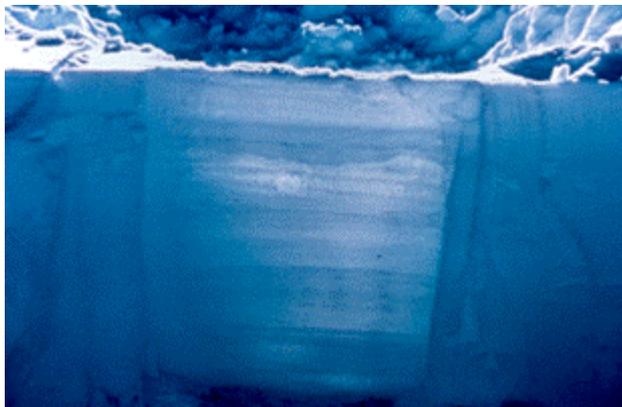


Figure 24. *Illustration de la stratification du manteau neigeux*

2.2.3.2. Faciès de rupture

Le faciès de rupture du manteau neigeux est similaire à celui du faciès de rupture d'un glissement de terrain (*cf.* figures 25 à 27).



Figure 25. *Illustration 1 d'un faciès de rupture d'un glissement de terrain*



Figure 26. *Illustration 2 d'un faciès de rupture d'un glissement de terrain*

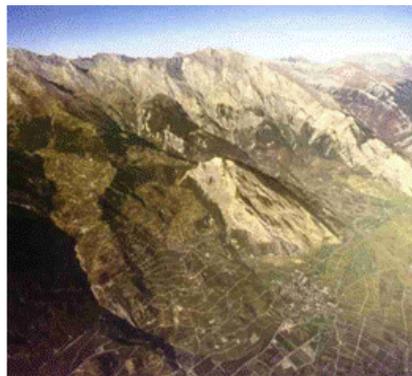


Figure 27. *Illustration 3 d'un faciès de rupture d'un glissement de terrain*

Le faciès de rupture du manteau neigeux présente des ressemblances avec le faciès de rupture d'un terrain vis-à-vis des niches d'arrachement (cf. figures 28 à 30). Les lignes de rupture sont nettes et plus ou moins perpendiculaire au substratum (cf. figures 29 et 30). Les ruptures sont dans les deux cas brutales.



Figure 28. *Niches d'arrachement d'un terrain*



Figure 29. *Illustration 1 de niches d'arrachement d'un manteau neigeux*



Figure 30. Illustration 2 de niches d'arrachement d'un manteau neigeux

2.2.3.3. Mécanisme de rupture

On distingue principalement deux types de mécanismes de rupture : le glissement circulaire (cf. figure 31) et le glissement plan (cf. figure 32).

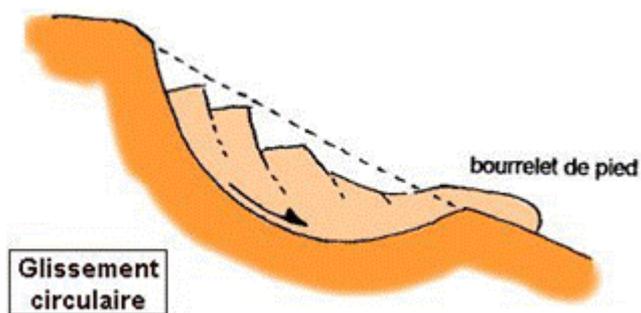


Figure 31. Rupture du manteau neigeux par glissement circulaire

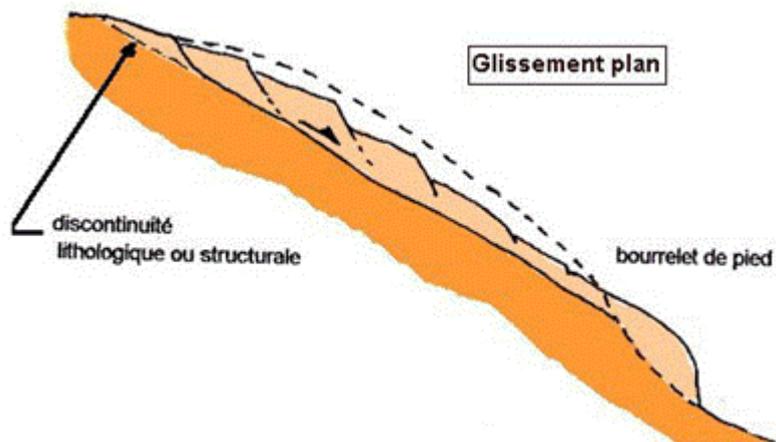


Figure 32. Rupture du manteau neigeux par glissement plan

Les mécanismes de rupture du manteau neigeux dépendent :

- de l'évolution des paramètres caractérisant les sollicitations,
- de changement de géométrie,
- de l'occurrence d'actions extérieures,
- de la résistance limite.

2.2.3.4. Modèle mécanique

Le modèle mécanique retenu pour caractériser le manteau neigeux est en général élasto-viscoplastique de type Mohr-Coulomb ($\tau = c + \sigma \tan \varphi$). La difficulté réside dans la détermination des paramètres et de leurs comportements puisqu'ils présentent des grandes variabilités temporelle (horaire à hebdomadaire) et spatiale (quelques décimètres). Des réponses possibles à cette problématique peuvent être données par le traitement de données par la géostatistique combinée à des traitements basés sur des techniques de simulations.

Une approche possible consiste à déterminer un facteur de stabilité F au sens de Bishop. Ce facteur de stabilité correspond au rapport des forces résistantes sur les forces motrices.

3. Etage 3 – Analyse de risques : identification et estimation

L'objet de cette partie est de présenter la démarche d'analyse de risques et les méthodes qualitatives et quantitatives d'analyse de risques.

3.1. Chapitre 1 – Démarche d'analyse de risques

3.1.1. Cycle d'analyse

Les principales phases d'un cycle d'analyse de risques sont schématisées à la figure suivante.

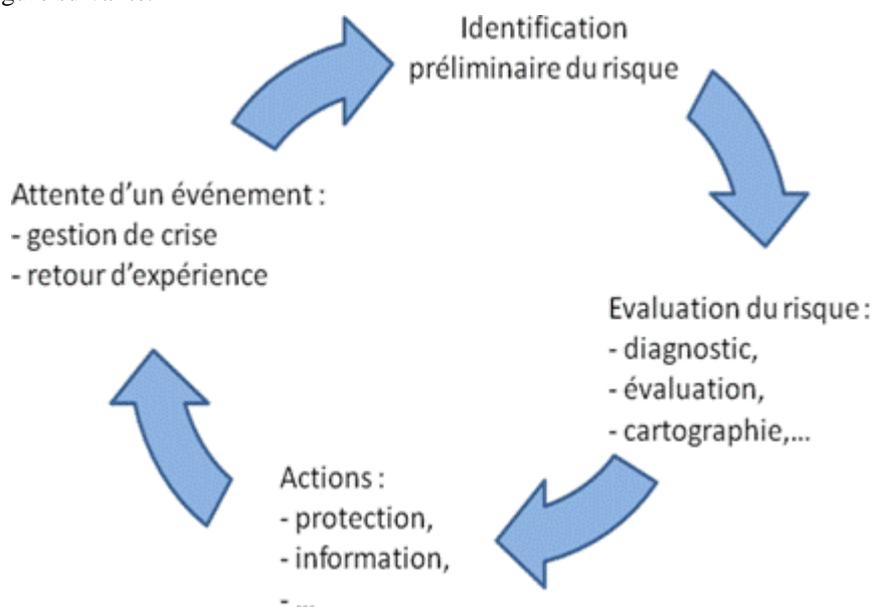


Figure 33. Cycle d'analyse de risques

3.1.2. Composants

Les composants pris en compte pour l'analyse système dépendent de l'échelle d'étude ainsi que de ses limites spatiales et temporelles ; l'échelle d'étude peut être :

- le manteau neigeux,
- la station de ski,
- le massif.

A l'échelle du manteau neigeux, es composants étudiés lorsque l'on se concentre sur le manteau neigeux sont présentés à la figure 34.



Figure 34. Composants du système considérés pour l'étude du manteau neigeux (Clergue et al., 2006)

A l'échelle de la station de ski, les composants étudiés lorsque l'on se concentre sur la station de ski sont :

- les pentes skiables,
- les pentes non skiables
- les bâtiments,
- les individus,
- les infrastructures.

A l'échelle du massif, les composants étudiés lorsque l'on se concentre sur le massif sont :

- les stations
- les zones hors station.

3.1.3. Fonctions

A l'échelle du manteau neigeux, dans le contexte de l'étude du risque avalanches, les fonctions associées au manteau neigeux d'une piste sont :

- supporter les skieurs,
- être stable,
- être de qualité,
- être damé tous les jours,
- comporter assez de neige,
- être sécurisé, c'est-à-dire porter l'ensemble des informations nécessaires pour que le skieur soit informé des risques encourus et comporter les équipements limitant les conséquences des chutes (filets,...).

A l'échelle de la station de ski, les fonctions associées à la station de ski sont :

- pour les pentes skiabiles :
 - supporter le manteau neigeux,
 - être sécurisées, c'est-à-dire avoir l'ensemble des informations nécessaires pour que le skieur soit informé des risques encourus et comporter les équipements limitant les conséquences des chutes (filets,..),
 - être de qualité,
 - être surveillées,
 - être damées tous les jours,
 - comporter assez de neige,
- pour les pentes non skiabiles :
 - supporter le manteau neigeux,
 - être sécurisées, c'est-à-dire avoir l'ensemble des informations nécessaires pour que le skieur soit informé des risques encourus et n'y accède pas,
- pour les bâtiments :
 - résister,
 - abriter les personnes,
- pour les individus :
 - être informés,
 - être en sécurité,
 - être responsable,
- pour les infrastructures :
 - résister,
 - transporter les flux (personnes, fluides,...).

Les fonctions associées au massif sont :

- être stable,
- être surveillé,
- être purgé.

3.1.3. Causes et leurs combinaisons

Les causes et leurs combinaisons considérées pour l'analyse du risque avalanche sont :

- les sollicitations naturelles : poids propre,
- les sollicitations anthropiques : skieur, piéton, animal,
- les sollicitations déterministes : explosion, par purge.

Remarque : d'autres sollicitations exceptionnelles auraient pu être prise en compte :

- rupture d'un réservoir d'altitude pour canons à neige,
- séisme,
- enchaînement d'avalanches,
- ...

3.1.4. *Conséquences*

Dans l'analyse de risque avalanche nous considérons les conséquences sur :

- les acteurs (skieurs, pisteurs,...) qui peuvent conduire à une mort par étouffement, par choc, par le froid,....,
- les agis « passifs » : biens et personnes,
- les ouvrages à risque : retenues d'eau, bâtiments, routes, remontées mécaniques, ...
- la station (« image », exploitation) et l'économie locale,
- la réglementation.

3.1.5. *Scénarios*

Les principaux scénarios qui sont a priori (connaissance des scénarios préalables à l'analyse qualitative des risques) connus sont :

- l'avalanche provoquée par un groupe de skieurs,
- l'avalanche provoquée par une purge,
- l'avalanche provoquée par une succession d'avalanches,
- l'avalanche provoquée par un redoux,
- l'avalanche de plaque,
- l'avalanche de poudreuse.

Les méthodes d'analyse de risques permettent d'identifier de manière systématique l'ensemble des scénarios de déclenchement et de déroulement d'une

avalanche, ainsi que les mécanismes déclencheurs et les enchaînements de mécanismes conduisant aux dommages provoqués par les avalanches.

3.2. Chapitre 2 – Méthodes qualitatives d'analyse de risques

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus en menant différentes méthodes d'analyse de risques (arbre des causes, arbre d'événements, analyse des modes de défaillance et de leurs effets, analyse préliminaire de dangers, nœud papillon, analyse préalable de criticité) sur l'aléa d'avalanche en station. Les démarches de ces méthodes sont détaillées au troisième étage de la maison CyberRisques.

3.2.1. Arbre des causes

Le système considéré pour construire les arbres des causes présentés dans ce paragraphe est celui d'une station de ski (échelle intermédiaire entre la pente et le massif).

La figure suivante représente l'arbre des causes conduisant au processus de formation d'une couche homogène de neige.

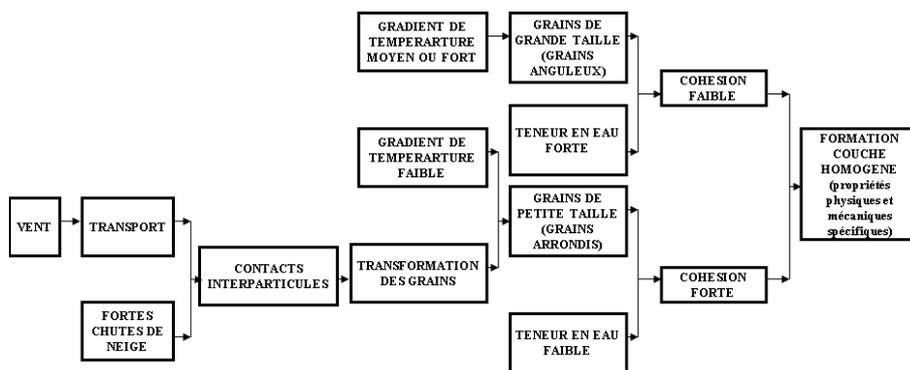


Figure 35. Arbre des causes conduisant à la formation d'une couche homogène (Batoke, 2008)

La figure suivante représente l'arbre des causes conduisant à un événement redouté pouvant être : un dommage structurel, un dommage fonctionnel, un dommage environnemental ou un dommage corporel.

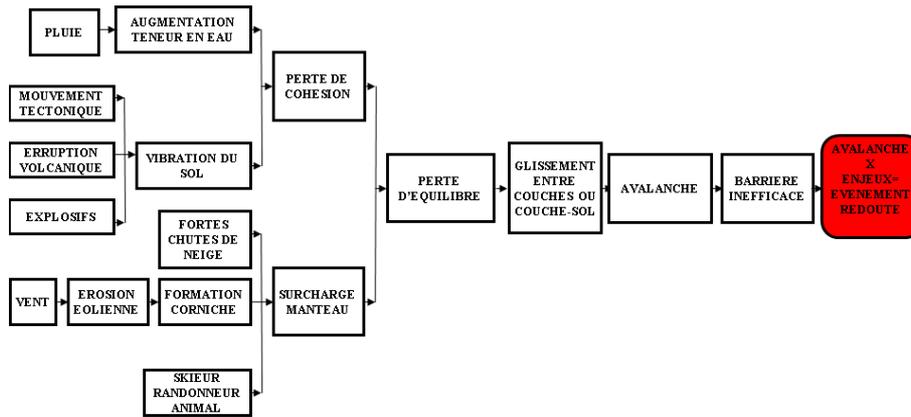


Figure 36. Arbre des causes conduisant à un événement redouté (Batoke, 2008)

3.2.2. Arbre d'événements

Le système considéré pour construire les arbres des causes présentés dans ce paragraphe est celui d'une station de ski (échelle intermédiaire entre la pente et le massif).

La figure suivante représente l'arbre d'événements d'une avalanche allant des événements initiateurs à l'impact sur les enjeux.

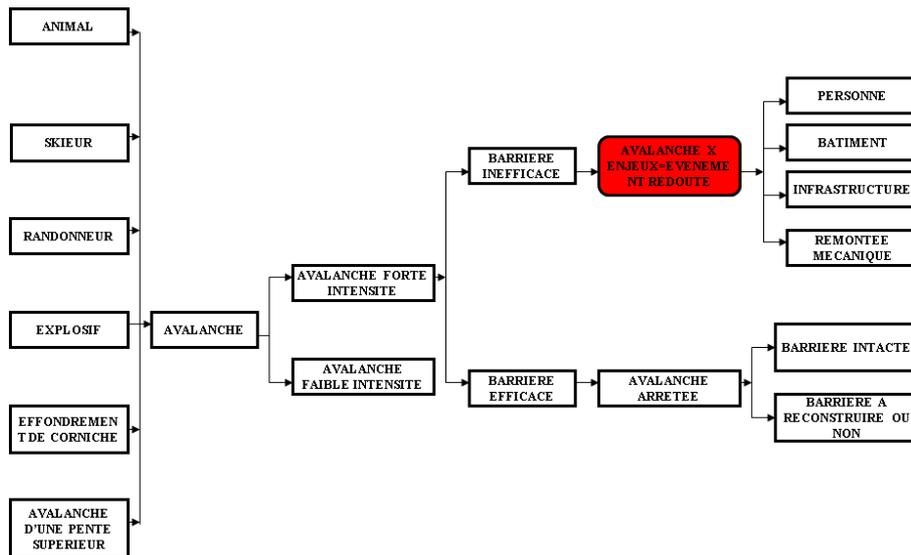


Figure 37. Arbre d'événements du déclenchement d'une avalanche (Batoke, 2008)

La figure suivante représente l'arbre d'événements ayant comme point de départ une personne prise dans une avalanche.

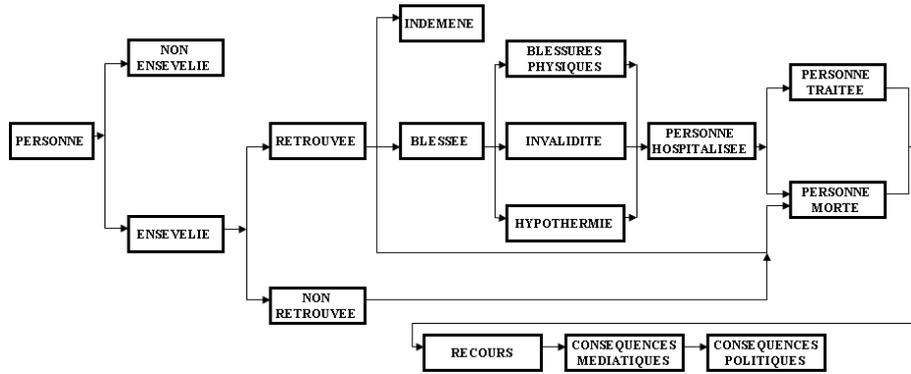


Figure 38. Arbre d'événements du déclenchement d'une avalanche (Batoke, 2008)

La figure suivante représente un arbre d'événements centré sur un bâtiment sollicité par une avalanche.

