

Gestion et prévision du risque d'avalanches

Christophe Ancey

SKIEURS, RESPONSABLES DE LA SÉCURITÉ DES PISTES, personnels de l'équipement, aménageurs, météorologistes, autorités locales, tous se sont vus un jour ou l'autre confrontés au problème de l'estimation du risque d'avalanches. Si le problème est a priori le même, les moyens de réponse dépendent de chaque cas particulier. Nous allons voir dans ce chapitre les principales procédures d'estimation du risque à travers les deux démarches complémentaires que sont la gestion et la prévision. La gestion du risque passe par la prévention et une analyse spatiale; on y a recours dès lors qu'on souhaite protéger un équipement. La prévision du risque intègre uniquement la dimension temporelle du risque; c'est le souci premier du skieur par exemple, qui doit traverser une pente à un moment donné.

6.1 L'estimation du risque d'avalanches

6.1.1 Position générale du problème

L'objet de cette partie est d'ouvrir une parenthèse sur les notions de risque, de danger, d'aléa et d'estimation. La discussion présentée ici est une des approches possibles. Elle est simplifiée et pour plus de détails, on renvoie le lecteur à des revues spécialisées plus complètes (voir par exemple [1]).

— Il n'existe pas d'estimation universelle du risque, car celle-ci doit tenir compte du contexte dans lequel on l'utilise: s'interroger sur la sûreté d'une pente avant le passage d'un groupe de skieurs, se demander s'il est nécessaire de faire un tir préventif pour un secteur dominant une piste de ski, savoir si telle zone est constructible et hors de portée des avalanches, fermer ou non une route aux automobilistes durant

une situation avalancheuse sont autant de questions appelant une bonne estimation du risque, mais nécessitant des moyens totalement différents. Le skieur ou le pisteur a de manière générale à répondre à la question fondamentale: « cette pente est-elle avalancheuse en ce moment et sous quelles conditions? ». Il s'agit pour eux d'estimer un risque temporel. Les procédures d'estimation sont des prévisions du risque. Dans un projet de constructions, l'aménageur s'intéresse à connaître les zones dangereuses du site, c'est-à-dire celles susceptibles d'être touchées par des avalanches. Ce zonage est établi en fonction de la fréquence (période de retour) et de la gravité (dommage) du phénomène rencontré ou potentiel et doit répondre à la question: « à quel danger est soumis cet endroit et quel degré de sûreté peut-on lui attribuer? ». On parle dans ce cas de risque spatial. Dans ce cas-ci, l'estimation se fait dans le cadre de la gestion et de la prévention du risque.

- Le risque est une perception du danger. On parle d'évaluation du risque et non de mesure du danger afin de bien rendre compte de l'aspect subjectif de l'appréciation. Cette estimation n'est jamais qu'une opinion probable, dont il n'est pas toujours possible de vérifier la pertinence. Ainsi, si un skieur suppose qu'il y a un risque pour une pente, il n'y passera pas et à moins de se soumettre à l'ordalie des montagnes, il ne saura pas s'il a tort ou raison. De même, l'expertise d'un site repose sur une analyse de la menace potentielle établie, entre autres, à partir de l'étude du site et de son histoire avalancheuse, dont la connaissance est forcément restreinte et floue. Cette analyse malheureusement lacunaire conduit parfois à mésestimer les effets d'avalanches exceptionnelles (avalanche au chalet de l'UCPA¹ à Val-d'Isère en février 1970 ou plus récemment l'avalanche d'Arinsal² en Andorre en février 1996). Dans ce cas, c'est la gravité du risque qui aura été mal évaluée.
- Après avoir montré la nuance entre danger et risque, il faut revenir sur la notion de danger. Un phénomène constitue un danger dans la mesure où il constitue une menace (réelle ou imaginaire) pour des biens ou des personnes, c'est-à-dire qu'il est susceptible de causer un dommage³. Le danger est donc la perception de l'aspect nuisible d'une chose ou d'un fait, qui existe indépendamment de tout observateur humain. On désigne souvent ce fait sous le terme générique d'aléa.
- On a vu que le danger est la perception d'un aléa (comme potentialité de dommage) par un observateur; le risque est la perception du danger par ce même observateur. À chaque niveau de perception, on va introduire des erreurs, qui contribue à rendre subjective l'estimation finale.

6.1.2 Aspect subjectif de l'estimation: quelques exemples

Pour illustrer la subjectivité dans l'appréciation du risque d'avalanche, on met en relief, à travers une prévision faite par des skieurs, les nombreux problèmes intervenant dans les différentes étapes de cette procédure. L'analyse de la gestion spatiale du risque nécessiterait l'étude de la démarche intellectuelle suivie par l'expert, qui est encore plus complexe (voir [2]); nous n'en parlerons pas ici.

^{1.} Le 10 février 1970, une avalanche exceptionnelle s'abattit sur le chalet de l'UCPA à Val-d'Isère causant la mort de 39 personnes. 6 jours après. 72 personnes trouvèrent la mort dans un sanatorium au pied du plateau d'Assy, ; l'accident a été provoqué par une coulée de boue mêlée à de la neige.

^{2.} L'avalanche d'Arinsal a causé d'importants dégâts matériels, mais par une chance extraordinaire aucune victime ; la station avait été évacuée à ce moment-là.

^{3.} Voir aussi [1] sur les aspects socio-économiques et les différentes acceptions de risque.

Élaboration du jugement

Par quels moyens procède-t-on exactement à l'évaluation du risque d'avalanches sur le terrain? Comme toute activité mentale, cette détermination se construit à différents niveaux à partir d'un raisonnement, de la perception, de l'intuition, etc. Chacun d'eux nécessite individuellement la mise en jeu d'autres activités mentales:

- mémoire: l'expérience alpine accumulée au fil des courses (connaissance par expérience directe) permet de retenir un grand nombre de faits, d'événements, de situations qui sont autant d'exemples qui servent à établir (à induire) une estimation du risque; un tel processus sous-tend également des capacités intellectuelles. Ce n'est donc pas une simple remémoration;
- connaissances: la connaissance théorique est la description d'objets ou de vérités qu'elle présuppose. On forge son opinion par référence à ses connaissances en nivologie, en météorologie, etc.;
- raisonnement: l'organisation des données (connues par expérience ou par description) nécessite un certain nombre de qualités intellectuelles qui permettent d'inférer le jugement final: sens de l'observation, du terrain, sens critique, capacité de rationalisation, esprit de décision, etc.;
- intuition: on entend par là le pressentiment d'un danger plus ou moins fondé et le sentiment ou la présomption inférée sur la base de données lacunaires voire contradictoires. L'intuition se développerait avec les connaissances;
- dialogue: dans le cas d'un groupe, la décision peut être le fruit d'un dialogue entre les membres. Les vertus relationnelles (sens du commandement, communication) favorisent l'efficacité du dialogue.