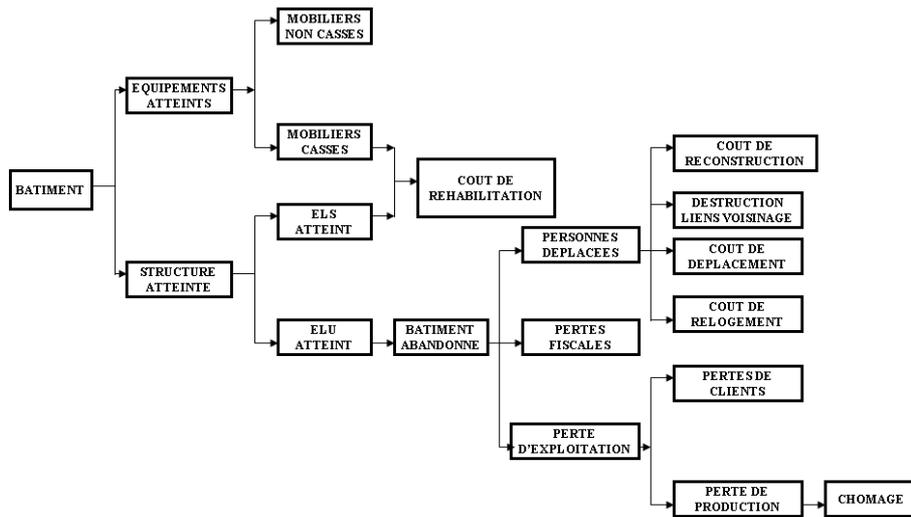


Figure 39. Arbre d'événements de dégradation d'un bâtiment sous avalanche (Batoke, 2008)

La figure suivante représente un arbre d'événements débutant par une route sollicitée par une avalanche.

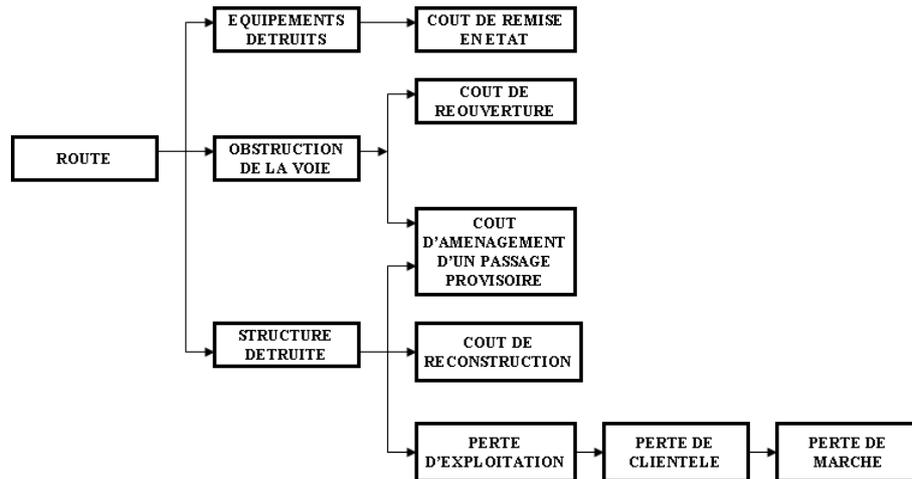


Figure 40. *Arbre d'événements de dégradation d'une route sous avalanche (Batoke, 2008)*

Le système considéré pour les arbres d'événements des figures 41 à 45 est schématisé à la figure 34 ; l'échelle d'étude est celle du manteau neigeux. Les sollicitations pris en compte sont :

- les conditions météorologiques (soleil, pluie, vent),
- les skieurs, randonneurs et gestionnaires,
- les animaux.

L'arbre d'événements suivant décrit en quoi le système répond à la fonction « supporter le poids des skieurs ».

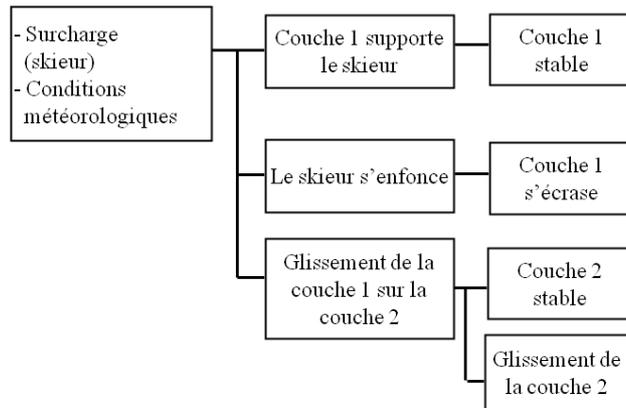


Figure 41. Arbre d'événements relatif à la fonction « supporter le poids des skieurs » (Clergue et al., 2006)

L'arbre d'événements suivant décrit en quoi le système répond à la fonction « être sécurisé ».

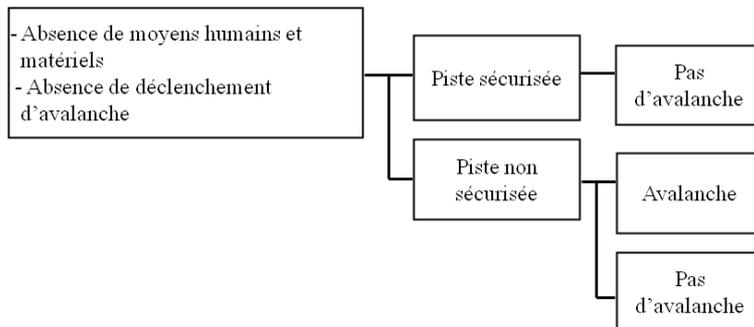


Figure 42. Arbre d'événements relatif à la fonction « être sécurisé » (Clergue et al., 2006)

L'arbre d'événements suivant décrit en quoi le système répond à la fonction « être damé tous les jours ».

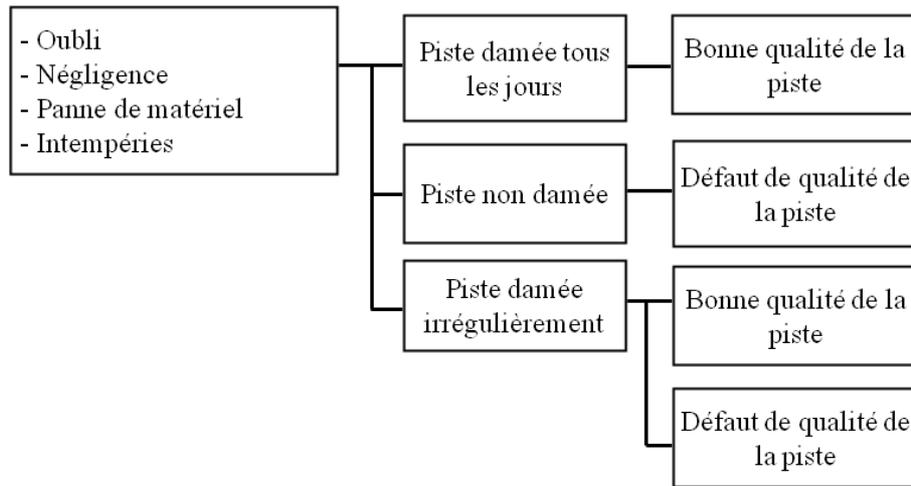


Figure 43. *Arbre d'événements relatif à la fonction « être damé tous les jours » (Clergue et al., 2006)*

L'arbre d'événements suivant décrit en quoi le système répond à la fonction « comporter assez de neige ».

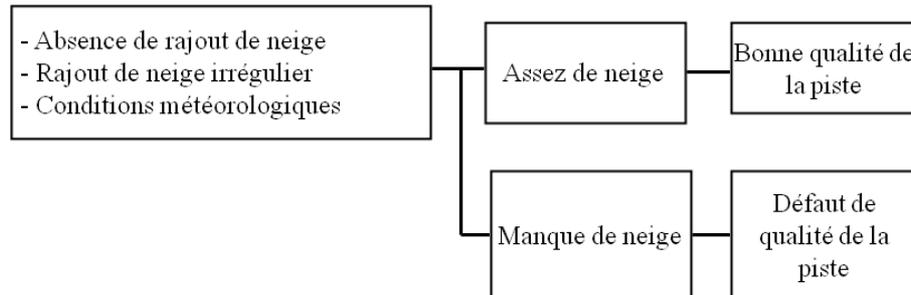


Figure 44. *Arbre d'événements relatif à la fonction « comporter assez de neige » (Clergue et al., 2006)*

L'arbre d'événements suivant décrit en quoi le système répond à la fonction « être de qualité ».

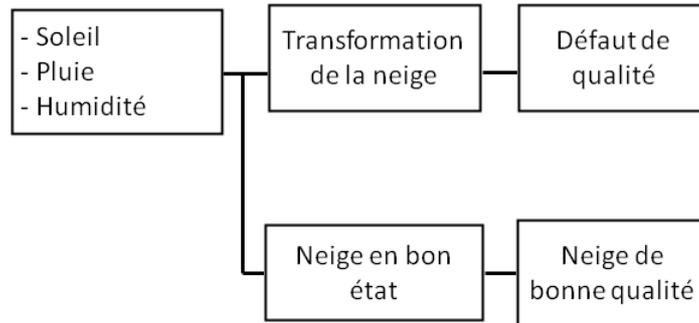


Figure 45. Arbre d'événements relatif à la fonction « être de qualité » (Clergue et al., 2006)

3.2.3. Analyse des modes de défaillances et de leurs effets

L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets présentée dans le tableau suivant correspond au système décrit à la figure 34 ; l'échelle d'étude est celle du manteau neigeux et les sollicitations sont les suivantes :

- les conditions météorologiques (soleil, pluie, vent),
- les skieurs, randonneurs et gestionnaires,
- les animaux.

Élément	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effet direct de défaillance	Effet indirect de défaillance
Couches de neige	Supporter les skieurs	Glissement de 1 sur 2	Surcharge	Avalanche couche 1	Perte économique
		Glissement de 2 sur le sol	Avalanche de la couche 1	Avalanche couche 2	Perte humaine
		Glissement de 1 et 2 sur le sol	Surcharge	Avalanche couches 1 et 2	Dégradation de l'environnement
		Portance insuffisante	Densité trop faible de la neige	Enfoncement du skieur	Perte d'image de marque de la station
	Être stable	Glissement de 1 sur 2	Surcharge (neige, pluie, animaux)	Avalanche couche 1	Perte économique
		Glissement de 2	Avalanche de la	Avalanche	

		sur le sol	couche 1	couche 2	Perte humaine Dégradation de l'environnement Perte d'image de marque de la station
		Glissement de 1 et 2 sur le sol	Mauvaise cohésion entre le sol et la couche 2	Avalanche couches 1 et 2	
	Etre sécurisé	Absence de sécurité	Absence d'information sur les dangers du hors piste Absence de moyens humains et matériels Absence de déclenchement d'avalanche	Avalanche	Perte économique Perte humaine Dégradation de l'environnement Perte d'image de marque de la station
	Etre de qualité	Transformation de la neige	Soleil, pluie, humidité	Défaut de qualité	Perte d'image de marque de la station Pertes économiques
	Etre damé tous les jours	Absence de damage	Oubli Négligence Panne matériel Intempéries	Défaut qualité de la piste	Perte d'image de marque de la station Pertes économiques
	Comporter assez de neige	Manque de neige	Absence de rajout de neige Rajout de neige irrégulier Conditions météorologiques	Défaut qualité de la piste	Perte d'image de marque de la station Pertes économiques

Tableau 5. Analyse des modes de défaillance et de leurs effets sur le système de la figure 34 (Clergue et al., 2006)

3.2.4. Analyse préliminaire des dangers

A l'échelle de la station de ski, les composants du système considérés pour cette analyse préliminaire des dangers (APR) sont ici uniquement la pente, les biens et les personnes. La phase du système étudié, pour reprendre la terminologie de l'APR, est ici l'hiver.

L'élément dangereux est la neige.

Les événements causant la situation dangereuse sont :

- la surcharge de neige due aux conditions météorologiques,
- la surcharge de neige due à un facteur humain,
- la défaillance des mesures préventives (purge,...).

La situation dangereuse considérée ici est l'avalanche de plaque.

Les événements menant à un accident sont :

- la défaillance de la signalisation,
- la défaillance du système d'alerte météorologique,
- la défaillance de l'implantation ou du dimensionnement des biens,
- la défaillance de l'évaluation de l'aléa,
- le non respect des consignes (imprudences,...).

Les accidents possibles sont :

- que des personnes soient emportées sur le parcours de l'avalanche,
- que des biens matériels soient emportés sur le parcours de l'avalanche,
- que des dégâts catastrophiques se produisent sur l'environnement.

Les réponses à apporter, pour rendre le risque acceptable, sont :

- de diminuer l'occurrence de l'avalanche en :
 - maîtrisant le manteau neigeux dans la zone de départ de l'avalanche,
 - déclenchant préventivement l'avalanche (purge).
- de diminuer la gravité de des conséquences de l'avalanche en :
 - agissant sur l'énergie de l'avalanche déclenchée (dispositifs de protection),
 - déclenchant préventivement l'avalanche,
 - évacuant la zone menacée.

3.2.5. *Nœud papillon*

La méthode du nœud papillon est développée ici, étape par étape, pour une avalanche de plaque sur un système à l'échelle de la station de ski constitué uniquement ici de la pente, de biens et d'individus.

3.2.5.1. Etape 1 – Identification et caractérisation des potentiels de danger

Les situations, conditions ou pratiques comportant en elles-mêmes un potentiel à causer des dommages sont :

- le hors-piste (randonnées, skieurs),
- les conditions météorologiques (chute de neige, vent, pluie)
- les purges.

3.2.5.2. Etape 2 – Réduction des potentiels de danger

Les solutions pouvant être mises en place pour réduire les potentiels de danger sont :

- l'information des skieurs et des randonneurs sur les dangers du hors-piste,
- la surveillance des conditions météorologiques pour informer et procéder à des purges en temps utiles,
- une formation accrue des personnels réalisant les purges.

3.2.5.3. Etape 3 – Estimation des conséquences potentielles

La nature des conséquences potentielles d'une avalanche de plaque sont :

- pour les personnes : les accidents légers, les accidents graves, les décès, les traumatismes moraux,
- pour les biens : l'arrêt de communication, de transport alimentaire, l'impossibilité de se loger, les coupures d'électricités, le chômage du à un arrêt de production, l'obstruction ou la destruction de réseau, la diminution du nombre de touristes, les poursuites judiciaires, les indemnités financières,...
- pour l'environnement : perturbation de l'écosystème, destruction de forêts,...

3.2.5.4. Etape 4 – Evaluation préliminaire des risques

Le tableau suivant présente une classification a priori des différentes conséquences en « risque tolérable », « risque intermédiaire » et « risque intolérable ».

	Risque tolérable	Risque intermédiaire	Risque intolérable
Personnes	Accidents légers	Accidents graves Traumatismes moraux	Décès
Biens	Diminution du nombre de touristes Obstruction de réseaux	Chômage Arrêt de communication Coupures d'électricité Destruction de réseaux Arrêt de production de la station	Transports alimentaires impossibles Plus de logements
Environnement	Perturbation de l'écosystème	Destruction de forêt	

Tableau 6. *Evaluation préliminaire des risques d'une avalanche de plaque*

3.2.5.5. Etape 5 – Sélection des scénarios critiques

Les scénarios sélectionnés ici sont ceux conduisant à des risques inacceptables ou moyens (*cf.* tableau 6).

3.2.5.6. Etape 6 – Etude détaillée de réduction des risques

Les barrières de prévention pour limiter l'occurrence de l'aléa sont par exemple : l'information des personnes, la préparation des pistes, la mise en place de purges.

Les barrières de protection pour limiter les conséquences sont par exemple : des renforcements de structure, des murs pare-avalanches, des filets de protection, des logements de secours, des groupes électrogènes,....

3.2.5.7. Etapes 7 et 8 – Quantification des effets redoutés et calcul des distances à risques

La quantification des effets redoutés peut se baser sur une meilleure connaissance de la géométrie des pentes, du modèle mécanique de l'avalanche, des impacts sur les constructions, des impacts sur les personnes. Cette meilleure

connaissance peut être menée sur la base de statistique, de modèle théorique, de simulations,...

On peut également se fixer une échelle qualitative des conséquences et positionner les différentes conséquences identifiées sur cette échelle. Si l'on considère une échelle à quatre niveaux (peu important, assez important, important, très important) les conséquences des systèmes critiques (cf. 3.2.5.5) peuvent être classés de la manière suivante.

	Peu important	Assez important	Important	Très important
Personnes		Traumatismes moraux	Accidents graves	Décès
Biens	Déneigement à effectuer	Arrêt de communication Coupures d'électricité Chômage Arrêt de production de la station	Destruction de réseaux Transports alimentaires impossibles	Plus de logements
Environnements	Erosion de la piste	Destruction de forêt		

Tableau 7. Estimation qualitative de la gravité des effets redoutés

Le tableau suivant regroupe l'analyse des distances à risques correspondant à l'estimation qualitative des effets redoutés du tableau 7. Le seuil inférieur correspond à la « valeur » de gravité pour laquelle un effet redouté passera d'une classe d'importance à une classe inférieure, par exemple : passage de la classe « effet important » à la classe « effet assez important ». A l'inverse un seuil supérieur correspond à la « valeur » de gravité pour laquelle un effet redouté passera d'une classe d'importance à une classe supérieure, par exemple : passage de la classe « effet important » à « effet très important ». Le tableau suivant regroupe les seuils des effets redoutés du tableau 7.

	Seuil inférieur	Seuil supérieur
Décès	Sera toujours considéré comme très important	Impossible
Accidents graves	Si la durée d'invalidité est peu importante	Si les conséquences provoquent une invalidité
Traumatismes moraux	Si la durée est faible	S'ils persistent dans le temps
Plus de logements	Si les personnes touchées	Impossible

	sont relogées	
Destruction de réseaux	Si les réparations sont réalisables rapidement	Si elle affecte une partie très importante du réseau
Transports alimentaires impossibles	Si l'épisode d'arrêt est court	Si l'épisode dure longtemps
Arrêt de communication	Si l'épisode d'arrêt est court	Si l'épisode dure longtemps
Coupures d'électricité	Si l'épisode d'arrêt est court	Si l'épisode dure longtemps
Chômage	Si la période est courte et que les « effets secondaires » sont faibles	Si la période est longue et que les « effets secondaires » sont très importants
Arrêt de production de la station	Si les conséquences financières sont faibles	Si les conséquences financières sont importantes
Destruction de forêt	Si l'ampleur est négligeable	Si l'ampleur est importante

Tableau 8. Détermination des distances à risques

3.2.5.8. Etape 9 – Evaluation du niveau de risque gravité / probabilité

L'évaluation quantitative de la probabilité d'apparition des effets peut être réalisée par exemple à partir des données de retour d'expérience. Le tableau suivant correspond à une estimation qualitative de ces probabilités dans l'hypothèse où l'on ne dispose pas de probabilités suffisamment satisfaisantes (faible fiabilité de l'information, échantillon non représentatif,...).

	Peu probable	Assez probable	Probable	Très probable
Personnes		Décès Accidents graves	Traumatismes moraux	
Biens	Destruction de réseau Plus de logements	Chômage Transports alimentaires impossibles	Arrêt de communication	Coupures d'électricité Arrêt de production de la station
Environnements			Destruction de forêt	

Tableau 9. Estimation qualitative des probabilités des effets redoutés du tableau 7

3.2.5.9. Etape 10 – Acceptabilité du risque

Le tableau suivant présente le croisement entre la gravité des effets redoutés (*cf.* tableau 7) et les probabilités de ces effets (*cf.* tableau 9). De ce tableau, on en déduit les risques jugés tolérables (sur fond blanc), les risques jugés intermédiaires (sur fond gris clair) et les risques jugés intolérables (sur fond gris foncé). Des dispositions doivent ensuite être prises (ce qui est l'objet de l'étape 11) pour se prémunir (prévention et protection) des risques jugés intolérables et démontrer en quoi les risques jugés intermédiaires peuvent être considérés comme tolérables (sinon il faut s'en prémunir également).

Probabilité / Gravité	Peu probable	Assez probable	Probable	Très probable
Peu important				
Assez important		Chômage	Traumatismes moraux Arrêt de communication Destruction de forêt	Coupures d'électricité Arrêt de production de la station
Important	Destruction de réseau	Transport alimentaire		
Très important	Plus de logements	Accidents graves Décès		

Tableau 10. Estimation des risques associés aux effets redoutés du tableau 7

Le tableau suivant présente la différence de classification des risques associés aux effets redoutés avant (tableau 6) et après (tableau 9) analyse détaillée ; les différences sont repérées par un fond grisé.

	Avant analyse	Après analyse
Décès	Risque intolérable	Risque intolérable
Accidents graves	Risque intermédiaire	Risque intolérable
Traumatismes moraux	Risque intermédiaire	Risque intermédiaire
Plus de logements	Risque intolérable	Risque intermédiaire
Destruction de réseaux	Risque intermédiaire	Risque intermédiaire
Transports alimentaires impossibles	Risque intolérable	Risque intermédiaire
Arrêt de communication	Risque intermédiaire	Risque intermédiaire

Coupures d'électricité	Risque intermédiaire	Risque intolérable
Chômage	Risque intermédiaire	Risque tolérable
Arrêt de production de la station	Risque intermédiaire	Risque intolérable
Destruction de forêt	Risque intermédiaire	Risque intermédiaire

Tableau 11. Comparaison de classement des effets redoutés avant et après analyse détaillée

3.2.5.10. Etape 11 – Etablissement des plans de prévention

Il s'agit ensuite d'établir ou de modifier le plan particulier d'intervention (PPI) et le plan communal de sauvegarde (PCS) de manière à mettre en place les dispositifs de prévention et de protection permettant de rendre les effets redoutés jugés à risques intolérables ou intermédiaires en effets redoutés jugés à risques tolérables.

3.2.6. Analyse préalable de criticité

L'analyse préalable de criticité consiste à estimer la gravité et la probabilité d'apparition de chaque scénario de dégradation identifié lors d'une analyse qualitative de risque de manière à centrer l'analyse quantitative sur les scénarios jugés les plus à risques. Un exemple d'analyse préalable de criticité est présenté à l'étape 10 (cf. 4.2.5.9) de la méthode du nœud papillon.

Les tableaux suivants sont des exemples d'échelle d'estimation de l'occurrence et de la gravité de scénarios de dégradation.

Niveau d'occurrence	Occurrence	Description
1	Peu probable	Scénario vraisemblable mais rarement rencontré
2	Assez probable	Scénario pouvant survenir une fois durant l'année
3	Probable	Scénario pouvant survenir plusieurs fois durant l'année
4	Très probable	Scénario pouvant survenir régulièrement

Tableau 12. Exemple d'échelle d'estimation de l'occurrence de scénario de dégradation

Niveau de gravité	Gravité	Description
1	Effet mineur	Diminution de la fréquentation
2	Effet significatif	Domages dus à la perte d'exploitation Mauvais image de marque
3	Effet majeur	Détérioration de l'équipement Domages réversibles aux personnes
4	Effet catastrophique	Décès

Tableau 13. Exemple d'échelle d'estimation de la gravité de scénario de dégradation

Les scénarios correspondant au système décrit à la figure 34 sont schématisés à la figure suivante. L'analyse préalable de la criticité de ces scénarios est regroupée dans le tableau suivant.

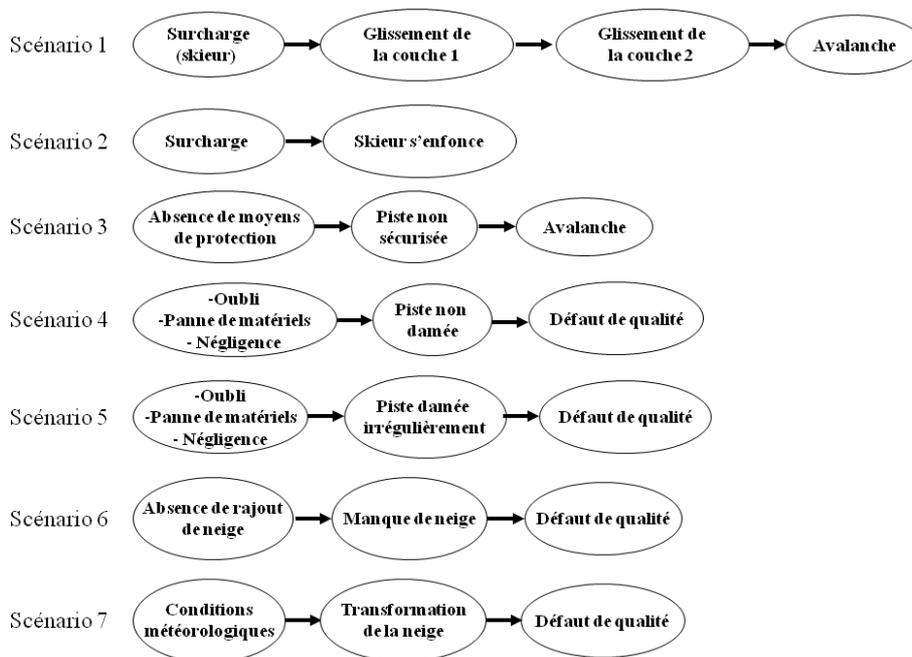


Figure 46. Scénarios correspondant au système de la figure 34

Gravité \ Probabilité	Peu probable	Assez probable	Probable	Très probable
Effet mineur				Scénario 2 Scénario 7
Effet significatif	Scénario 4		Scénario 5	Scénario 6
Effet majeur		Scénario 3		
Effet catastrophique		Scénario 1		

Tableau 14. Analyse préalable de la criticité du système de la figure 34

3.3. Chapitre 3 – Méthodes quantitatives d'analyse de risques

La méthode quantitative présentée ici l'est à l'échelle d'une pente. Elle est basée sur une approche mécaniste et fiabiliste, l'objectif étant de quantifier la probabilité d'occurrence d'une avalanche de pente. D'autres approches plus naturalistes existent et ne sont pas exposées ici.

Cette méthode est très détaillée et met en œuvre des outils et méthodes de la fiabilité ; elle ne s'intéresse pas à la dynamique de l'avalanche mais uniquement à l'évaluation de la probabilité de son déclenchement.

Ce chapitre est décomposé en six paragraphes qui répondent chacun à des questions précises :

- reconnaissance de la neige : comment acquérir les informations sur le manteau neigeux (grains et couches) autant en géométrie qu'en résistance mécanique ?
- modèle de la pente : comment modéliser la topographie du sol naturel et celle du manteau neigeux ?
- modèle probabilistes des variables : quelles sont les lois de probabilités que l'on peut associer aux variables aléatoires à introduire dans le modèle de stabilité ?
- modèles statistiques : quelles sont les statistiques disponibles pour caractériser l'occurrence des événements (avalanches, décès, ...) ?
- modèle fiabiliste de stabilité : comment peut-on estimer la probabilité d'occurrence d'une avalanche sur une pente ?
- modèle économique et social : comment peut-on estimer les conséquences d'une avalanche ?

3.3.1. Reconnaissance de la neige

3.3.1.1. Connaître le manteau neigeux à l'échelle de la pente avalancheuse.

La quantification mécanique de la stabilité de la neige nécessite de connaître les paramètres suivants en tout point de la pente et à chaque instant :

- masse volumique γ ,
- cohésion c ,
- frottement ϕ ,
- topographie,
- épaisseur des couches e .

La figure suivante présente une modélisation de différentes couches constitutives d'un manteau neigeux à l'échelle de la pente avalancheuse.

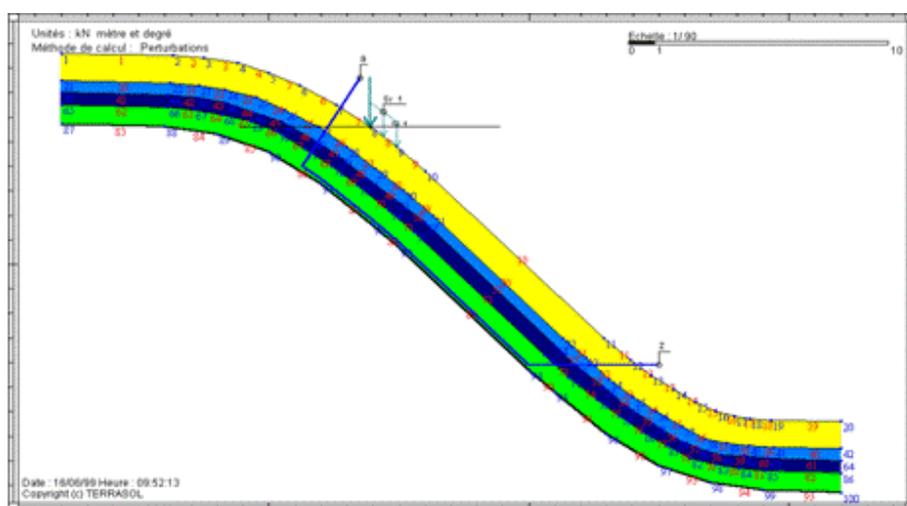


Figure 47. Modélisation de différentes couches d'un manteau neigeux (Burlat, 2002)

Ce paragraphe expose une recherche finalisée pour mieux connaître le manteau neigeux dans une pente avalancheuse. Les objectifs de cette recherche étaient les suivants :

- avoir une meilleure connaissance des paramètres de corrélation avec la résistance de pointe q_d ,
- obtenir les caractéristiques statistiques de ces paramètres, leurs plages de variations et les allures des distributions.

La figure suivante présente des résultats de sondage (profil pénétrométrique et profil stratigraphique) permettant d'obtenir la résistance de pointe en fonction de la profondeur. Ces résultats de sondage permettent d'avoir une information ponctuelle mais très riche.

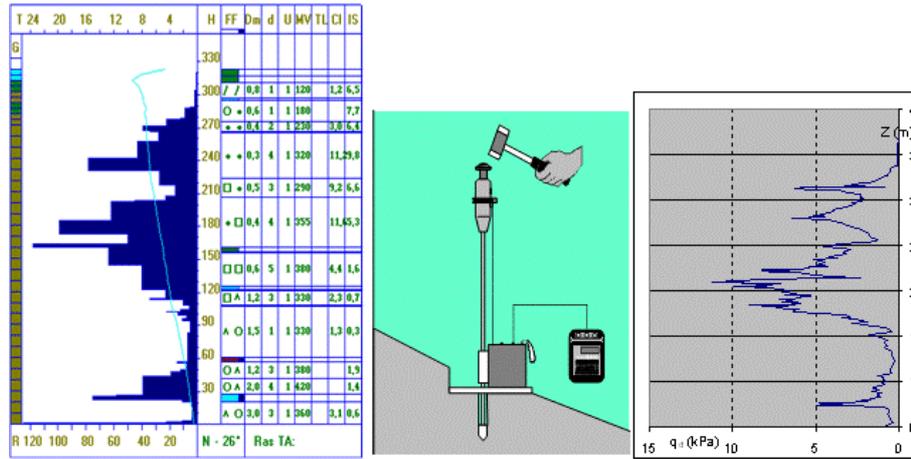


Figure 48. Exemple de profils pénétrométrique et stratigraphique et mode d'obtention (Burlet, 2002)

La figure suivante présente deux types d'essais permettant d'obtenir la résistance à la compression simple et la contrainte tangentielle qui peuvent ensuite être corrélées à la cohésion ($R_c = 2c$ et $c = \tau$ dans le cas de matériau purement cohérent).



Figure 49. Essais permettant d'obtenir la résistance à la compression simple et la contrainte tangentielle de la neige (Burlet, 2002)

La figure suivante, correspondant à des résultats d'essais menés avec les appareils de la figure 49, démontre la corrélation entre résistance à la compression simple et cohésion de la neige ($R_c = 2c$).

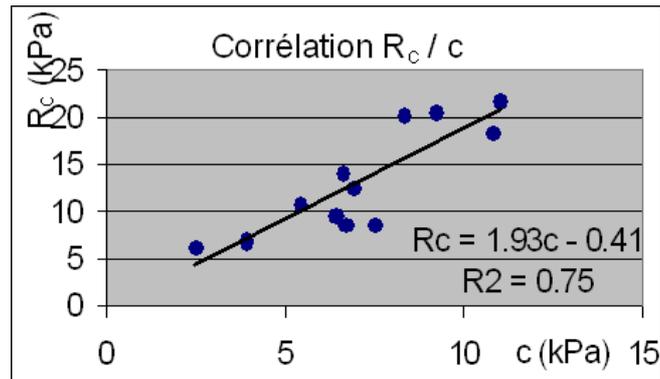


Figure 50. Validation par essai de la corrélation entre résistance à la compression simple et cohésion de la neige (Burlet, 2002)

Les figures suivantes montrent les corrélations existantes pour la neige entre la cohésion et la résistance de pointe d'une part et entre la masse volumique et la résistance de pointe d'autre part. Ces résultats permettent de montrer la similitude de comportement de la neige et des sols.

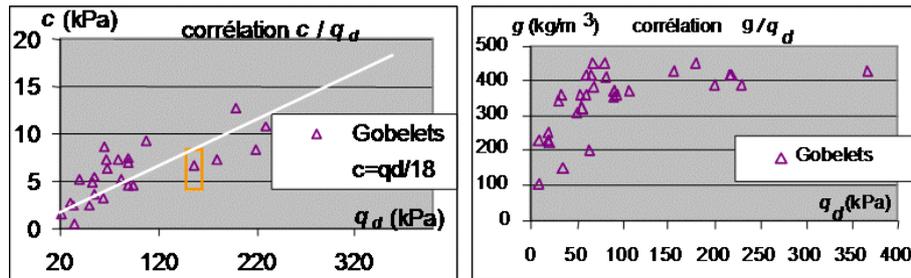


Figure 51. Corrélations entre cohésion, masse volumique et résistance de pointe de la neige (Burlet, 2002)

3.3.1.2. Connaître le manteau neigeux à l'échelle d'une station

Les figures 52 à 56 montrent les résultats d'une campagne de sondage menée sur une superficie d'une centaine de km², variant en altitude de 1200 à 3200 m, comportant quatre sites et deux versants. Six saisons ont été étudiées (de 1995 à 2001). 350 sondages ont été réalisés permettant de caractériser les paramètres de masse volumique, de résistance de pointe et de cohésion. Ces sondages ont permis de couvrir différents types d'empilement de couches ayant des paramètres

représentatifs distincts. Une étude statistique a été menée par type de grain, par type de site et par mois ; un individu correspondait à une observation pour une couche, pour un paramètre et à un instant donné.