Erreurs dans le jugement

L'évaluation du risque est une opinion probable déduite ou induite à partir des processus énumérés ci-dessus. L'erreur de jugement est toujours possible et est soumise aux influences diverses liées à la nature même de la neige ou à la psychologie de l'individu. Ainsi pour un skieur:

- les données ne sont pas toujours faciles à interpréter car la nivologie, qui explore les relations causales et résultantes entre des données concernant le manteau neigeux, n'est pas encore un système complet. Pour le skieur, les données se résument le plus souvent aux renseignements concernant la couche superficielle du manteau neigeux. Elles présentent une très grande variabilité temporelle et spatiale, et l'extrapolation d'une analyse locale même fine (par sondage) peut être ardue;
- l'évaluation du risque nécessite du temps pour être réalisée, ce qui n'est pas toujours compatible avec la conduite de la course (lorsque l'on est pressé par le temps ou dans la griserie de la descente par exemple) ou ce qui impliquerait un nombre excessif d'examens du manteau pour établir un jugement global pertinent;
- la charge imposée au manteau est difficile à prendre en compte: les actions d'un skieur isolé, d'un groupe de skieurs émérites ou débutants, le choix de la trace (directe, tournante), la manière de solliciter la neige (type de virages, cadence, etc.), etc. sont des facteurs dont l'influence est prépondérante mais peu facile à évaluer;
- le jugement peut être altéré par la fatigue et l'altitude, qui diminuent l'acuité sensorielle et l'aptitude intellectuelle. En outre, le comportement et la perception du risque dépendent de notre disposition intérieure, de notre appartenance socioculturelle [3]: en schématisant, le surfeur enclin au « fun » aura plus tendance à négliger

le danger que le skieur de randonnée amoureux de montagnes; de manière plus ou moins consciente, il accepte d'encourir des dangers (connus ou non) en échange du plaisir de la descente. De même, un skieur téméraire aura une perception tout autre qu'un individu prudent ou de nature inquiète;

- l'information sur le terrain est surtout accessible visuellement, or la perception de « signes » dans un décor uniforme et blanc est non seulement malaisée (car l'information y est faible et diffuse) mais aussi trompeuse dans le sens où elle reste superficielle (en se limitant à la surface du manteau) et tend à extrapoler une situation globalement stationnaire [3];
- la persistance dans l'erreur est une forme aggravée d'erreur, qui a conduit à de graves accidents et qui consiste à nier une représentation correcte du risque. La volonté de dépassement, la peur de décevoir peuvent être à l'origine de cet entêtement mais aussi une propension fâcheuse chez certains à vouloir conformer le réel à leurs convictions. Raoul Mathieu donne ainsi l'exemple du randonneur se fourvoyant dans son itinéraire et qui continue à se fabriquer des preuves pour faire coller son opinion à la réalité [3].

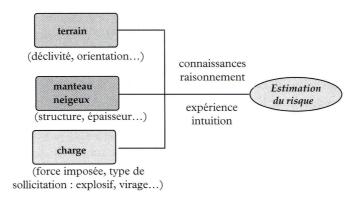


Figure 6.1 L'appréciation du risque est la réponse à la question : la pente est-elle avalancheuse, à quel moment et pour quelle charge? Elle est le résultat d'un processus cognitif et déductif complexe élaboré à partir de données plus ou moins lacunaires concernant à la fois le terrain, l'état du couvert neigeux et la sollicitation imposée.

6.1.3 Prévention et gestion du risque d'avalanches

Lorsqu'un aménagement ou un équipement (station de ski, remontée mécanique, barrage hydroélectrique, pylône, route, etc.) est envisagé dans un massif ou sur un site avalancheux, une réflexion est entreprise dans le cadre des études préalables de faisabilité du projet pour estimer les risques auxquels il sera soumis, déterminer s'ils sont acceptables, et proposer un choix des meilleures solutions de protection. Un tel travail est une affaire de spécialistes et il est confié à un expert, qui va méthodiquement élaborer son diagnostic et ses conseils selon une démarche dont les principes et les étapes résultent, entre autres, d'une longue expérience et de ce que l'on nomme communément le « bon sens » du terrain, de la montagne et des dangers qu'elle présente pour les hommes qui la fréquentent (pour une introduction plus générale sur l'expertise dans le domaine des risques naturels, le lecteur peut consulter [4, 5, 6]).

Principes généraux de l'expertise

L'expérience a montré qu'il était facile, utile et même nécessaire de distinguer cinq grandes étapes dans cette démarche.

1. Étude locale du site

Trois analyses sont engagées simultanément à ce premier stade de l'expertise:

- (a) l'étude des critères physiques du site avalancheux : il s'agit de relever les éléments de nature physique dont l'influence peut être déterminante sur la formation et le déroulement du phénomène, d'en apprécier l'importance relative, et d'attribuer une valeur à leur implication dans le « fonctionnement » avalancheux du site étudié;
- (b) l'étude de ses conditions climatiques hivernales: le rôle et l'efficacité de ces différents paramètres sont ensuite étudiés par rapport au facteur le plus déterminant des avalanches: la nivologie locale. Car il faut tout de même de la neige pour produire des avalanches! Les valeurs de force et direction du vent, la distribution et l'importance des précipitations neigeuses, les variations des différents paramètres de température doivent permettre, à condition de les étudier ensemble, de déterminer les critères nivo-météorologiques propices aux conditions avalancheuses critiques, c'est-à-dire, l'évolution des différentes causes d'instabilité du manteau neigeux en place, et/ou en cours de constitution. Le spécialiste des risques d'avalanches doit en particulier s'attacher à former le bon diagnostic sur les conditions nivologiques extrêmes qu'il faut envisager, et à fixer ainsi une limite supérieure à la grandeur des phénomènes qu'il faudra prendre en compte dans la suite de l'expertise;
- (c) enfin, l'études des avalanches historiques: en matière d'avalanche, et contrairement à la plupart des autres risques naturels, l'étude des événements anciens constitue l'une des principales sources d'information. C'est pourquoi la recherche des indices laissés sur le site étudié par les avalanches du passé reste une opération capitale. Ces indices sont marqués sur le terrain (dans la végétation principalement), mais aussi, sur la morphologie des cônes de déjection, par une ségrégation particulière des éboulis, par des traces repérables d'érosion ou de dégradation sur des équipements, etc. Ils sont constitués également par des témoignages des habitants de la région et des renseignements recueillis dans toutes sortes d'archives. Ce sont alors des énumérations de dégâts, des recherches d'explications, parfois des tentatives de descriptions du phénomène. Certaines sont quelquefois anciennes de plusieurs siècles et ne mentionnent même pas la notion d'avalanche...