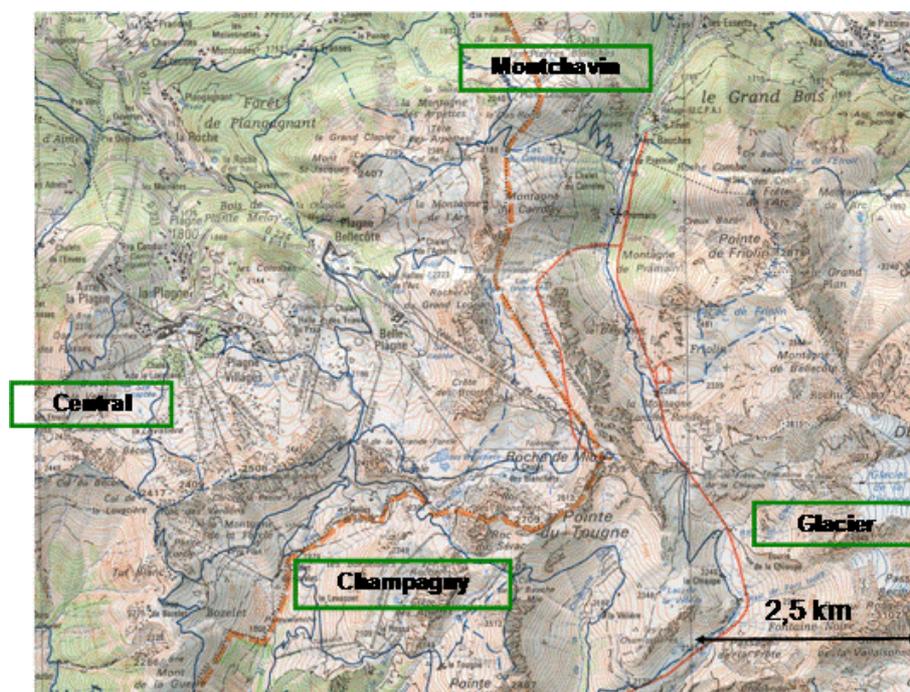


Figure 52. Localisation des sites des sondages (Burlet, 2002)

D'après les résultats des figures 53 à 56 on peut en déduire, que la masse volumique diminue avec l'âge, qu'elle suit une distribution normale, qu'elle est indépendante des sites et qu'elle dépend de la période.

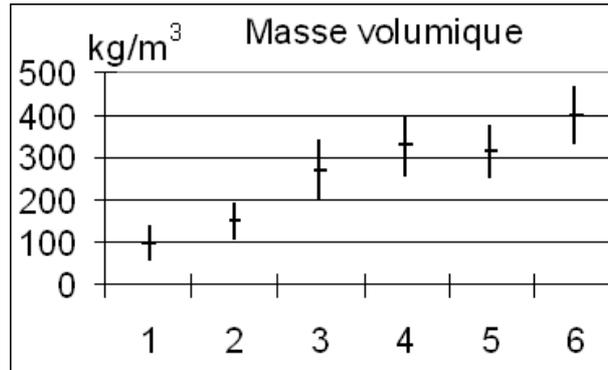


Figure 53. Masse volumique en fonction de l'âge (Burlet, 2002)

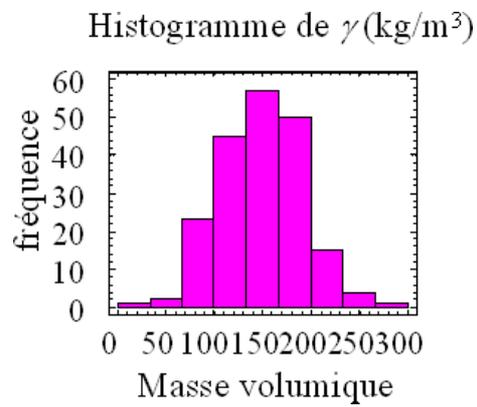


Figure 54. Histogramme de la masse volumique (Burlet, 2002)

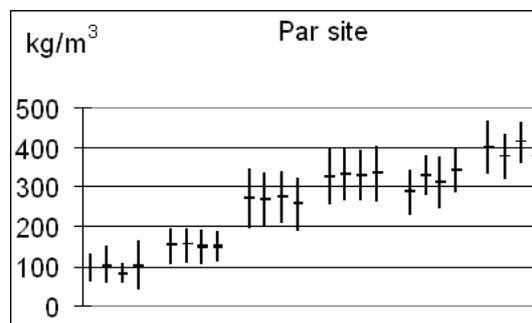


Figure 55. Masse volumique en fonction du site (Burlet, 2002)

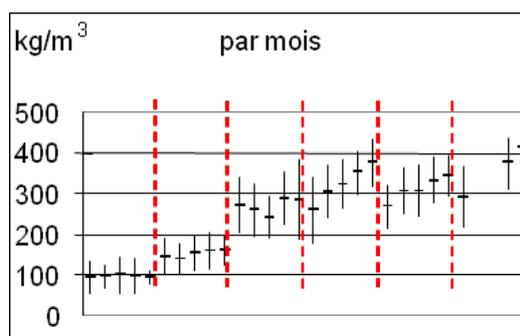


Figure 56. Masse volumique en fonction de la période (Burlet, 2002)

3.3.1.3. Connaître le manteau neigeux à l'échelle du massif

Ce paragraphe présente une autre approche de la détermination des caractéristiques du manteau neigeux. Il fait noter que cette approche est faite cette fois à l'échelle du massif.

Le paragraphe suivant présente trois logiciels utilisés pour caractériser le manteau neigeux au niveau d'un massif : SAFRAN (Durand *et al.*, 1993), CROCUS (Brun *et al.*, 1992) et MEPRA (Giraud, 1991).

Le logiciel SAFRAN permet de faire une analyse de la situation par :

- calcul des paramètres météorologiques sur un massif,
- calcul en fonction de l'altitude, de la pente et de l'exposition,
- description d'une situation à un instant t.

Le logiciel CROCUS permet de réaliser des simulations de l'évolution du manteau neigeux en :

- réalisant des calculs basés sur la physique,
- intégrant les modifications subies par chaque strate :
 - forme et taille des grains,
 - densité,
 - humidité,
 - ...

Un résultat de simulation menée avec CROCUS est présenté à la figure suivante.

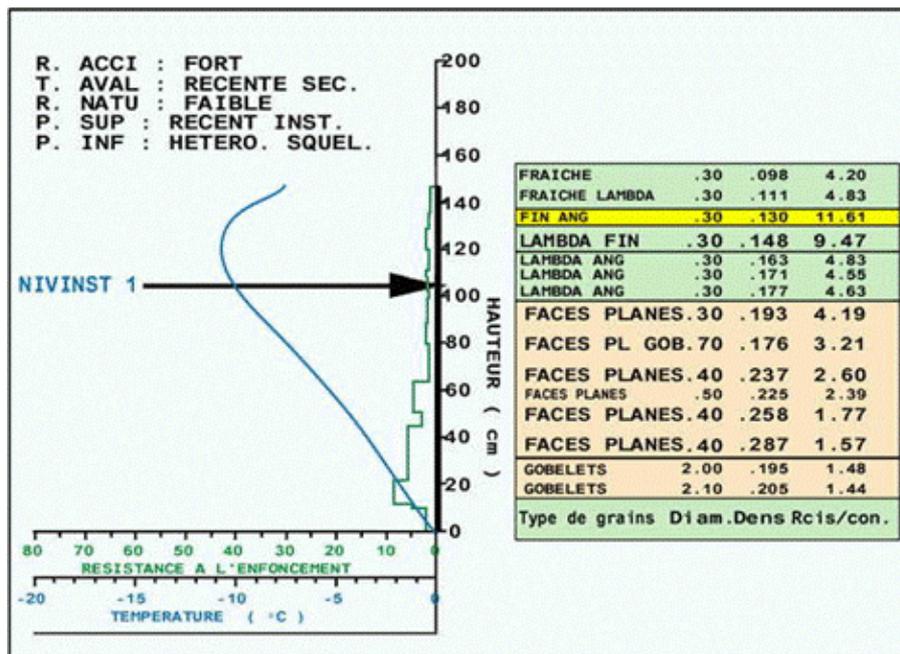


Figure 57. Résultat d'une simulation avec CROCUS (Burlet, 2002)

Le logiciel MEPRA fournit une aide à la prévision en :

- estimant la stabilité du manteau neigeux,
- définissant la nature du risque d'avalanche par tranches d'altitude et par niveau d'intensité.

Un résultat obtenu avec MEPRA est présenté à la figure suivante.

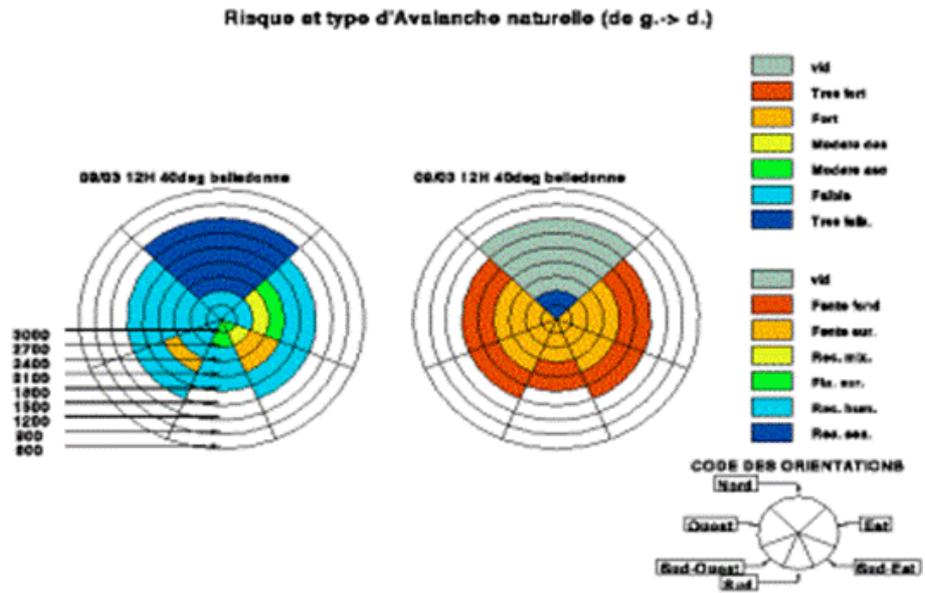


Figure 58. Résultat obtenu avec MEPRA (Météo France, 2008)

La figure suivante présente l'organigramme de la chaîne de modélisation du manteau neigeux SAFRAN-CROCUS-MEPRA, telle qu'utilisée par le Centre d'Etude de la Neige (CEN) de Météo France.

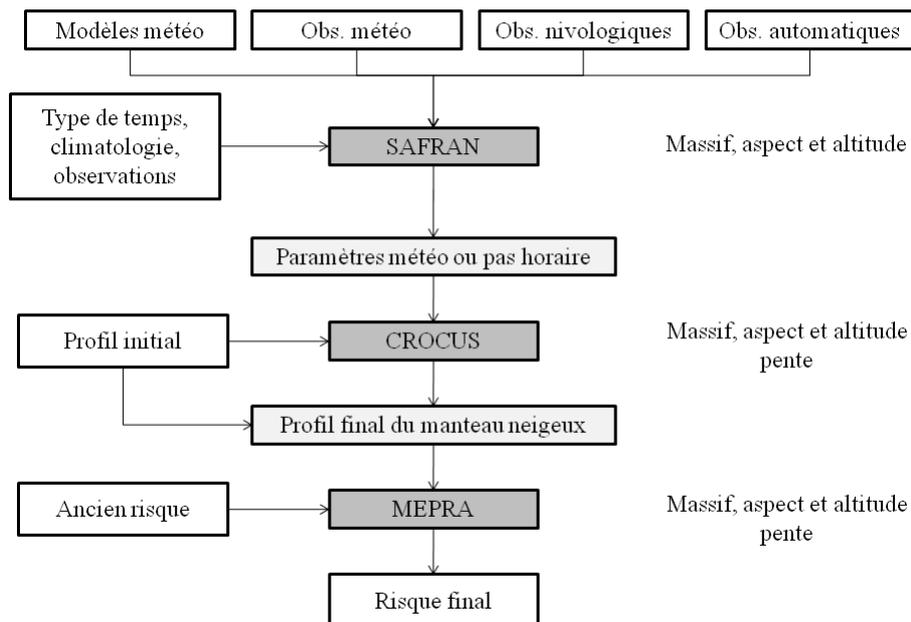


Figure 59. Organigramme de la chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPR du CEN de Météo France

3.3.2. Modèle de la pente

Pour pouvoir définir un modèle de la pente, il est nécessaire d’avoir :

- une géométrie et une topographie avant enneigement,
- la connaissance des différentes couches de neige et les caractéristiques mécaniques associées,
- la connaissance du transport de neige et des transformations thermo-organiques des grains.

3.3.2.1. Topographie

La topographie d’une pente avant enneigement peut être mesurée par une méthode classique de station de mesure et d’une mire.

Les mesures in situ du manteau neigeux sur la totalité d’une pente étant dangereuse à certains endroits et nécessitant une instrumentation trop conséquente, les mesures sont généralement réalisées à distance (entre 0,5 et 3 km). On obtient dans ce cas une précision sur la hauteur de neige de l’ordre de 10 cm. Les différentes techniques de mesures à distance du manteau neigeux sont :

3.3.2.2. Propriétés des couches

L'étude statistique présentée au paragraphe 3.3.1.1 a permis de montrer, au niveau de la pente, les caractéristiques mécaniques associées aux couches de neige suivantes :

- le coefficient de frottement est de 10° ,
- la cohésion varie de $q_d/25$ à $q_d/10$ en fonction du type de grain et qu'elle suit une loi lognormale,
- la masse volumique est une fonction du type de grain et qu'elle suit une loi normale.

La reconstitution du manteau neigeux dans une pente peut être faite en prenant en compte les particularités géométriques suivantes :

- rupture de pente,
- comble,
- augmentation de la pente,
- ondulations du terrain,
- rugosité.

3.3.2.3. Reconstitution du manteau neigeux : transports de la neige et transformation thermodynamique des grains

La reconstitution du manteau neigeux est réalisée en :

- construisant une fonction mathématique sur les points de la topographie du manteau,
- dérivant et lissant cette fonction pour modéliser les chutes de neige,
- dérivant cette fonction pour obtenir l'inclinaison du manteau neigeux.

Un exemple de fonctions mathématiques modélisant le manteau neigeux est décrit ci-après. Elles représentent à partir de l'intensité du gradient de température l'évolution thermodynamique des grains.

T : température en Kelvin,

t : temps en jour,

$\left| \frac{\partial T}{\partial z} \right|$: gradient vertical de température dans la couche,

$\frac{\partial \text{sphérique}}{\partial t}$: traduit l'évolution de la taille des particules sphériques,

$$\left| \frac{\partial T}{\partial z} \right| < 5^\circ/\text{m} \qquad \frac{\partial \text{sphérique}}{\partial t} = 10^9 e^{\left(\frac{-60000}{T}\right)}$$

$$5 < \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right| < 15^\circ/m$$

$$\left| \frac{\partial T}{\partial z} \right| \approx 15^\circ/m \text{ et sphérique} > 0$$

$$\left| \frac{\partial T}{\partial z} \right| \approx 15^\circ/m \text{ et sphérique} > 0$$

$$\frac{\partial \text{sphérique}}{\partial t} = -2 \cdot 10^8 e^{\left(\frac{-8000}{T}\right)} \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right|^{0.4}$$

$$\frac{\partial \text{sphérique}}{\partial t} = -2 \cdot 10^8 e^{\left(\frac{-8000}{T}\right)} \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right|^{0.4}$$

$$\frac{\partial \text{sphérique}}{\partial t} = 0$$

Dans l'éventualité où la température serait inconnue, un autre exemple de modélisation du manteau neigeux peut être obtenue par les dérivées relatives des paramètres pris en compte (mesures en différents points du domaine) et décrits par :

$A(x, y)$: l'altitude au point considéré,

\bar{A} : l'altitude du point de référence

$\theta(x, y)$: l'exposition

$e(x, y, t)$: l'épaisseur de la couche i

\bar{e} : l'épaisseur de la couche au point de référence

k_{Al} , k_{Ex} et k_{Ep} : des coefficients de correction empiriques relativement sur l'altitude, l'exposition et l'épaisseur.

Un exemple de modélisation en trois dimensions du manteau neigeux est présenté à la figure suivante.

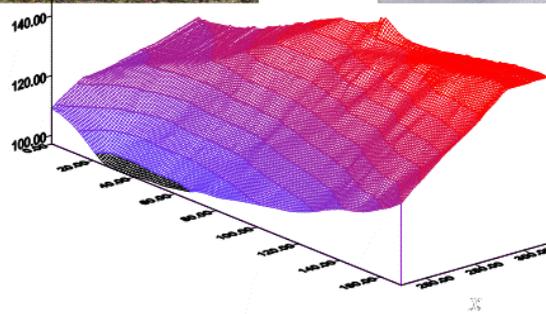
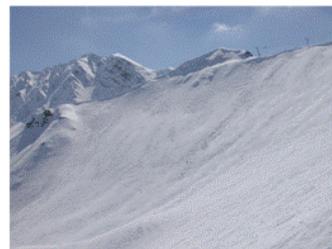
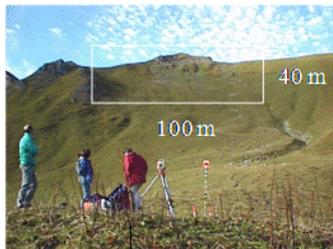


Figure 61. *Modélisation en trois dimensions d'un manteau neigeux (Burlet, 2002)*

3.3.3. Modèles probabilistes des variables

3.3.3.1. Variables aléatoires explicatives

L'épreuve considérée pour les modèles probabilistes d'avalanche est l'observation d'une station pendant un temps t .

L'événement considéré est l'occurrence d'une avalanche.