L'analyse critique de ces indices (un travail de « détective » en quelque sorte) est intéressante à plusieurs titres :

- (a) une partie de cette recherche peut être effectuée indépendamment du projet d'aménagement initial : elle peut donc être systématisée ;
- (b) portant sur des critères géographiques et topographiques, les renseignements collectés sont assez faciles à cartographier: voir l'exemple des cartes de localisation probable des avalanches 4 (cf. \S 6.1.3);
- (c) les avalanches dont on a gardé le souvenir avaient frappé leurs observateurs : elles étaient exceptionnelles. Ce sont justement celles contre lesquelles on cherche à se protéger ;
- (d) par une extrapolation simple, il est parfois possible de fixer un ordre de grandeur de la durée de retour de ces avalanches exceptionnelles;

^{4.} Appelées depuis 2001, carte de localisation des phénomènes d'avalanche.

- (e) ces dernières constituent quelquefois une image du phénomène maximum à prendre en compte (« le Petit âge glaciaire » dans les Alpes européennes);
- (f) l'étude des avalanches exceptionnelles anciennes donne souvent la possibilité de mieux se représenter et de comprendre leur fonctionnement et leur dynamique dans le site.

Ces trois enquêtes consistent à rassembler les données de bases nécessaires à l'étape suivante, mais constituent déjà des expertises en elles-mêmes. Il y a intérêt à les mener conjointement car elles reposent évidemment en grande partie sur le résultat des observations de terrain à effectuer sur le site. Mais surtout les déductions, mêmes hypothétiques, obtenues de l'une, enrichissent les réflexions conduites sur les autres, et inversement. Si bien que chacune gagne à progresser en même temps que les deux autres.

2. Description de scénarios d'avalanches majeures

Connaissant le site et les conditions nivo-météorologiques hivernales extrêmes susceptibles de s'y produire, on « imagine » ensuite les avalanches capables de s'y déclencher. C'est l'étude des phénomènes avalancheux concevables dans le site les causes et le déroulement de leur déclenchement, les types d'écoulement, leur dynamique, les modalités de l'étalement et de l'arrêt, etc. Il s'agit ici de déterminer des scénarios d'avalanches majeures du site. Concevoir des scénarios d'avalanche consiste concrètement à prévoir et à décrire la forme, la nature et les dimensions des avalanches potentielles, en se fixant des hypothèses sur l'emplacement de la ligne de rupture du manteau neigeux, sur les épaisseurs de neige mobilisée, sur les qualités de neige considérées, sur les surfaces concernées, etc, Cet effort de conception de scénarios d'avalanche est à conduire – compte tenu des éléments de connaissance dégagés, en première étape, sur l'ensemble des paramètres spécifiques du site déterminant la dynamique des phénomènes – simultanément sur les trois phases caractéristiques de l'écoulement d'avalanche, et à partir des trois points de vue portant sur

- la localisation (les trajectoires, les emprises);
- la puissance, la nature, et les caractéristiques des efforts développés;
- la probabilité d'occurrence (la période de retour).

Le résultat de cette réflexion se traduit sous la forme de plusieurs scénarios d'avalanche. Des conditions vivo-météorologiques locales, issues de régimes climatologiques totalement différents, expliquent souvent le nombre des scénarios.

3. La détermination de l'avalanche majeure de référence

Jusqu'ici, l'étude n'a porté que sur le site et les avalanches pouvant s'y produire, sans prendre en compte la nature de l'aménagement ou de l'équipement à protéger. L'expert a mené « une étude d'avalanches »; il s'agit maintenant d'entreprendre l'étude du danger d'avalanche, car la notion de danger ne possède de sens que par rapport à un objet menacé: une avalanche parcourant le fond d'une vallée déserte n'est pas dangereuse! Inversement, pour un équipement déterminé, situé à un endroit défini d'une zone avalancheuse, on ne considérera pas systématiquement toutes les avalanches susceptibles de se produire dans la zone, mais seulement celles dont l'extension ou un comportement « inhabituel » peut représenter un danger pour sa pérennité ou sa sécurité. Enfin, il est évident que face à une même avalanche, on n'entreprendra pas les mêmes ouvrages de protection si l'équipement à protéger est un hôpital ou un pylône électrique, une route internationale très fréquentée ou une piste de ski. Il faudra sans doute empêcher l'avalanche de partir ou d'atteindre l'hôpital, tandis que pour le pylône on pourra se contenter, selon la durée de retour, de ne rien faire et de prendre le risque d'avoir à le réparer. De même, la sécurité de la route nationale sera sans doute assurée par une galerie, alors que celle de la piste se fera soit par sa fermeture en période critique, soit par un déclenchement artificiel préventif. On voit ainsi se dessiner le type de réflexions et d'interrogations que l'expert doit résoudre à cette étape de son travail. Là réside sans doute un véritable travail d'expert : conseiller clairement le décideur pour fixer définitivement le scénario (ou exceptionnellement les deux scénarios) de l'avalanche majeure qui lui servira de référence dans toute la suite de son raisonnement. Et là se trouve en fait, le plus souvent, l'explication d'une bonne ou d'une mauvaise expertise. Cette étape constitue la partie fondamentale de l'expertise en génie paravalanche. À ce stade de la démarche, il est absolument indispensable de lever, entre tous les acteurs de la décision finale, toutes les ambiguïtés du problème posé, d'épuiser en particulier le débat sur les notions fondamentales d'avalanche de référence, de risque acceptable et de responsabilité, et d'obtenir un consensus général avant de passer à la recherche d'une méthode de protection [7].

4. Sélection d'une stratégie paravalanche

L'avalanche de référence retenue, et compte tenu de la nature et de la vulnérabilité de l'équipement à protéger, le spécialiste propose ensuite une stratégie paravalanche. La réponse au problème posé peut être recherchée selon des philosophies différentes : on pourra soit tenter de supprimer l'avalanche définitivement, soit la laisser se produire naturellement mais déplacer les équipements en dehors de son emprise, ou les adapter de manière qu'ils résistent aux poussées de l'avalanche sans dégâts pour eux et sans danger pour leurs utilisateurs, soit encore chercher à modifier l'ampleur de l'avalanche, sa trajectoire, sa limite d'arrêt, sa fréquence, etc., ou la provoquer à titre préventif. Ce choix de stratégie de protection s'effectue par tâtonnements et par des allers et retours entre les différents acteurs de la réalisation du projet. En effet, i1 arrive souvent qu'à l'étape suivante, ne trouvant pas une solution technique satisfaisant l'ensemble des responsables, on soit obligé de changer de stratégie.

5. Conception du dispositif technique de protection

Le mode de lutte étant arrêté, il faut sélectionner dans le catalogue des techniques de protection disponibles, celle, ou plus souvent, l'assortiment de celles qui, compatibles et cohérentes avec tous les autres critères de faisabilité du projet, vont constituer la solution de protection préconisée par l'expert (voir chap. 8).

Dans sa démarche, outre son expérience, l'expert dispose d'un certain nombre de données et d'outils qui peuvent l'aider dans son diagnostic : diverses cartographies, des outils de modélisation, mais également des fichiers de données d'enquête (enquête permanente des avalanches : EPA, observation permanente sur les avalanches : OPA), études climatologiques, recherches historiques (archives des registres cadastraux, paroissiaux, administratifs, etc.).

Utilisation des données

On retrouve les données relatives aux avalanches sous différents types de support.

- Cartographie: il en existe différents types. La carte de localisation probable des avalanches (CLPA), appelée depuis 2001 la carte de localisation des phénomènes d'avalanche⁵, en est le plus connu. En général, la CLPA un moyen de représentation efficace pour saisir rapidement l'ensemble des secteurs exposés aux avalanches

^{5.} Il faut également signaler qu'il existe d'autres types de cartes qui sont utilisées lorsqu'une étude plus complète est nécessaire: ce sont entre autres les plans des zones exposées aux avalanches (PZEA), les plans d'exposition aux risques (PER), et les plans de prévention des risques (PPR) qui sont établis à partir d'une analyse d'expertise en tenant compte de la fréquence et de l'intensité des phénomènes. Ils sont accompagnés de livrets explicatifs du zonage et des prescriptions pour améliorer la sécurité des secteurs aménagés. L'échelle de ces plans de zonage des risques est au 1: 1000 ou 1: 5000. Voir le chap.

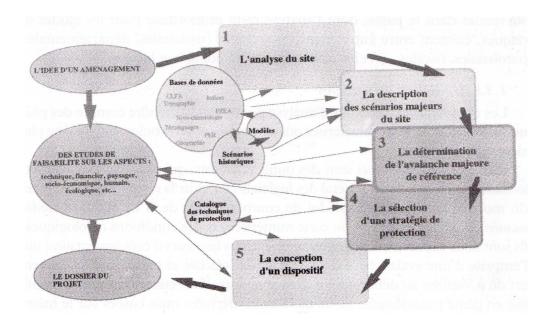


Figure 6.2 Schéma de synthèse: principe d'une expertise sur le risque d'avalanche. Lors des analyses de la faisabilité d'un projet d'aménagement, l'étude sécuritaire vise entre autres à examiner la possibilité d'un accident dû aux avalanches. Ce travail est confié à un expert qui dispose d'une panoplie de méthodes et d'outils pour établir son diagnostic et proposer des solutions.

d'une région. C'est à la suite de la catastrophe de Val-d'Isère qu'une commission interministérielle a recommandé l'établissement d'un tel document [8]. La réalisation de la CLPA fut ainsi mise en œuvre par la division Nivologie du Cemagref en liaison avec l'IGN ⁶ et avec les services RTM ⁷ [9]. En 1998, le programme de mise à jour de ce document ⁸ est réalisé presque entièrement. Ces documents sont disponibles à la consultation dans les services départementaux, les mairies, les services de pistes et chez certains professionnels. Ils ne sont pas en vente dans le commerce. La CLPA représente sur un fond de carte les secteurs concernés par une activité avalancheuse probable (enveloppe de l'emprise extrême des avalanches passées). Elle donne donc un renseignement brut sans tenir compte de l'occurrence et du degré de gravité du phénomène. Les données sont obtenues à partir d'une photo-interprétation de photographies aériennes d'été (recherche d'indices et de traces de dégâts) et d'une enquête de terrain (témoignages oraux et archives). La CLPA permet aussi de recenser les ouvrages de protection déjà construits. C'est un document technique lié à l'aménagement, réservés à l'usage des professionnels, et qui n'est donc pas adapté aux besoins des skieurs.

- Fichier: l'enquête permanente sur les avalanches (EPA) et l'observation permanente des avalanches (OPA) sont des fichiers informatisés d'information sur les avalanches. Depuis près d'un siècle, l'EPA recueille sur environ 5000 sites en France les principales données (météorologie, dimensions, etc.) concernant les avalanches. Depuis 1972, l'OPA est une procédure visant à collecter toutes les informations avalancheuses concernant une zone sensible, où en général un projet d'aménagement est en cours. Ce dernier fichier n'est plus enrichi aujourd'hui.
- Archives: de nombreux renseignements sur des avalanches catastrophiques survenues dans le passé, dont l'analyse reste primordiale pour les études de risques, existent entre autres dans les archives (nationales, départementales, paroissiales,

^{6.} IGN: Institut Géographique National.

^{7.} RTM: Restauration des Terrains en Montagne.

 $^{8.\} Il$ couvrait plus de $700\,000$ hectares des zones montagneuses françaises en 82 cartes dressées à une échelle du $1:20\,000$ ou du $1:25\,000$ pour les plus récentes.

fiscales, etc.) et les monographies régionales et locales.

Utilisation de modèles

Les modèles sont des outils d'analyse permettant de rendre compte des phénomènes naturels. Pour caractériser quantitativement un écoulement, il existe plusieurs procédés :

- les modèles numériques sont des outils puissants, qui simulent l'écoulement avalancheux. Ce sont en général des logiciels basés sur la résolution d'équations du mouvement à partir d'une loi de comportement de la neige, d'un modèle numérique de terrain (MNT ou carte numérisée) et des conditions nivologiques: ils sont donc capables d'estimer les vitesses et les hauteurs d'écoulement ainsi que l'emprise d'une avalanche. Le modèle le plus célèbre et parmi les plus anciens est dû à Voellmy au début des années cinquante, il est encore couramment utilisé en génie paravalanche (sous des formes dérivées mais basées sur le même principe). Des modélisations plus sophistiquées d'avalanches coulantes ou en aérosol sont en cours de validation [10, 11, 12, 13, 14]. Les recherches actuelles butent essentiellement sur la détermination de la (les) loi(s) de comportement de la neige en mouvement [10];
- les modèles statistiques sont des méthodes de prédiction des distances d'arrêt des avalanches, qui sont fondées sur des règles statistiques [15, 16, 17];
- les systèmes symboliques sont des logiciels qui proposent une évaluation du risque en adoptant le raisonnement déductif d'un expert. Ils sont construits à partir d'une base de connaissances et de règles de raisonnement (moteur d'inférence) qui gèrent cette base en fonction des informations transmises par l'utilisateur [18, 19, 20];
- les modèles réduits sont des simulations d'écoulement sur des maquettes (en général en laboratoire). On distingue les modèles analogiques des modèles en similitude physique. Un modèle analogique consiste à simuler un phénomène en créant des écoulements qui ressemblent aux écoulements naturels. Par exemple, on peut simuler une avalanche en aérosol par l'écoulement d'une quantité de matière solide (comme de l'argile) dans une cuve d'eau [21]: un nuage de poussière se développe et progresse en rappelant fortement un aérosol. Un modèle est dit en similitude physique avec un écoulement naturel, lorsqu'on peut garantir que, malgré la réduction d'échelle, le comportement mécanique est identique. Il existe encore de nombreux problèmes théoriques pour faire le lien entre avalanches naturelles et celles simulées en laboratoire.