Les variables aléatoires explicatives sont :

- pour le phénomène : le type d'avalanche,
- pour la cause : l'origine de l'avalanche,
- pour l'époque : la période jour / nuit, l'épisode, la saison, l'année de l'avalanche,
- pour les conséquences : le nombre de tués, les dégâts matériels,...

Le risque avalanche est lié à la pente :

- vis-à-vis de la déclivité :
 - une pente inférieure à 25% conduira à une activité avalancheuse faible,
 - une pente comprise entre 25 et 45% constituent les pentes les plus dangereuses,
 - une pente supérieure à 45% se décharge naturellement.
- vis-à-vis de la rugosité,
- vis-à-vis de l'exposition.

Le risque avalanche est lié à la météo :

- vis-à-vis de l'enneigement : épaisseurs des couches et types de grains,
- vis-à-vis du vent : l'augmentation de la force du vent conduit à la formation de congères puis à la surcharge des pentes,
- vis-à-vis de la température et de l'ensoleillement.

Le risque avalanche est lié aux sollicitations des skieurs, des animaux, des pisteurs et des purges.

Dans les paragraphes suivants, les types de modèles probabilistes retenus dépendent des variables analysées. Ces modèles permettent de mieux connaître et

de tenter d'expliquer le phénomène d'avalanche. Les paramètres de ces modèles peuvent être estimés :

- directement à partir des statistiques,
- indirectement à partir des variables explicatives,
- indirectement à partir des dires d'expert,
- indirectement à partir des modèles mécaniques.

3.3.3.2. Modèles probabilistes

a. Loi de Bernouilli

Considérons l'épreuve suivante : observation d'un lieu (pente, massif, station) pendant une période t .

Si l'on considère deux événements A, occurrence d'une avalanche, et B, non occurrence d'une avalanche ; et si l'on note p la probabilité d'occurrence d'une avalanche alors la loi de Bernouilli s'écrira :

- $p(A) = p$,
- $p(B) = 1 - p$.

b. Loi binomiale

Considérons l'épreuve suivante : observation d'une pente pendant n années ou observation d'une station à n pentes semblables (de même probabilité d'occurrence d'une avalanche).

Si l'on note X le nombre d'avalanche observées, $k \in [0, n]$ le nombre d'avalanche cible et p la probabilité d'occurrence d'une avalanche alors la loi binomiale s'écrit :

$$p_n(X=k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$$

Des exemples de lois binomiales sont présentés à la figure suivante.

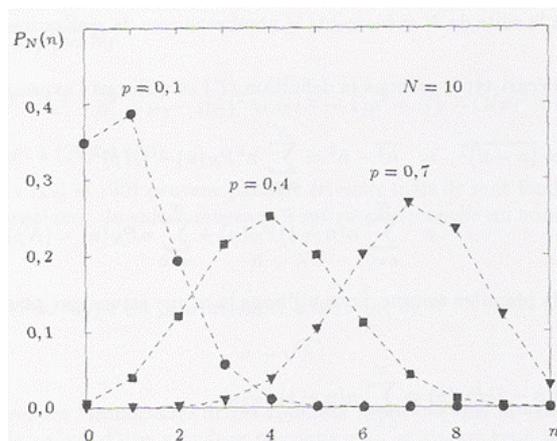


Figure 62. Exemple de lois binomiales

L'épreuve considérée ici peut représenter la répétition de n épreuves élémentaires indépendantes :

- identiques dans le temps (observation d'une pente pendant n années),
- et / ou identiques dans l'espace (observation d'une station à n pentes semblables).

Les hypothèses sont qu'il y a indépendance dans le temps vis-à-vis de l'évolution climatique, de l'évolution de la pente, de l'évolution des moyens de purge et indépendance en lieu vis-à-vis des facteurs déclenchant anthropiques, des orientations, des enneigements, des pentes, de la répartition des conséquences sur la population.

c. Loi de poisson

Considérons l'épreuve suivante : observation d'une station pendant une période t .

Le terme X représente le nombre d'avalanches à l'issue de l'épreuve et λ le nombre moyen d'avalanches pendant t . Nous considérons les hypothèses suivantes :

- l'événement (occurrence d'une avalanche) est rare donc sa probabilité est faible,
- on considère un grand nombre de pentes,
- on considère que plusieurs avalanches sont possibles sur une même pente.

Dans ces conditions, X suit une loi de poisson qui s'écrit :

$$p_r(X = k) = e^{-\lambda} \cdot \lambda^k / k !$$

Des exemples de lois de poisson sont présentés à la figure suivante.

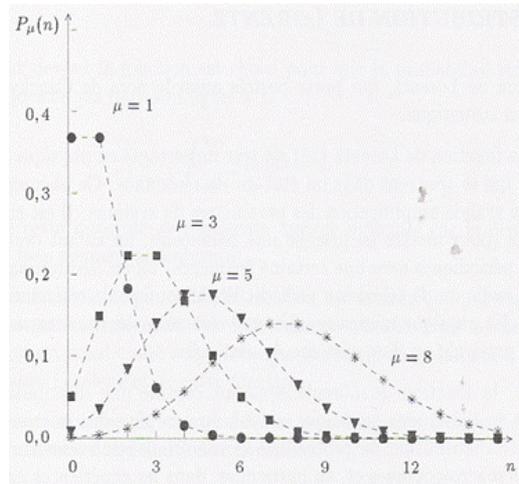


Figure 63. Exemple de lois de poisson

d. Loi exponentielle

Considérons l'épreuve suivante : observation d'une station pendant une période t.

Le terme X représente l'intervalle de temps séparant deux avalanches successives et υ l'intervalle de temps moyen entre deux avalanches. Nous considérons les hypothèses suivantes :

- l'événement (occurrence d'une avalanche) est rare donc sa probabilité est faible,
- on considère un grand nombre de pentes dans la station,
- on considère que plusieurs avalanches sont possibles sur la même pente.

Dans ces conditions, X suit une loi exponentielle qui s'écrit :

$$p_r(X < k) = 1 - e^{-\upsilon x}$$

Des exemples de lois exponentielles sont présentés à la figure suivante.

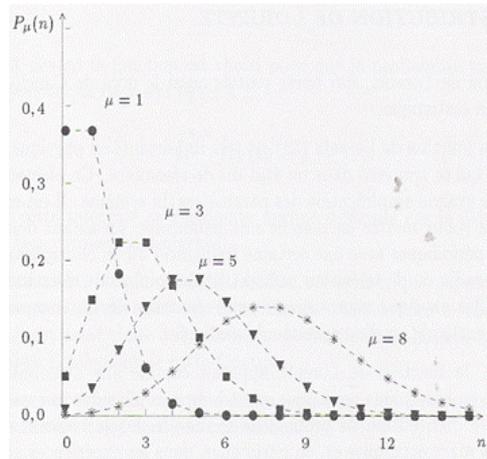


Figure 64. Exemple de lois exponentielles

e. Loi normale

La loi normale peut représenter les variables aléatoires suivantes :

- volume de l’avalanche,
- longueur de l’avalanche,
- largeur de l’avalanche,
- vitesse de l’avalanche,
- énergie de l’avalanche,
- ...

Un exemple de loi normale est présenté à la figure suivante.

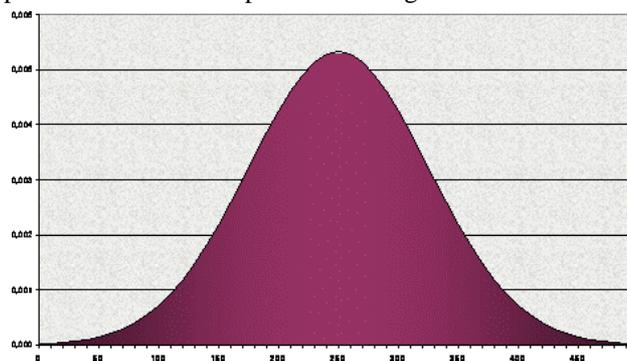


Figure 65. Exemple de loi normale

3.3.4. *Modèles statistiques d'avalanche*

Les données présentées dans ce paragraphe sont centrées sur le chiffrage des conséquences d'une avalanche.

Les données suivantes ont été recensées par l'ANENA (pour la France) pendant la période « octobre 2007 – septembre 2008 » ; elles représentent la répartition du nombre d'accidents, d'accidents mortels et de décédés selon :

- le type d'activité (cf. figure 66),
- les départements (cf. figure 67),
- les causes de déclenchement (cf. figure 68),
- le type d'avalanche (cf. figure 69),
- la profondeur d'ensevelissement (cf. figure 70),
- la durée d'ensevelissement (cf. figure 71),
- le type de secours (cf. figure 72),
- le moyen de localisation (cf. figure 73).

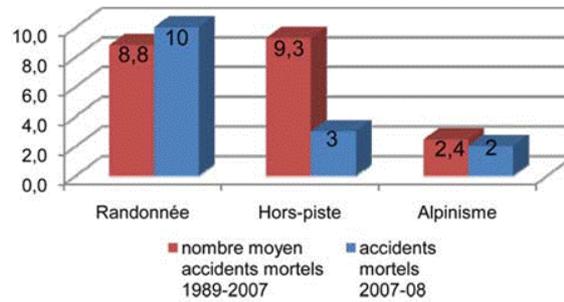


Figure 66. Répartition du nombre de victimes selon le type d'activité (Anena, 2008)

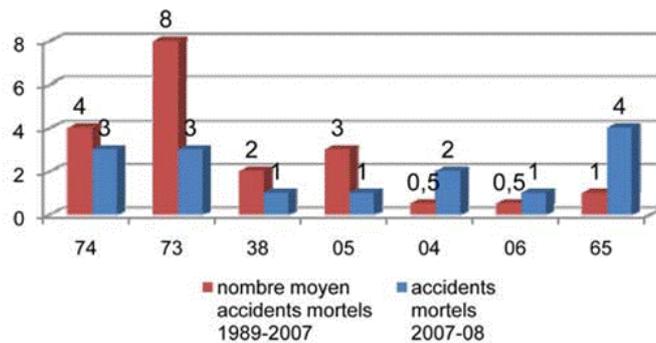


Figure 67. Répartition du nombre de victimes selon les départements (Anena, 2008)

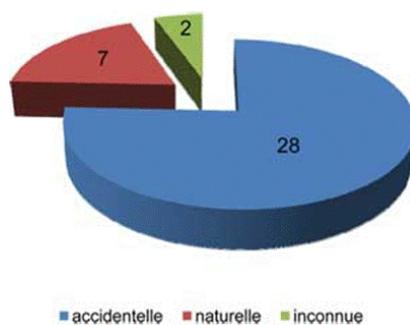


Figure 68. Répartition du nombre de victimes selon les causes de déclenchements (Anena, 2008)

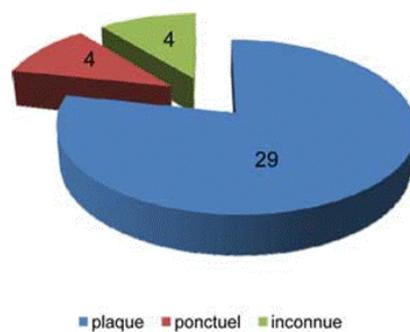


Figure 69. Répartition du nombre de victimes selon le type d'avalanche (Anena, 2008)

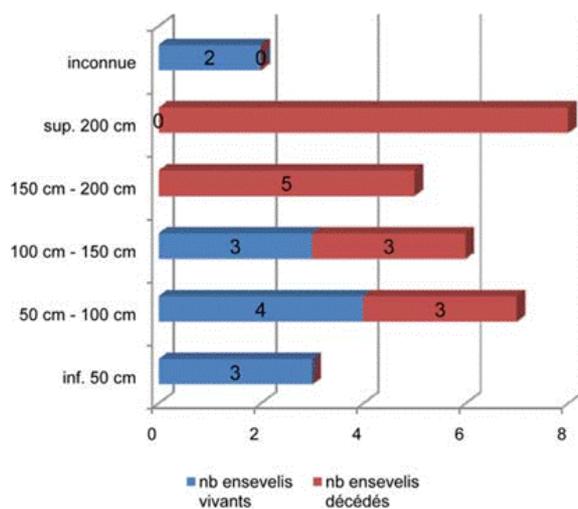


Figure 70. Répartition du nombre de victimes selon la profondeur d'ensevelissement (Anena, 2008)

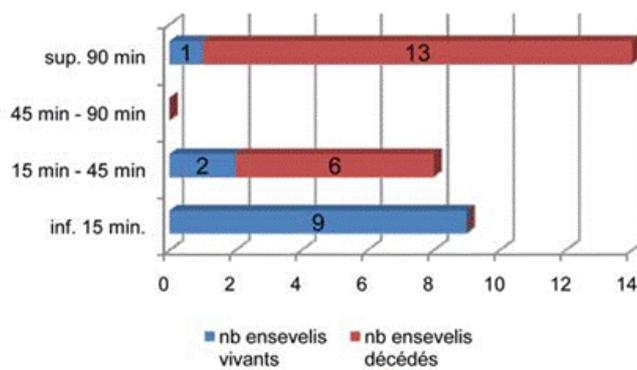


Figure 71. Répartition du nombre de victimes selon la durée d'ensevelissement (Anena, 2008)

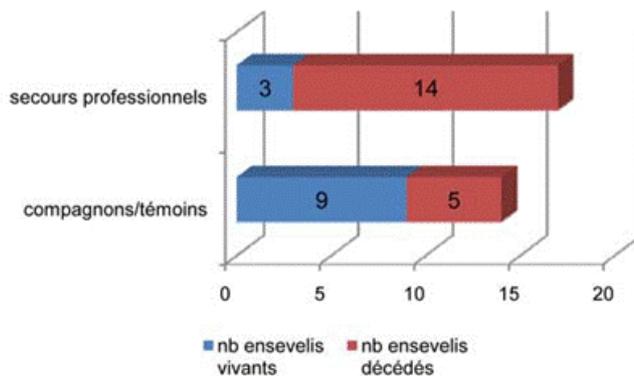


Figure 72. Répartition du nombre de victimes selon le type de secouriste (Anena, 2008)

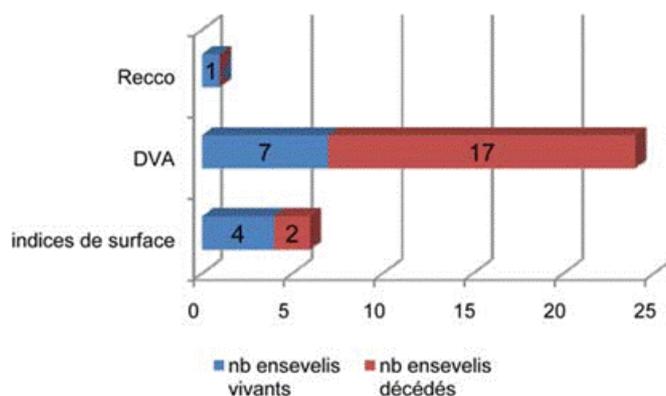


Figure 73. Répartition du nombre de victimes selon le moyen de localisation (Anena, 2008)

Les données suivantes sont celle recensées par la SLF (pour la Suisse) pendant la période 2007-2008 ; elles représentent la répartition des accidents d’avalanche selon :

- le degré de danger (l’échelle est présentée au tableau 2), (cf. figure 74),
- l’inclinaison de la pente (cf. figure 75),
- l’altitude de la station (cf. figure 76),
- l’exposition de la pente (cf. figure 77).

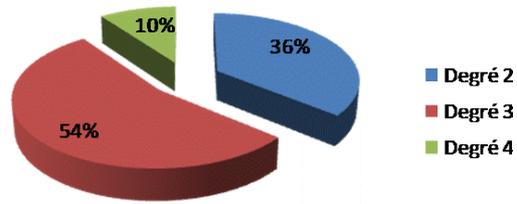


Figure 74. Répartition des accidents d'avalanche selon le degré de danger (Anena, 2008)

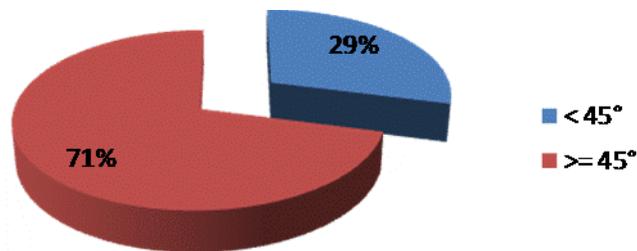


Figure 75. Répartition des accidents d'avalanche selon l'inclinaison de la pente (Anena, 2008)

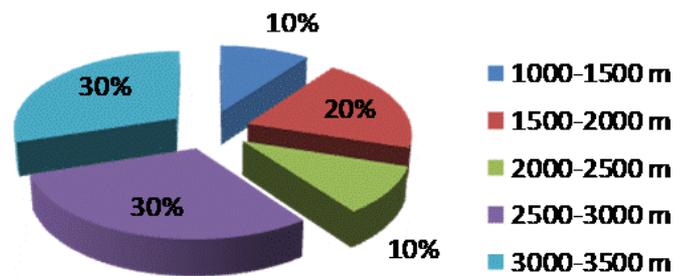


Figure 76. Répartition des accidents d'avalanche selon l'altitude de la station (Anena, 2008)

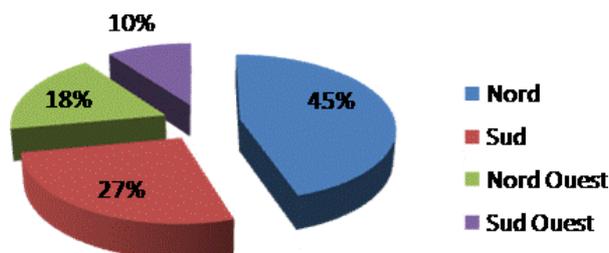


Figure 77. Répartition des accidents d'avalanche selon l'exposition de la pente (Anena, 2008)

3.3.5. Modèle fiabiliste de stabilité

Le facteur de stabilité se caractérise à partir des forces et des moments appliqués sur le manteau neigeux. Il est défini comme le rapport des efforts mobilisables aux efforts appliqués : $F = T_f / T$, où T_f correspond à la contrainte maximale au cisaillement et T correspond à la contrainte tangentielle.