Tous ces modèles sont limités dans la qualité (vraisemblance, étendue et type des résultats) et la précision de leurs résultats. Récemment, des modèles hybrides ont été développés pour pallier les insuffisances des premiers logiciels. Ainsi, NX-LOG développé à l'IFENA (Institut Fédéral d'Étude de la Neige et des Avalanches) couple à la fois un modèle à base de connaissances (déductif) et un modèle par analogie [22], tandis qu'ELSA, élaboré au Cemagref, est un système à base de connaissances reliable à des modèles numériques. Le but visé par chacun des deux prototypes est sensiblement différent puisque le premier donne un diagnostic du risque sur un site (comme une station de ski) pour un contexte météorologique donné, alors que le second est plus particulièrement axé sur la modélisation de la mise en mouvement de la neige dans la zone d'accumulation et de l'écoulement (pour un scénario donné). Certains modèles fonctionnent aussi bien pour l'analyse spatiale du risque d'avalanches que pour la prévision.

6.1.4 Prévision du risque d'avalanches sur un massif

En France⁹, la prévision du risque d'avalanches se fait à plusieurs niveaux:

- à l'échelle nationale, les services de Météo-France en sont responsables et ils proposent au public un bulletin d'estimation du risque d'avalanches (BRA) de la midécembre au début du mois de mai. Son principe est précisé dans le chapitre suivant;
- à un niveau local, certains services (comme dans les stations de ski) ont besoin de prévoir de manière plus fine et quotidiennement le risque d'avalanches sur leur domaine: par exemple, c'est le travail réalisé par le réseau Prévision locale du risque d'avalanche (PRELA) entre les 4 grandes stations de Tarentaise (Tignes, Val-d'Isère, les Arcs, La Plagne) et le CEN [24, 25]. On peut également citer le développement de modèles statistiques à base de connaissance, qui permettent d'établir un diagnostic à partir de la connaissances des événements nivométéorologiques passés sur un site donné. Citons notamment: Avalog et NX-LOG [18, 22, 26, 27, 28] ainsi qu'Astral [29] (voir chap. 7);
- au niveau individuel, on peut procéder à une estimation à partir des connaissances nivo-météorologiques; certaines méthodes peuvent également aider au diagnostic (voir § 6.2 et chap. 10).

Principe de réalisation du BRA

Ce bulletin donne des indications sur l'état du manteau neigeux en fonction de l'altitude, de l'exposition, du relief et propose une estimation du risque d'avalanche à l'échelle d'un même massif montagneux (cf. aussi chap. 8). Pour chaque massif, il est élaboré par le centre départemental de Météo-France en liaison avec le Centre d'Études de la Neige et les « point focaux » de Saint-Martin-d'Hères (pour les Alpes et la Corse) et de Tarbes (pour les Pyrénées) [30, 31, 32].

→ La réalisation d'un BRA tient compte de l'observation biquotidienne des 140 postes d'observation nivo-météorologique (en 1994) et des données complémentaires fournies par des stations automatiques. Hebdomadairement sont réalisés des sondages par battage par chaque poste. Les informations sont ensuite transmises à chacun des centres départementaux concernés (Chamonix, Bourg-Saint-Maurice, Saint-Martin-d'Hères, Briançon, Nice, Perpignan, Toulouse, Tarbes, Ajaccio). Le CEN centralise toutes ces données pour constituer une base de données nivo-météorologiques et coordonne la prévision du risque d'avalanche (PRA); les deux points focaux (Grenoble et Tarbes) sont, entre autres, les intermédiaires privilégiés avec les médias lors des périodes de crise. Parallèlement à cette structure se sont développés localement des centres de prévision du risque d'avalanche dépendant du service des pistes de certaines stations de ski (comme La Plagne, Tignes, Val-d'Isère, et l'Alpe-d'Huez) qui permettent d'adapter et de diffuser une information plus précise de l'état du couvert neigeux en dehors des pistes balisées de leur domaine [30, 31].

Informations du BRA

Le bulletin Avalanche donne une information synthétique valable à l'échelle d'un massif en indiquant les conditions météorologiques, la structure du manteau neigeux et son évolution probable. Afin de résumer la situation, une échelle du risque est proposée; elle

^{9.} Pour la Suisse, voir [23].

comporte cinq niveaux ordonnés suivant l'importance du risque: faible (1), limité (2), marqué (3), fort (4), très fort (5). Cette échelle est depuis l'hiver 1993-94 utilisée sur l'ensemble du continent européen et remplace en France l'ancienne échelle comportant huit niveaux.

Perspectives dans l'élaboration du BRA

Après l'informatisation des moyens d'acquisition, de traitement et de diffusion de l'information, Météo-France a commencé à développer des outils performants de modélisation numérique du manteau neigeux pour la prévision du risque d'avalanches. À l'heure actuelle, les modèles comme Safran, Crocus et Mepra sont en cours de validation et constitueront dans un avenir proche une aide précieuse pour le prévisionniste [34].

6.1.5 Moyens d'investigation sur le terrain

Il existe un certain nombre de techniques pour mesurer *in situ* les propriétés d'un manteau neigeux et les intégrer dans une estimation d'un risque d'avalanche. Ces techniques nécessitent le plus souvent des mesures et une interprétation des données; elles ne se prêtent donc guère à une utilisation pratique par les skieurs, exception faite des essais de glissement (le prochain paragraphe traitera plus particulièrement cette question). Dans ce paragraphe, seront abordées les techniques fondées sur

- les profils de battage;
- les mesures de cisaillement;
- les essais de glissement (coin suisse, bloc norvégien);
- les tests (emploi d'explosifs).

Sondages stratigraphique et par battage

Au chap. 4, nous avons vu comment l'analyse du sondage par battage permet de se faire une idée du manteau neigeux; leur interprétation peut, en outre, servir à évaluer la stabilité du manteau neigeux par exemple dans le cadre du BRA. Cette analyse repose sur la recherche des couches particulières (couche de faible cohésion, croûte de regel, etc.) et l'examen des grains de neige. Sur le terrain, une analyse stratigraphique est un moyen pratique d'examen de la structure du couvert neigeux en individualisant les différentes strates (dureté, type de grain, humidité). Si dans bien des cas ce sondage aide à établir un diagnostic, son analyse peut se révéler subjective dans les cas critiques (chutes de neige récentes, détection des couches fragiles minces par exemple) et dans tous les cas nécessite une solide expérience.

Cadre de cisaillement ; scissomètre ; indice de stabilité

La mesure de la résistance au cisaillement se fait à l'aide d'instruments spécifiques: le cadre de cisaillement et le scissomètre. Le scissomètre est le plus utilisé en France (voir chap. 4): il consiste à mesurer le couple exercé par la neige sur une tige munie de quatre ailettes (en général). D'emploi rapide et simple, il est particulièrement adapté à la mesure de la résistance au cisaillement au sein d'une couche homogène d'épaisseur suffisante (plusieurs centimètres) [26, 35, 36]. Lorsque l'épaisseur de la couche est faible (de l'ordre du cm ou du mm), il est nécessaire d'utiliser un cadre de cisaillement: cet appareil est généralement composé d'un cadre rigide muni de peignes [37, 38, 39, 40, 41, 42, 43]. De plus contrairement au scissomètre, une surcharge normale peut être appliquée

(manuellement). Pour les deux appareils, on mesure la force ou le couple provoquant la rupture de l'échantillon et on en déduit la contrainte maximale, appelée résistance au cisaillement.

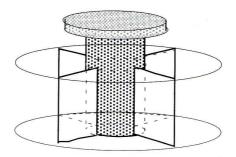


Figure 6.3 Scissomètre. La rotation des pales de l'arbre crée une surface de cisaillement de forme cylindrique. On mesure le couple de frottement exercé par l'échantillon à la rupture pour déduire la résistance au cisaillement.

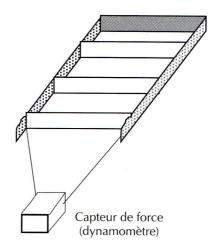


Figure 6.4 Le cadre de cisaillement est composé d'un cadre rigide maintenant des peignes. On tire, tout en mesurant la force nécessaire à l'aide d'un dynamomètre, sur le cadre placé le long de la couche dont on souhaite étudier les propriétés. On peut mesurer la force de rupture pour différente charge normale; pour cela il suffit de placer différentes charges de neige dans les espaces entre les peignes. La surface de cisaillement est généralement comprise entre 100 et 500 cm².

On peut à partir de la valeur de la résistance au cisaillement calculer un indice de stabilité, dont la définition varie selon les auteurs [37, 38, 39, 40, 41, 42]. Généralement, on définit cet indice comme le rapport de la charge normale (exercée sur la couche) sur sa résistance au cisaillement. Lorsque l'indice dépasse une valeur critique (qui dépend des auteurs, voir pour une synthèse [42]), on peut suspecter l'instabilité de la couche.

Essais de glissement : coin suisse et bloc norvégien

Les essais de glissement sont des méthodes qui, à partir d'un essai de glissement d'un bloc de neige prédécoupé puis mis sous charge, permettent d'arriver à estimer un degré de risque. En France, selon un usage d'origine obscure, il est devenu habituel de distinguer, selon la forme du bloc, le coin suisse et le bloc norvégien:

– le coin suisse est une méthode d'évaluation du risque testée par l'armée suisse, puis popularisée entre autres par le guide W. Munter qui l'a largement éprouvée

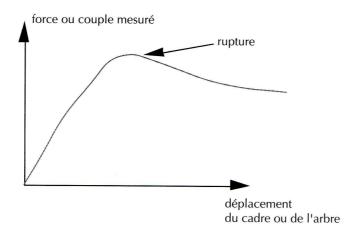


Figure 6.5 La détermination de la résistance au cisaillement se fait en mesurant la force (ou le couple) à la rupture. Généralement, la rupture se traduit dans un diagramme force-déplacement (ou couple-rotation) du cadre par l'existence d'un maximum. Le passage de la valeur de la force maximale à la valeur de la résistance fait généralement appel à des facteurs de correction, qui varient selon les auteurs.

 $[44,\,45,\,46,\,47].$ Le bloc prédécoupé a la forme d'un triangle équilatéral de surface 3 m^2 ;

– le bloc norvégien est une variante de la méthode précédente. La seule différence réside dans la réalisation d'un bloc au lieu d'un prisme. La surface de base est toujours de $3~{\rm m}^2$.

La première étape consiste à choisir le lieu du test, qui doit être représentatif de la pente que l'on souhaite traverser, c'est-à-dire qu'il faut respecter l'orientation et l'altitude. Il est toujours possible d'extrapoler le résultat si les inclinaisons ne sont pas identiques; cependant, il est vivement recommandé d'effectuer l'essai sur des pentes de déclivité supérieure à 30°. En outre, pour des raisons évidentes de sécurité, il faut faire le test dans un endroit non exposé: lieu isolé ou protégé, haut de pente, etc.

La seconde étape est classique et identique pour les deux méthodes énoncées: on creuse une tranchée verticalement jusqu'au sol sur environ 3 mètres de long; si l'on est pressé par le temps, on se limitera à une hauteur approximativement égale à 1,50 m. À partir de là, on peut effectuer un profil stratigraphique.

Dans un troisième temps, si l'on souhaite faire un coin suisse, on délimite un triangle isocèle de base et de hauteur égales (toutes deux) à 2,5 m de telle sorte que sa surface soit égale à 3 m². Dans le cas d'un bloc norvégien, la surface à découper est de forme rectangulaire ou légèrement trapézoïdale ; l'aire est toujours de 3 m² (voir figure 6.7, bloc norvégien). Ces mesures doivent être scrupuleusement respectées car l'essai est normalisé pour que l'on puisse comparer les tests entre eux.

Pour un coin suisse, au niveau de la tranchée, on plante deux sondes à avalanche le plus profondément possible en les espaçant de 2,5 m : ces deux piquets forment la base du coin. On la divise en deux parties égales et on enfonce une troisième sonde 2,5 m plus haut qui sera le sommet du coin. On prendra soin de la pencher vers l'amont pour faciliter la pénétration de la corde dans le manteau. D'autres types de découpe sont possibles et plus rapides. Pour le bloc norvégien, l'étape de découpe est bien plus courte et ne nécessite qu'un seul opérateur (voir § 6.2.1).