Le calcul de ce facteur F est effectué par le logiciel de calcul de stabilité de pente aux états limites PETAL.

Le facteur de stabilité étant régi par un processus stochastique, il est possible de le simuler à partir de méthodes de Monte-Carlo. Cette simulation de Monte-Carlo permet de constituer des échantillons statistiques par enregistrement des paramètres présentant un intérêt pour une histoire donnée.

La démarche d'obtention du facteur de stabilité à partir du logiciel Petal est présentée à la figure suivante.

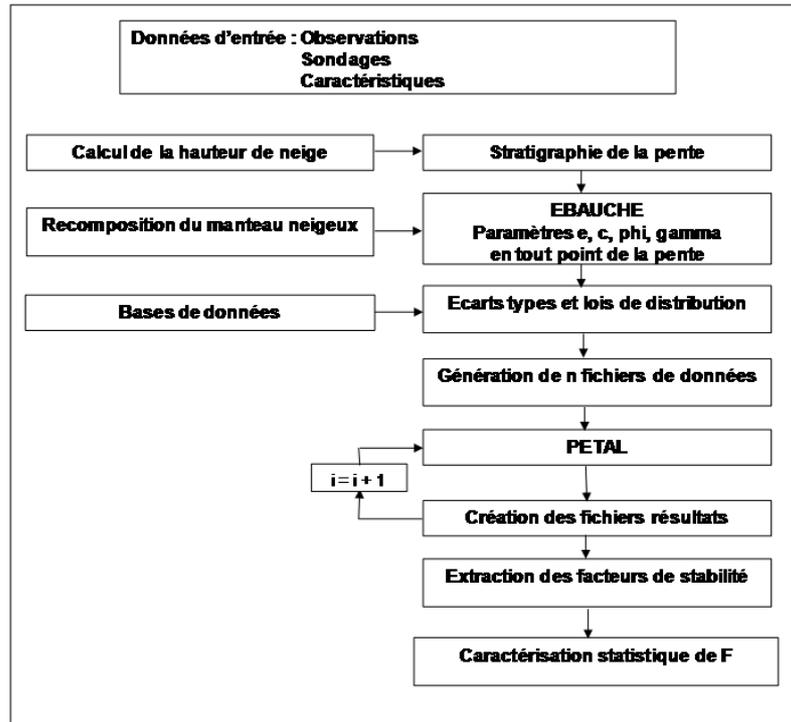


Figure 78. Démarche d'obtention du facteur de stabilité en utilisant le logiciel *PETAL* (Burlet, 2002)

Ce facteur de stabilité peut ensuite être injecté dans un modèle de simulation d'une pente afin d'en déduire une probabilité de rupture. La figure suivante est un exemple de modélisation d'une pente pour laquelle :

- une valeur moyenne des paramètres a été estimée,
- cette valeur a été distribuée statistiquement dans toute la pente,
- la courbe de la pente a été imposée,
- les couches sont considérées comme homogènes,
- la forme de la courbe de rupture a été optimisée.

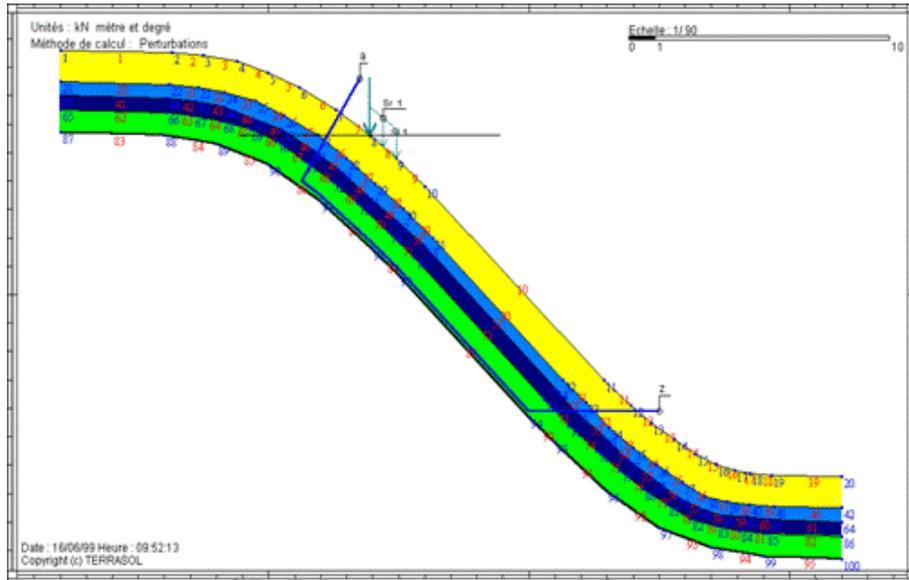


Figure 79. Modélisation de différentes couches d'un manteau neigeux (Burlet, 2002)

La discrétisation en volumes élémentaires utilisée pour obtenir cette modélisation est présentée à la figure suivante.

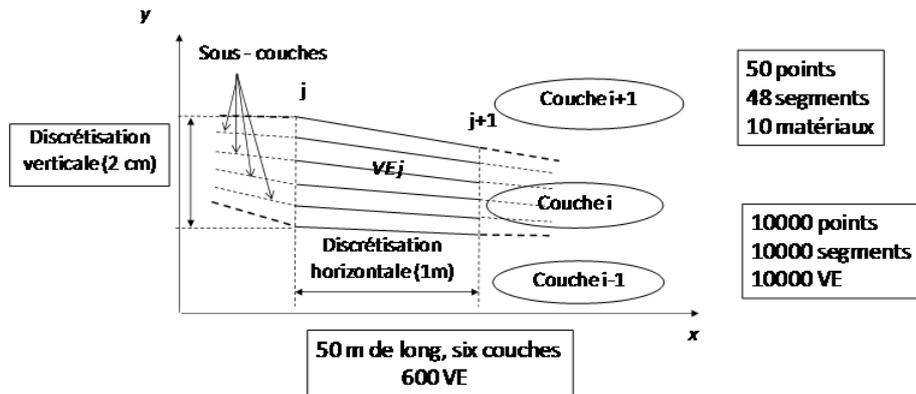


Figure 80. Discrétisation en volumes élémentaires pour modéliser le manteau neigeux (Burlet, 2002)

La figure suivante montre l'optimisation de la courbe de rupture par des techniques de descentes aléatoires successives.

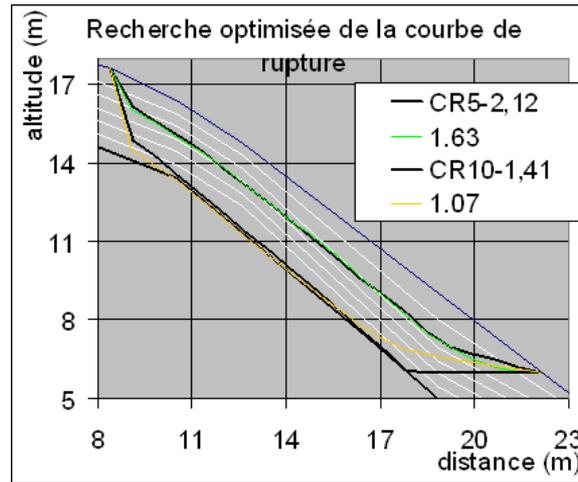


Figure 81. Optimisation de la courbe de rupture (Burlet, 2002)

La figure suivante présente la différence de répartition de la cohésion dans un manteau neigeux lorsque cette répartition est déterministe d'une part et lorsqu'elle est aléatoire d'autre part.

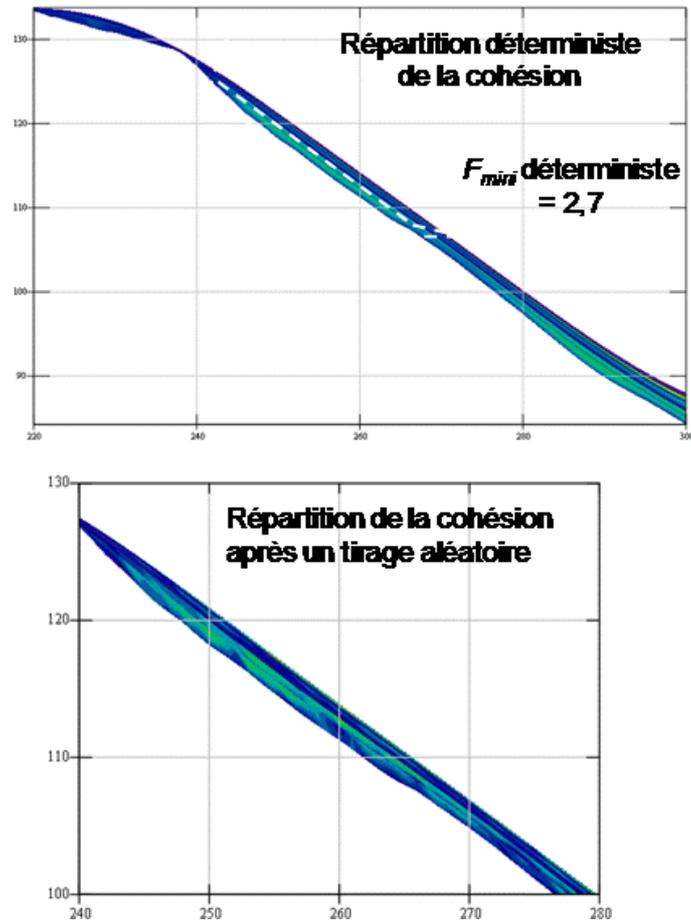


Figure 82. Comparaison entre une répartition déterministe et une répartition aléatoire de la cohésion dans un manteau neigeux (Burlet, 2002)

La figure suivante présente la répartition des contraintes tangentielles, et le profil de cohésion associé, dans les différentes couches d'un manteau neigeux obtenues à partir d'un code éléments finis CESAR développé par le laboratoire des ponts et chaussées. Ce modèle est obtenu en faisant l'hypothèse que la neige est un matériau élastique parfaitement plastique. Cette modélisation permet d'avoir une forme de la rupture potentielle.

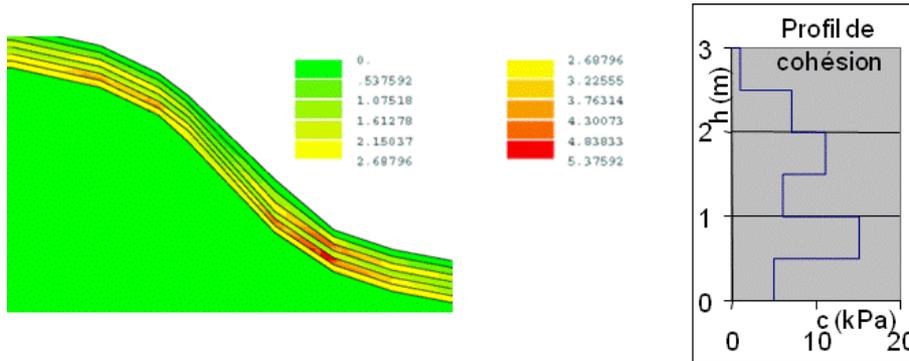


Figure 83. Répartition des contraintes tangentielles dans un manteau neigeux d'une pente (Burlet, 2002)

Les figures suivantes montrent l'évolution du phénomène de plastification du manteau neigeux.

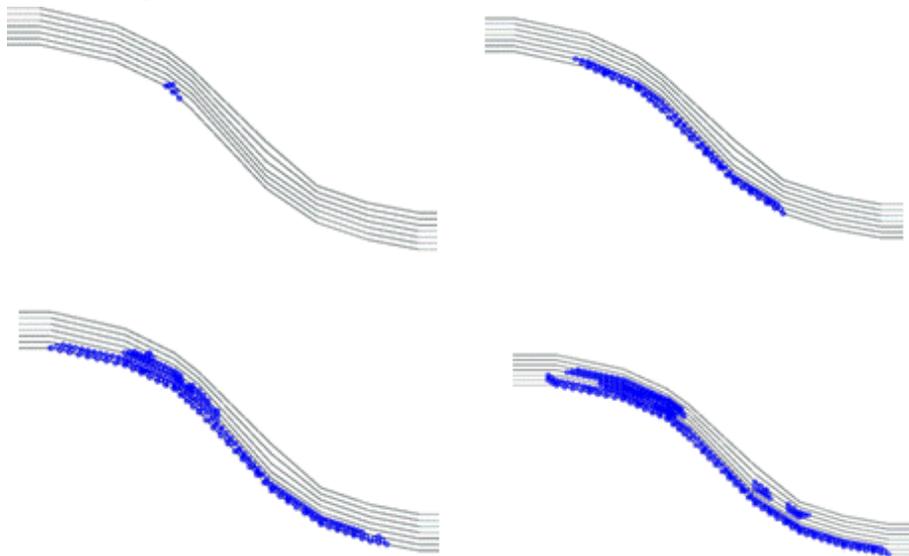


Figure 84. Modélisation de l'évolution de la plastification du manteau neigeux (Burlet, 2002)

Ce calcul du facteur de stabilité intègre différentes incertitudes :

- incertitude sur les données :
 - données géométriques de la pente,

- données géométriques du manteau,
- données caractéristiques des couches.
- incertitude sur les modèles mécaniques et numériques,
- incertitudes sur les objets.

Les figures suivantes montrent l'analyse de sensibilité du facteur de stabilité aux paramètres de masse volumique et de cohésion. Ces figures montrent que le facteur de stabilité est peu sensible à la variation de la masse volumique et sensible à la variation de la cohésion. On obtient une connaissance de la masse volumique à 30% et une connaissance de la cohésion à 50%.

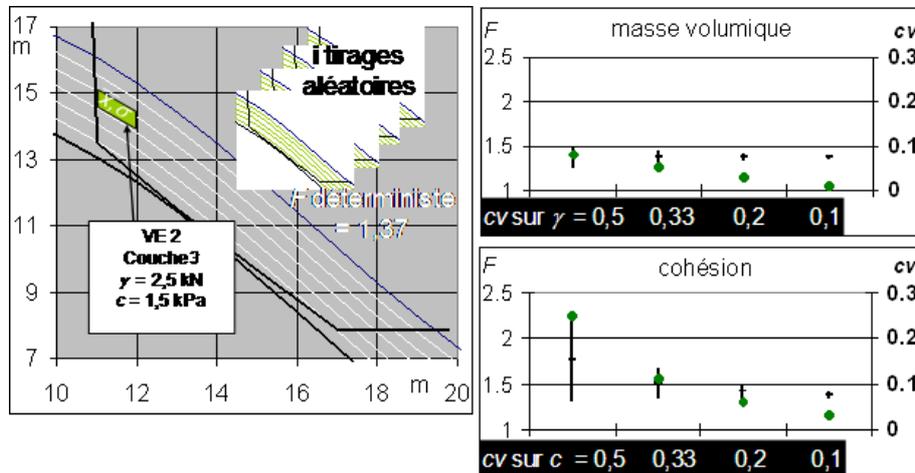


Figure 85. Analyse de sensibilité du facteur de stabilité (Burlet, 2002)

Les conclusions de cette méthode d'obtention du facteur de stabilité sont que :

- l'analogie entre le déclenchement d'une avalanche et le glissement de terrain est pertinente,
- l'apport de l'étude mécanique de la stabilité et la prise en compte de la variabilité rendent possible une prévision à l'échelle d'une pente,
- la méthode s'appuie sur un réseau local de mesures existantes,
- le modèle probabiliste de calcul de stabilité (perturbations et simulation de Monte-Carlo) est robuste et rapide.

3.3.6. *Modèle économique et social*

L'objectif du modèle économique est d'atteindre un modèle complet en intégrant à la fois la sécurité des biens, par la gestion des risques et la prévention, mais également l'optimisation de la production, par la réalisation de bénéfices.

L'objectif du modèle social est de satisfaire à la société de consommation en ayant une bonne perception des risques par les utilisateurs. L'assurance des usagers alimente de fait le modèle économique.

Le coût annuel des catastrophes naturelles est passée de 3,9 milliards de dollars dans les années 1950 à 50 milliards dans les années 2000 ; le coût des avalanches représentent 50 millions de dollars dans les années 2000. Il y a eu une augmentation du coût malgré le renforcement des infrastructures et l'amélioration de la prévention des catastrophes, ce qui peut s'expliquer par l'augmentation en nombre et en valeurs des enjeux.

Le développement des sports d'hiver, l'industrialisation des vallées alpines et pyrénéennes, la multiplication des voies de communication ont changé les rapports de l'homme à l'avalanche. Les avalanches provoquent des pertes de personnes et de biens qui ont des retombées économiques importantes telles que les arrêts de production (conséquence directe) et la perte de prestige (conséquence indirecte).

La figure suivante schématise la gestion économique d'un sinistre qui peut être décliné au cas des avalanches.