Ensuite, on isole le coin ou le bloc du reste du manteau en sciant à l'aide d'une cordelette (10 m de long, 3 mm de diamètre suffisent). Il faut bien prendre garde à élargir progressivement la base du coin afin d'éviter tout coincement du prisme sur ses flancs. À

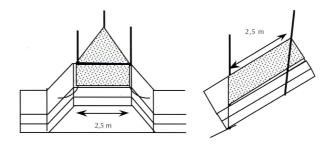


Figure 6.6 Dimension d'un coin suisse. D'après [45].

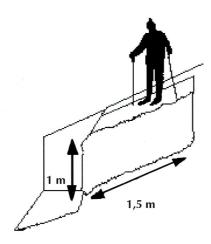


Figure 6.7 Dimension d'un blox norvégien. D'après [48].

la fin de l'opération, le coin n'est plus relié au manteau que par sa surface inférieure et il ne tient en équilibre que grâce aux frottements entre couches. La dernière étape consiste à charger le coin. Un opérateur remonte, skis aux pieds, en prenant soin de ne pas effleurer le prisme, pénètre délicatement:

- pour le coin suisse, à hauteur du centre de gravité, c'est-à-dire à environ 80 cm de la base,
- pour le bloc norvégien aux 2/3 de la hauteur, c'est-à-dire à environ 1 m de la base.

Si les skis dépassent de part et d'autre du coin (ou du bloc), cela n'a pas d'importance pour la suite des opérations. Le skieur charge progressivement le prisme en effectuant des flexions puis des sauts (4 fois de suite). On a alors une évaluation de la probabilité de déclenchement comportant sept indices.

Degré de charge	Déclenchement	Conclusion
a: spontané	lors du sciage	ne pas traverser
b : charge partielle	lors de la mise en place du skieur	ne pas traverser
c: charge totale	lorsque le skieur est en place	ne pas traverser
d: flexion	lors de flexions énergétiques	à éviter
e: saut	lors de petits sauts	prendre des précautions
f: saut depuis le haut	lors de sauts (à pied) depuis le haut	solide
g: pas de rupture	rien ne se passe	très sûr

 \hookrightarrow Les risques moyens et forts (d et e), une subdivision peut être employée pour une évaluation plus fine (mais dans la majorité des cas, l'incertitude liée

à la mesure du risque rend illusoire une telle précision): par exemple un risque indexé d.2 indique qu'il a fallu 2 flexions pour aboutir à la rupture du coin glissant.

Les trois premiers niveaux correspondent à un manteau instable qu'il ne faut pas traverser. Les indices d et e correspondent à une situation critique: pour le niveau d, le parcours d'une pente ne doit se faire que s'il n'existe pas d'autres échappatoires possibles et moyennant d'importantes mesures de sécurité; le niveau e est représentatif d'un manteau suspect et nécessite des précautions (choix de l'itinéraire, distance de délestage, etc.) car le risque accidentel est encore élevé. Les niveaux f et g indiquent un manteau stable à très stable dont le parcours ne doit a priori présenter que très peu de risque.

Précisions et limites des essais de glissement

Les essais de glissement sont des tests dynamiques qui permettent de proposer un indice de stabilité du manteau neigeux soumis à une charge et de déceler les surfaces de glissement potentielles. L'opérateur, durant la mise en charge du coin ou du bloc, joue à la fois sur l'intensité de la sollicitation transmise au manteau neigeux et sur la vitesse de déformation imposée, car la résistance est plus vite atteinte pour des charges et des vitesses de déformations importantes. À cet égard, comparé à une flexion, un saut à skis provoque à la fois une charge plus élevée mais surtout une déformation brusque du manteau. Étant donné la variabilité des caractéristiques du manteau neigeux sur une même pente, on peut se demander si un seul test est suffisant à estimer le degré de stabilité sur une pente. Pour y répondre, les canadiens Jamieson et Johnston ont réalisé 6 séries d'expériences (267 tests en tout) sur des pentes uniformes et ont recherché la distribution des indices obtenus autour de la valeur médiane de chaque série. Comme l'indique la figure 8, il y a 67 % de chances que l'indice d'un test coïncide avec la valeur médiane de la série et 97 % de chances qu'il soit compris dans un intervalle [-1, +1]autour de cette valeur médiane. De tels chiffres cautionnent la pertinence de la méthode pour le randonneur, mais soulignent également l'utilité de méthodes annexes d'analyse, en tout cas d'une réflexion poussée.

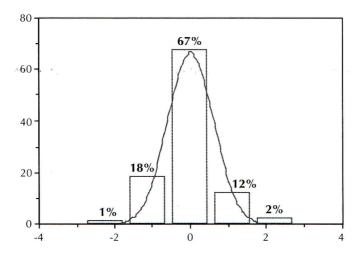


Figure 6.8 Distribution moyenne des déviations observées des indices d'une série autour de la valeur moyenne. L'histogramme indique les valeurs expérimentales et la courbe en trait continu la loi de Gauss associée.

Pour être fiable, cette relation ne doit pas s'appuyer sur un seul test mais au moins sur une dizaine d'essais distribués sur toutes les expositions (pour une altitude et une

déclivité sensiblement égales pour chacun d'eux). Par ailleurs, l'utilisation de l'échelle subdivisée permettrait de peaufiner encore cette évaluation de l'activité avalancheuse probable lors de risques accidentels:

Degré du coin	Désignation abrégée	Situation avalancheuse
3–4 sauts sur place	d.3, d.4	pente de stabilité suffisante
1–2 sauts sur place	d.1, d.2	pente de stabilité moyenne
3–4 flexions sur place	e.3, e.4	pente de faible stabilité
1–2 flexions sur place	e.1, e.2	pente à la limite de la stabilité

Les essais de glissement ne permettent pas déceler de manière systématique un risque d'avalanche, entre autres car :

- son efficacité est moindre pour des neiges humides, pour lesquelles le glissement entre strates n'est pas nécessairement le mécanisme prépondérant de déclenchement;
- si les skis de l'opérateur s'approchent trop de la surface potentielle de rupture (moins de 5 cm) durant la mise en charge du bloc, le test n'est pas concluant;
- − les surfaces de rupture sous-jacentes à des couches de faible charge (moins de 0,4 kPa) ne peuvent être testées de manière fiable par un essai de bloc glissant. Il faut donc une épaisseur minimale (e) de déclenchement pour que l'essai soit pertinent : on doit avoir $\rho e \geq 40 \text{ kg/m}^2$ avec ρ la masse volumique de la couche déclenchée ; soit avec une masse volumique de 100 kg/m³, il faut que $e \geq 40$ cm tandis que pour une neige de 200 kg/m³, il faut que $e \geq 20$ cm ;
- les essais de bloc glissant font la part belle au glissement ¹⁰ (donc à la résistance au cisaillement entre strates) comme mécanisme du déclenchement des avalanches, ce n'est pas une règle générale (voir chap. 5).
- la procédure de mise en charge du 6° degré (saut à pied) n'est pas adaptée, car dans le cas de neige pulvérulente, les chaussures pénètrent trop profondément. Jamieson propose de se placer skis aux pieds à 35 cm du bord amont du bloc et de sauter sur place pour causer un incrément de charge suffisant par rapport au degré 5 [46].