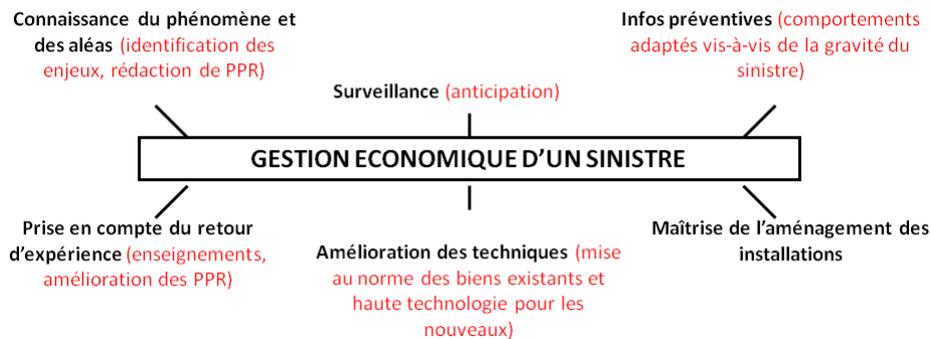


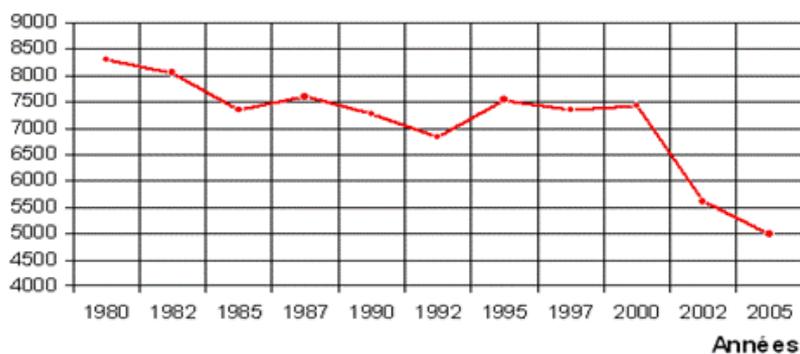
Figure 86. *Gestion économique d'un sinistre (Deuneville et al., 2006)*

La figure suivante présente un comparatif du nombre de décès par des accidents routiers et par des avalanches. Les deux courbes diminuent nettement (entre 25 et 35%) depuis la fin des années 1990 mais pour des raisons différentes :

– l'information des risques encourus et une répression accrue pour les accidents routiers,

– l’information des risques encourus et une différence de perception pour les avalanches.

Nb de tués sur les routes françaises



Nb de tués dans les avalanches en France

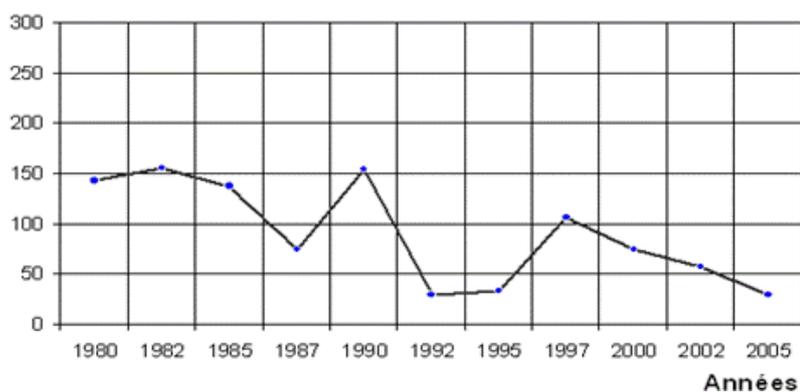


Figure 87. Comparatif du nombre de décès par les accidents routiers et par les avalanches (Deuneville et al., 2006)

4. Etage 4 – Evaluation et gestion des risques

Cette partie vise à présenter les méthodes et les solutions d’ingénierie de défense et de gestion de crise pour :

- réduire l’aléa,
- protéger et défendre,
- gérer la crise.

4.1. Chapitre 1 – Introduction

La figure suivante illustre la différence existante entre les notions de prévention et de protection contre l'aléa avalanche.

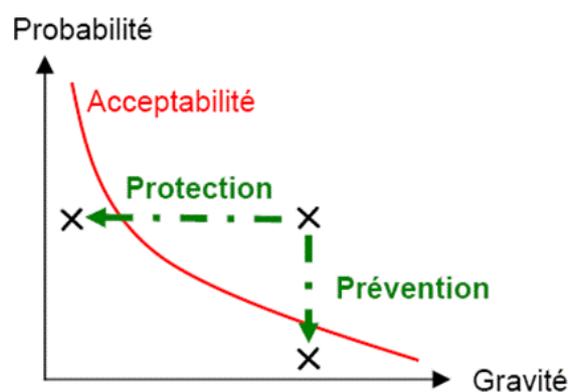


Figure 88. Distinction protection et prévention contre l'aléa avalanche (Batoke, 2008)

Le comportement des pratiquants dépend de deux notions qui sont a priori contradictoires :

- le souhait de prévention des stations de ski qui sous-entend un gage de qualité de la station et un respect des réglementations,
- le souhait de vacances des usagers qui sous-entend une recherche de liberté, de sensation, de nature vierge.

L'objectif de la mitigation des risques est alors de mettre en place des « libertés réglementées ». Ces dispositifs de prévention doivent être adaptés aux différents niveaux des pratiquants :

- connaissance des balisages, des niveaux de risques,
- connaissance des interdictions et des recommandations,
- culture montagnarde.

Les campagnes publicitaires vont généralement dans le sens opposé d'une sensibilisation des dangers en mettant en avant des espaces vierges, le hors-pistes,...

Les différents intervenants de la prévention sont :

- les pisteurs secouristes, les guides de haute montagne et les moniteurs qui sont formés au risque avalanche,
- les agents des offices de tourisme qui sont moins formés à ce risque.

Une autre difficulté réside dans la non homogénéité des signalisations des professionnels de la prévention : les vêtements des pisteurs ne sont pas identiques partout en France et les postes de secours ne sont pas repérés et placés aux mêmes emplacements dans les stations françaises. De ce fait, il est difficile de mettre en place une campagne de sensibilisation nationale, en tout cas pour cet aspect, à ce risque avalanche.

4.2. Chapitre 2 – Gestion du patrimoine

Il existe deux catégories de dispositions constructives pour protéger les bâtiments contre le risque avalanche : les dispositions d'ensemble et les dispositions particulières à chaque construction.

Les principes constructifs correspondant à des dispositions d'ensemble sont :

- le regroupement de bâtiments,
- l'orientation et la forme des bâtiments,
- la non aggravation du risque pour les voisins,
- la prévision d'un exutoire de l'avalanche.

Les principes constructifs correspondant à des dispositions particulières à chaque construction sont :

- prévoir un accès et une entrée sur les façades non exposées,
- concevoir des façades en angle non rentrant lorsqu'elles font face à l'avalanche,
- ne pas stocker de produits polluants ou dangereux dans les constructions peu résistantes,
- prévoir une distribution appropriée des locaux : les locaux les plus vulnérables doivent être placés en aval du sens de l'avalanche.

4.3. Chapitre 3 – Prévention et protection

4.3.1. Déclenchements préventifs

Il existe principalement quatre types de dispositifs permettant des déclenchements préventifs des avalanches :

- le Catex, c'est un câble tournant soutenu par des pylônes qui permet de positionner des explosifs au dessus du manteau neigeux (cf. figure 89),
- le Gazex, c'est un explosif à gaz (mélange de propane+oxygène) (cf. figure 90),
- l'Avalancheur, c'est un lanceur pneumatique de flèches explosives (cf. figure 91),
- le ballon Alvalhex, c'est un appareil pouvant provoquer le déclenchement d'une avalanche par explosion, au dessus du manteau neigeux, d'un ballon gonflé d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène, à l'origine d'une onde de choc sphérique (cf. figure 92).



Figure 89. *Catex (Givry et al., 2004)*

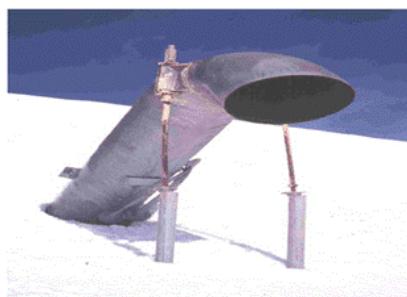


Figure 90. *Gazex (Givry et al., 2004)*

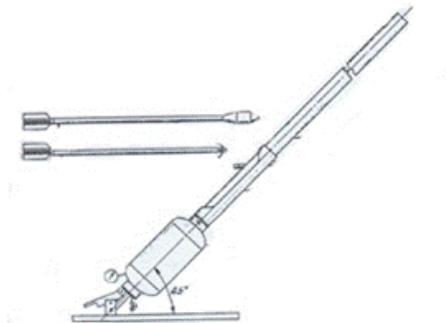


Figure 91. *Avalancheur* (Givry et al., 2004)

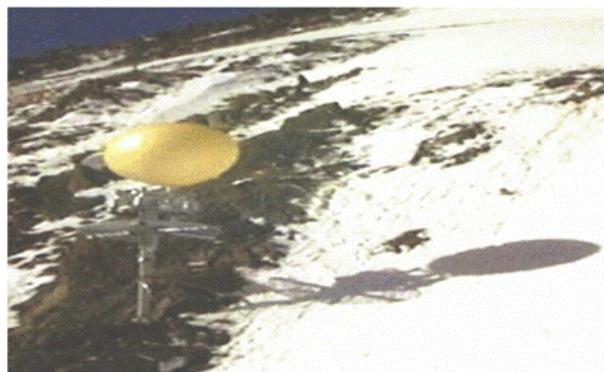


Figure 92. *Ballon Alvalhex* (Givry et al., 2004)

4.3.2. *Ouvrages de protection*

Les ouvrages de protection sont classés en deux grandes catégories, selon qu'ils se situent en zone de départ (protection active) ou en zones d'écoulement et/ou de dépôt (protection passive). Dans les deux cas, ces mesures peuvent être mises en œuvre de façon permanente (sans intervention humaine) ou temporaire (avec prise de décision).

Les principaux ouvrages de protection active permanente sont :

- le reboisement sur banquettes (*cf.* figure 93),
- les barrières à vent (*cf.* figure 94),
- les râteliers (*cf.* figure 95),
- les barrières à neige (*cf.* figure 96),

- les toits buse (cf. figure 97),
- les vires vent (cf. figure 98),
- les claies (cf. figure 99),
- les filets (cf. figure 100),
- les pieux (cf. figure 101).



Figure 93. *Reboisement sur banquettes (Givry et al., 2004)*



Figure 94. *Barrière à vent (Givry et al., 2004)*



Figure 95. *Râteau* (Givry et al., 2004)



Figure 96. *Barrière à neige* (Givry et al., 2004)



Figure 97. *Toit buse* (Givry et al., 2004)



Figure 98. *Vire vent* (Givry et al., 2004)



Figure 99. *Claie* (Givry et al., 2004)



Figure 100. *Filet* (Givry et al., 2004)

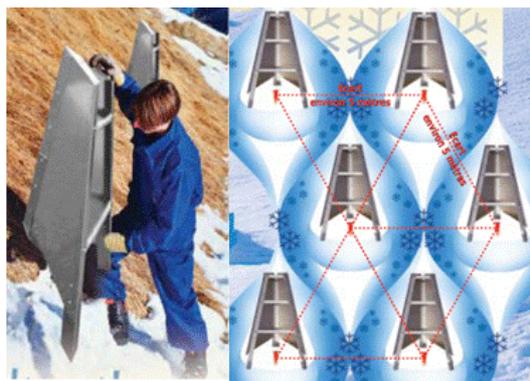


Figure 101. *Pieux (Givry et al., 2004)*

Les principaux ouvrages de protection active permanente sont :

- les galeries (*cf.* figure 102),
- les étraves (*cf.* figure 103),
- les déflecteurs (*cf.* figure 104),
- les digues d’arrêt (*cf.* figure 105),
- les détecteurs routiers d’avalanche (*cf.* figure 106).

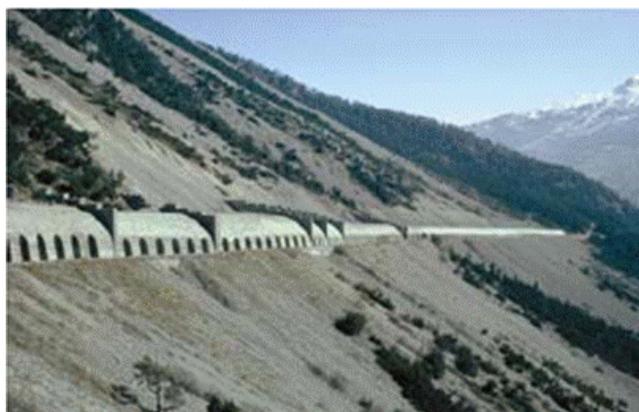


Figure 102. *Galerie (Givry et al., 2004)*



Figure 103. *Etrave* (Givry et al., 2004)



Figure 104. *Déflecteur* (Givry et al., 2004)

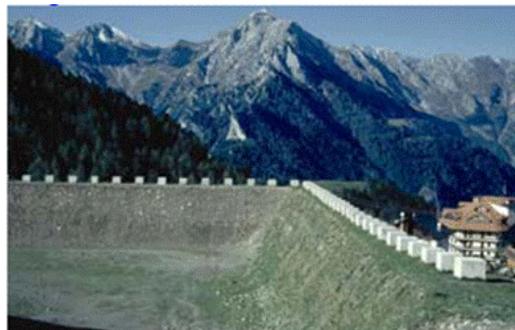


Figure 105. *Digue d'arrêt* (Givry et al., 2004)



Figure 106. *Détecteur routier d'avalanche (Givry et al., 2004)*

Pour les protections temporaires, il s'agit de mesures principalement réglementaires et destinées à interdire la circulation, à évacuer les populations ou au contraire, à les confiner dans des endroits sûrs en attendant la fin d'une période critique.

4.3.3. *Information*

L'information est menée à deux niveaux : celui du département et celui de la station de ski.

L'information au niveau du département est donnée par Météo France sous forme de carte de vigilance. Un exemple de carte de vigilance est présenté à la figure suivante.

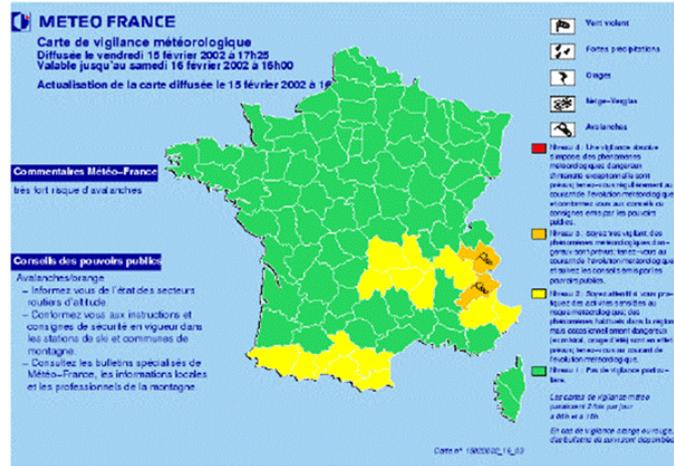


Figure 107. Exemple de carte de vigilance (Météo France, 2008)

Au niveau des stations de ski, la signalisation suit différent article de lois et normes :

- article L 221-1 et suivants du Code de la Consommation,
- article L 2212-2 du Code Général des Collectivités Territoriales,
- NF S52-102 - juillet 2001 - (+erratum de septembre 2001) Pistes de ski alpin : balisage, signalisation et information,
- NF S52-103 - juillet 2001 (+erratum de septembre 2001) - Pistes de ski de fond, itinéraires de promenade à ski de fond et espaces aménagés : balisage, signalisation et information,
- NF S52-104 - août 2004 - Pistes de ski - Information sur les risques d'avalanche - Drapeaux d'avalanche. Les différents drapeaux existants sont présentés à la figure suivante.

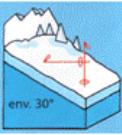
-  **drapeau jaune pour les risques faibles et limités**
-  **drapeau à damier noir et jaune pour les risques forts et marqués**
-  **drapeau noir pour les risques très forts**

Figure 108. Drapeaux de signalisation du risque avalanche en station (Primnet, 2008)

Les différents affichages existants en station permettant d'informer les usagers des risques d'avalanche sont présentés à la figure suivante.



Avalanches
Dangers de mort !



Terrain
Le danger d'avalanche augmente avec la déclinivité de la pente. Les avalanches peuvent déjà se produire sur des pentes de 30°. Les pentes à l'ombre sont plus exposées au risque d'avalanche que celles ensoleillées.
Demi-longueur du bâton = 30° environ



Neige fraîche et vent = danger d'avalanche maximal
Plus la couche de neige fraîche est importante, plus grand est le danger d'avalanche



Manteau neigeux
Dans une pente avalancheuse, de très faibles charges supplémentaires, telles que le poids d'un skieur par exemple, suffisent généralement pour rompre l'équilibre et déclencher une avalanche.
Un manteau neigeux peu important n'implique pas un faible danger d'avalanche - au contraire

Prévention individuelle :
Quand on veut se rendre dans une zone enneigée à ski, en raquettes, ou à pieds on doit prendre certaines précautions :

- ne pas partir seul, être au minimum 2
- être équipé d' un ARVA et d' une pelle
- s' informer de la météo et des risques d' avalanche
- faire son itinéraire et le donner à ses parents
- ne pas partir si les conditions sont douteuses

Figure 109. Exemples d'affichage en station de ski (Clergue et al., 2008)

4.4. Chapitre 4 – Gestion de crise

La gestion de crise comprend :

- l'organisation des secours,
- la mise en place de dispositif transitoires et d'itinéraires,
- l'actualisation des données (causes, conséquences,...),

- la recherche de responsabilités et le recours aux assurances.

La loi n°2004-811 de modernisation de la sécurité civile du 13 Août 2004, qui abroge la loi n°87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, modernise la doctrine et l'organisation de la sécurité civile en s'appuyant sur les retours d'expérience des événements tels que la canicule (2003), les inondations du Gard (2002), l'explosion de l'usine AZF (2001) ou les tempêtes (1999).

Ses objectifs principaux sont :

- de redonner toute sa place à l'engagement responsable du citoyen,
- de préciser les responsabilités de l'Etat en matière de planification, de conduite opérationnelle et de prise en charge des secours.

Par sa proximité, la commune est le premier niveau d'organisation pour faire face à un événement. Elle s'intègre dans un dispositif comprenant trois autres niveaux : départemental, zonal et national, où l'Etat peut faire monter en puissance le dispositif par le déploiement de moyens spécifiques ou complémentaires. Dans tous les cas, l'interlocuteur du maire est le préfet du département.

Les différents niveaux territoriaux disposent de structures de commandement permettant aux autorités respectives d'être informées et d'exercer les fonctions qui leur sont dévolues en temps de crise (direction des opérations ou coordination).

Au niveau du département, le dispositif opérationnel de l'autorité préfectorale s'articulent autour de deux types de structures de commandement :

- le Centre Opérationnel Départemental (COD) à la préfecture, organisé autour du service chargé de la défense et de la protection civiles (SIDPC ou SIRACEDPC),
- le Poste de Commandement Opérationnel (PCO) au plus près des lieux d'actions mais hors de la zone à risques. Il est chargé de coordonner les différents acteurs agissant sur le terrain.

Si l'événement dépasse les capacités de réponse d'un département, la zone de défense par l'intermédiaire du Centre Opérationnel de Zone (COZ) fournit les moyens de renforts et coordonne les actions. En cas de besoin, le niveau national par l'intermédiaire du Centre Opérationnel de Gestion Interministériel de Crise (COGIC) appuie le dispositif déjà en place. La chaîne opérationnelle est présentée à la figure suivante.

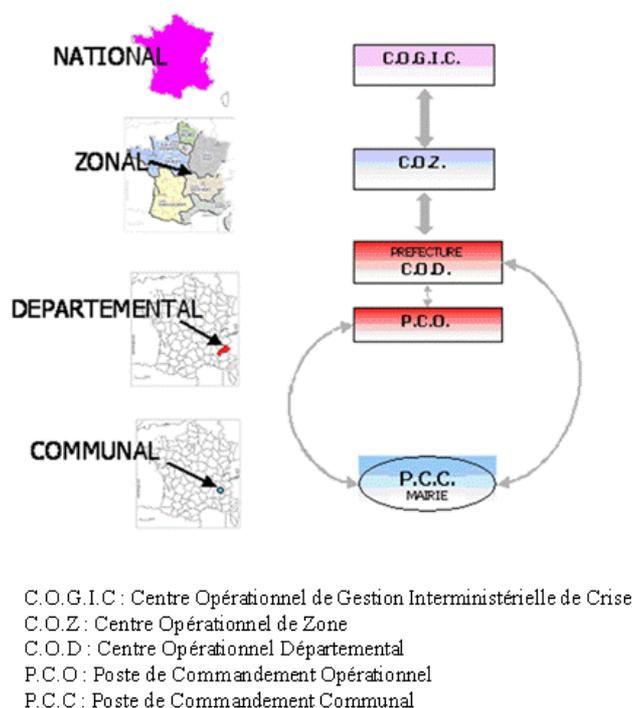


Figure 110. *Chaîne opérationnelle de gestion des risques (Memento, 2008)*

La réponse aux situations d'urgence exige la mobilisation rapide de tous les moyens publics et privés et leur coordination efficace sous une direction unique. A cet égard, la France bénéficie d'une tradition juridique éprouvée et réaffirmée par loi n°2004-811 de modernisation de la sécurité civile, qui investit les maires et les préfets, autorités de police générale, de pouvoirs étendus en situation de crise.

Le cas échéant, l'Etat, par l'intermédiaire du préfet, prend la direction des opérations de secours, lorsque :

- le maire ne maîtrise plus les événements, ou qu'il fait appel au représentant de l'Etat,
- le maire s'étant abstenu de prendre les mesures nécessaires, le préfet se substitue à lui, après mise en demeure et après que celle-ci soit restée sans résultat,
- le problème concerne plusieurs communes du département,
- l'événement entraîne le déclenchement d'un plan ORSEC,
- la gravité de l'évènement tend à dépasser les capacités locales d'intervention.

Lorsque le préfet prend la direction des opérations, le maire assume toujours, sur le territoire de sa commune, la responsabilité de la mise en œuvre des mesures de sauvegarde vis-à-vis de ses administrés (alerte, évacuation ...) ou des missions que le préfet peut être amené à lui confier (accueil de personnes évacuées...).

Si les conséquences peuvent dépasser les limites ou les capacités d'un département, le représentant de l'Etat dans le département du siège de la zone de défense, voire le Gouvernement, interviennent dans la conduite des opérations lorsque c'est nécessaire.

4.4.1. *Plan ORSEC*

En complément de cette organisation, les services se préparent par l'intermédiaire de plans pour faire face aux risques identifiés. L'architecture novatrice du nouveau plan ORSEC s'articule autour de trois grands éléments :

- le dispositif opérationnel, cœur actif du plan,
- un recensement et une analyse préalable des risques,
- et les phases de préparation, d'entraînement et d'exercices nécessaires à l'appropriation du savoir-faire opérationnel.

Adapté aux risques prévisibles recensés, il permet de réagir à toute autre situation non scénarisée de part sa conception sous forme de « boîte à outils opérationnels ».

Les dispositions spécifiques ORSEC du département reprennent en partie le contenu des deux catégories de plans d'urgence précédemment définies par la loi n°87-565 du 22 juillet 1987 : les plans de secours spécialisés (PSS) et les plans particuliers d'intervention (PPI). Ces dispositions spécifiques doivent apporter une valeur ajoutée par rapport aux dispositions générales : risques traités et leurs effets sous forme de scénarios d'événement et d'enjeux concernés, les stratégies d'actions avec les contre-mesures adaptées, les mesures particulières d'alerte si nécessaire, les missions propres des intervenants, liste des experts, base de données ...

Pour apporter une réponse de proximité à la crise, et en complément de l'intervention des services de secours et du dispositif opérationnel ORSEC, la loi de modernisation de sécurité civile (article 13) a instauré le Plan Communal de Sauvegarde (PCS). Le PCS est l'outil opérationnel à la disposition du maire pour l'exercice de son pouvoir de police en cas d'événement de sécurité civile. Il est obligatoire dans les communes identifiées comme soumises à un risque majeur, c'est-à-dire celles concernées par un Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles approuvé (PPRN) ou un Plan Particulier d'Intervention (PPI). Le Plan Communal de Sauvegarde détermine les mesures immédiates de sauvegarde et de protection des populations, fixe les modalités de diffusion de l'alerte et des

consignes de sécurité. Afin de concrétiser le lien indispensable entre l'information préventive des populations sur les risques et l'organisation de la commune face aux risques, le PCS regroupe l'ensemble des documents communaux d'information préventive.

4.4.2. *Indemnisation en cas de catastrophe naturelle*

La loi n°82-600 du 13 juillet 1982 modifiée, relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles (art. L.125-1 à L. 125-6 du Code des assurances) a fixé pour objectif d'indemniser les victimes de catastrophes naturelles en se fondant sur le principe de solidarité nationale.

Sont considérés comme effets des catastrophes naturelles les dommages matériels directs non assurables.

Pour que le sinistre soit couvert au titre de la garantie " catastrophes naturelles ", il faut que l'agent naturel en soit la cause déterminante. L'agent naturel doit par ailleurs présenter une intensité anormale, quelle que soit son étendue (dommage très localisé ou non).

La garantie sera mise en jeu si les biens atteints sont couverts par un contrat d'"assurance dommage ", ou contrat " perte d'exploitation " et si l'état de catastrophe a été constaté par un arrêté interministériel pris par les ministres chargés de la sécurité civile, et de l'économie.

Sont garantis les immeubles et meubles (y compris véhicules terrestres à moteur) assurés contre les dommages d'incendie ou tout autre type de dommage (vol, dégâts des eaux, etc ...).

Exceptées la tarification et les franchises, la garantie des catastrophes naturelles n'a pas de conditions qui lui soient propres. Elle suit celles de la garantie de base du contrat (le plus souvent, la garantie incendie), et couvre donc généralement :

- les habitations et leur contenu,
- les installations industrielles et commerciales et leur contenu,
- les bâtiments appartenant aux collectivités locales et leur contenu,
- les bâtiments agricoles (y compris les récoltes, machines ou animaux se trouvant à l'intérieur des dits bâtiments),
- les serres considérées en tant que bâtiment ou matériel (à l'exclusion toutefois des cultures contenues dans celles-ci),
- les véhicules,

- les accessoires et équipements automobiles si leur couverture est prévue dans la garantie de base,
- les clôtures, murs de soutènement ou fondations s'ils sont couverts par le contrat,
- éventuellement les forêts lorsqu'elles sont assurées par un contrat "dommages aux biens",
- les frais de déblai, de démolition, de pompage et de nettoyage.

Même après reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, ne sont pas indemnisables :

- les dommages corporels,
- les biens non assurés ou généralement exclus des contrats d'assurance dommages (terrains, plantations, clôtures, murs de soutènement, sépultures, canalisations, voirie, ouvrages de génie civil...),
- les récoltes non engrangées, cultures, sols, cheptel vif hors bâtiment,
- les dommages indirectement liés à la catastrophe (contenu des congélateurs...) ou frais annexes (pertes de loyers, remboursement d'honoraires d'expert...).

L'état de catastrophe naturelle, ouvrant droit à la garantie est constaté par un arrêté interministériel (des ministères de l'Intérieur et de l'Economie et des Finances) qui détermine les zones et les périodes où s'est située la catastrophe ainsi que la nature des dommages résultant de celle-ci et couverts par la garantie (art. L. 125-1 du Code des assurances).

5. Conclusion

Cet exemple fil rouge a permis d'illustrer les différentes notions, méthodes et outils de l'analyse de risques, développés dans les étages de la maison Cyberrisques, sur un exemple de risque avalanche. Quelque soit le domaine d'application, une analyse de risques doit être fondée sur :

- une analyse systémique cohérente (en termes d'échelles et de limites) vis-à-vis des connaissances du système étudié et des actions d'ingénierie possibles,
- une connaissance précise du contexte économique, social et réglementaire du système étudié,
- une recherche systématique des scénarios de défaillance,

- une analyse critique des données quantitatives disponibles et la vérification des hypothèses d'application des modèles disponibles,
- une recommandation cohérente en termes d'actions possible et de contexte économique, social et réglementaire pour mitiger les risques.

6. Bibliographie

Ancey C. 1998. Guide et Avalanches : Connaissances, Pratiques, Sécurité. Aix-en-Provence : Edissud. 320p.

Anena. 2008. Association Nationale pour l'Etude de la Neige et des Avalanches. URL : www.anena.org.

Avalanche. 2008. Programmes d'études des avalanches. URL : www.avalanches.fr.

Barjot R. 1991. Développement industriel et commercial du Panda – Nouvelles applications au contrôle de compactage et à la caractérisation des couches de neige. Mémoire de fin d'étude CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand.

Batoke K.D. 2008. Analyse économique du risque avalanche. Rapport de stage. Polytech' Clermont-Ferrand.

Bergzoll I. 2003. Modifications du manteau neigeux par le passage de skieurs et le déclenchement d'avalanches. Mémoire de fin d'étude CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand.

Boissier D., Muzeau J.P. Avalanches. COST C26-WG4: Risk Assessment for Catastrophic Scenarios in Urban Areas, September 2008.

Boissier D., Gourvès R. 2000. Caractérisation -de la variabilité mécanique du manteau neigeux. La neige recherche et réglementation, pp 41,64, Presses de l'ENPC, ISBN 2-8598-318-0.

Bolognesi R. Ousset F. Daultier J.M. 1995. Une évaluation quantitative du snowdrift pour la prévision locale des avalanches. Neige et Avalanches 69.

Bolognesi R. 1997. Prévision locale des avalanches en France : pourquoi et comment ?. Neige et Avalanches 78.

Brun E., David P., Sudul M., Brunot G. 1992. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. Journal of Glaciology, IGS, Cambridge, n°32, pp. 13-22.

Buisson L. Charlier C. 1992. Analyse de sites avalancheux: le système ELSA. Dans Université européenne d'été sur les risques naturels. Chamonix : Cemagref.

Burlet J.L., Bacconnet C., Boissier D., Gourvès R. 1999. Modelling of the snow cover variability with a Gaussian stochastic field. 8th ICASP, pp 869, 875, Sydney, 12-15 décembre 1999. Edités par R.E. Melchers et M. G. Stewart, BALKEMA.

Burlet J.L., Boissier D., Gourvès R. 2003. Application of Monte Carlo simulations for calculating the probability of local avalanche. ICASP 9th International conference on applications of statistics and probability in Civil Engineering, San Francisco (USA), 6-9 juillet 2003.

Burlet J.L. 2002. Mécanique de la neige et variabilité – Application à la prévision du risque d’avalanche. Thèse en Génie Civil. Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II.

Burlet J.L. 1998. Comportement mécanique de la neige et variabilité. DEA Génie Civil. Université Blaise Pascal Clermont II – LERMES.

Clergue D., Monpeu J., Touani A. 2007. Analyse du risque d’avalanche – AMDEC. Rapport interne – rendus de l’UP Risques. Polytech’Clermont-Ferrand.

Cogoluenhes, P. 1983. L’avalanche des Favrans du 16 mai 1983. Direction Départementale de l’Agriculture (Savoie), services RTM.

Collot N. 1998. Contribution à l’étude des avalanches dans la Cordillère des Andes – Application du Pandalp. Mémoire de fin d’étude CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand.

Deneuve F., Dorkel A. 2007. Analyse du risque d’avalanche – APR. Rapport interne – rendus de l’UP Risques. Polytech’Clermont-Ferrand.

Duclos, A. 1998. Etude des conditions de départ d’avalanches de plaques. Thèse Géographie. Université Joseph Fourier.

Dumoussat A. 1996. Délimitation et caractérisation des différentes couches composant le manteau neigeux à l’aide du Pandalp. DEA Génie Civil. Université Blaise Pascal Clermont II – LERMES.

Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc’h G., Lesaffre B., Martin E. 1993. A meteorological estimation of relevant parameters of snow. Annals of Glaciology, IGS, Cambridge, n°18, pp. 65-71.

Foehn, P. Heachler P. 1978. Prévision de grosses avalanches au moyen d’un modèle déterministe-statistique dans Deuxième rencontre internationale sur la neige et les avalanches. Grenoble : ANENA.

Gardon J. Heyman S. Nguyen L. 2008. Analyse du risque d’avalanche en station – La Plagne. Rapport interne – rendus de l’UP Risques. Polytech’Clermont-Ferrand.

Ghali, A., 1994. Estimation de la distance maximale d’arrêt des avalanches. Neige et Avalanches, 68 : p.19-22.

Ghali A. 1996. Méthodes statistiques pour la détermination de la distance d'arrêt des avalanches. Université Joseph Fourier.

Giraud G. 1991. MEPRA : modèle expert d'aide à la prévision du risque d'avalanches. Actes du symposium de Chamonix, juin 1991, ANENA, Grenoble, pp. 248-254.

Givry M., Perfettini P.. 2004. Construire en montagne – la prise en compte du risque d'avalanche. Ministère de l'écologie et du développement durable et Ministère de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer. 83 p.

Glass B., Huet P., Rat M., Tordjeman R. 2000. Retour d'expérience sur l'avalanche du 9 février 1999 à Montroc – Commune de Chamonix – Après la phase contradictoire. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. 77 p.

Hamacher S., Phamle T. 2007. Analyse du risque d'avalanche – Nœud Papillon. Rapport interne – rendus de l'UP Risques. Polytech' Clermont-Ferrand.

Marlaud J. 1996. Application d'un modèle de calcul à la rupture pour la prévision du risque d'avalanche. Mémoire de fin d'étude CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand.

Martin F. 1993. Application du Panda et du scissomètre à moteur à la caractérisation mécanique du manteau neigeux. Mémoire de fin d'étude CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand.

Martin P. 1996. Validation de la sonde Pandalp et étude de la stabilité des pentes de neige. Mémoire de fin d'étude CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand.

Mases Cabero M. 1997. Analyse et modélisation de la neige transportée par le vent sur des sites d'avalanche et sur les domaines skiabiles – Application aux sites du Stillberg (Alpes suisses) et de la Molina (Pyrénées catalanes). Université Joseph Fourier de Grenoble.

Meffre J.F. 1986. Protection des voies de communication et des travaux d'un grand chantier en montagne par prévision localisée du risque d'avalanche, 2^{ème} Colloque International des Services de Prévision des Risques d'Avalanches (C.I.S.P.R.A. 86), Météo-France, Centre d'Etude de la Neige, Grenoble.

Memento. 2008. Mémento du maire et des élus locaux. URL : www.mementodumaire.net.

Météo France. 2008. URL : france.meteofrance.com

Meunier P. 2001. Caractérisation mécanique de la neige et modélisation des avalanches. Mémoire de fin d'étude CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand.

Naim-Bouvet F., Prat M., Jacob J., Calgaro J.A., Raoul J. 2000. La neige – recherche et réglementation. Editions Presses de l'école nationale des ponts et chaussées et Cemagref.

Pahaut E. Giraud G. La Prévision du risque d'avalanche en France. Neige et Avalanches 76 ; ibid. 77.

Pellez J.C. 1997. Validation scientifique de la sonde Panda avec adaptation au logiciel d'observation et d'estimation du manteau neigeux – étude de la stabilité d'une pente neigeuse. Mémoire de fin d'étude CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand.

Primnet. 2008. URL : www.prim.net.

SLF. 2008. URL : www.slf.ch.

Schneider C. 1995. Prévision locale du risque d'avalanche à La Plaigne. Actes du colloque Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche. Grenoble : ANENA-CEMAGREF.

Thulliez J.F. 1994. Caractérisation mécanique du manteau neigeux à l'aide des essais au pénétromètre Pandalp. Mémoire de fin d'étude CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand.

Villecrose J. 1997. La prévision départementale du risque d'avalanche - l'exemple de l'Isère. La Météorologie, 8 série 17.