Un autre problème est de savoir s'il est possible d'extrapoler à d'autres déclivités les résultats d'un essai de glissement effectué pour une pente donnée. Une telle extrapolation doit être conduite avec prudence : l'influence d'un changement d'exposition, d'altitude, de déclivité ou encore de configuration de terrain n'est pas facile à déterminer. Néanmoins, il est admis que l'indice de risque diminue d'un degré par tranche de 5° (selon [45]) à 10° (selon [46]) supplémentaire de déclivité. Ainsi, un risque évalué à e.2 pour une pente de 30° passe à d.2 pour une pente de 35° (ou 40°) et f pour une pente de 25° (ou 20°).

Emploi d'explosifs

Les explosifs (comme le sofranex) sont de manière générale utilisés pour des applications bien spécifiques et réglementées (sécurité des pistes, PIDA ¹¹, etc.) et surtout à titre de prévention [49, 50, 51]. Néanmoins, ils peuvent constituer un moyen d'estimer à distance la stabilité d'une pente: par exemple, l'explosion de 5 kg de sofranex (située à

^{10.} Comme les méthodes de glissement donnent en principe accès à la mesure d'une résistance au cisaillement, un parallèle peut être tracé avec les essais de cisaillement. Voir Jamieson ([42], p. 107) pour une comparaison entre indice de stabilité, essai de glissement et sondage stratigraphique (test manuel).

^{11.} Plan d'Intervention pour le Déclenchement des Avalanches : c'est un document officiel établissant les procédures à respecter lors d'un déclenchement artificiel. Y sont indiquées les zones d'extension des avalanches, la mise en œuvre des explosifs (charge, lieu, acheminement, consignes de tir) et les personnes impliquées dans sa réalisation. Voir aussi chap. 8.

2 m au-dessus de la neige) provoquant une surpression d'au moins 25 mB pour un rayon d'action d'environ 30 m ébranle fortement le manteau neigeux. Si un tir positif témoigne a posteriori du danger existant, un tir négatif n'écarte en revanche pas l'existence d'un risque, soit parce que le tir a contribué à déstabiliser le manteau sans pourtant avoir réussi à l'amener à la rupture, soit parce que la charge a été insuffisante ou de peu d'efficacité (trop près de la surface neigeuse, faible zone d'action) soit encore parce que la neige est trop humide (l'explosif n'a alors quasiment aucun effet).

6.2 Diagnostic du risque sur le terrain

Il est agréable pour le skieur ou le randonneur de disposer de méthodes d'évaluation du risque local d'avalanches, qui soient faciles à mettre en ouvre et ne nécessitent pas d'instrumentation particulière ni d'interprétation trop complexe (pas de calculs!). Le gain en simplicité et en souplesse se traduit, en contrepartie, par une diminution de la qualité de l'information et surtout nécessite une certaine pratique de la part de l'utilisateur. On renvoie également le lecteur au chap. 10.

6.2.1 Examen du manteau: principes

Moyens

Le skieur a trois méthodes différentes à sa disposition pour évaluer le risque d'avalanches sur le terrain.

- Le profil stratigraphique permet d'appréhender la structure du manteau neigeux (cf. chap. 4). Le temps de réalisation d'une fosse varie selon la neige rencontrée; une dizaine de minutes pour effectuer un profil est une valeur indicative. Cette méthode est très simple et ne nécessite qu'un seul opérateur, mais outre le fait qu'elle est statique (elle ne permet pas de quantifier la charge supportable par le manteau neigeux), elle réclame de l'expérience lors de l'interprétation du profil en termes de stabilité. Néanmoins quelques configurations doivent retenir l'attention du skieur lors de ces essais et on les examine dans les sections suivantes.
- L'essai de glissement (coin suisse ou bloc norvégien) permet de répondre quantitativement: « Sous quelle charge le manteau neigeux est-il stable? ». Il s'agit d'un test dynamique. Le temps de réalisation varie, selon les types de neige rencontrés, entre 10 et 30 minutes avec deux opérateurs, ce qui peut sembler rédhibitoire à la plupart des pratiquants. Des variantes ont été proposées pour pallier cet inconvénient.
- Le test de la pelle permet de déterminer la surface de glissement potentiel au sein du manteau neigeux (voir chap. 4, § 4.2.2). C'est un moyen rapide mais sommaire, très en vogue en Amérique du Nord. Il en existe plusieurs variantes.

Variantes des blocs de glissement

Les canadiens Jamieson et Johnston ont recherché et testé des variantes des essais de glissement pour les rendre plus pratiques et faciles à réaliser [42, 43, 44, 45, 46]. La première étape, commune à toutes ces variantes consiste à creuser à la pelle une tranchée d'environ 1,5 m de profondeur et de 2,5 mètres de long. L'étape suivante consiste à découper le bloc à l'aide de skis, d'une pelle (1,3 m de long, 3 mm d'épaisseur), d'une scie ou d'une cordelette (8 mètres, diamètre en 4 et 6 mm, nouée tous les 30 cm). L'utilisation de la corde nécessite deux opérateurs. La forme du bloc doit être légèrement trapézoïdale afin de faciliter le glissement (sinon de la neige peut tomber dans les interstices latéraux

et freiner le mouvement du bloc): base aval de 2,1 m de longueur, base amont de 1,9 m de longueur, hauteur du trapèze égale à 1,5 m. La dernière étape consiste à charger graduellement le bloc, comme il est indiqué au § 6.1.5. Attention, pour être efficace, le skieur doit se positionner tout en haut du bloc lors de la mise en charge (voir figure 6.7). Pour la dernière étape, il peut être avantageux de remplacer le saut à pied par un saut à skis (le skieur est à 35 cm de l'arête amont du bloc). C'est la deuxième étape qui est prépondérante dans le temps de réalisation comme l'indique le tableau suivant (temps indicatif de réalisation d'un essai complet avec deux opérateurs entraînés) [42, 43, 44, 45, 46].

Outils utilisés pour:			Temps
Mur aval	Côtés	Mur amont	requis (min)
pelle	pelle	corde/ski	10
pelle	corde	corde	9
pelle	ski	ski	5
pelle	scie	scie	5

La scie donne les meilleurs temps, mais son emploi impose de transporter un outil lourd (au moins 1,2 kg) et encombrant. L'utilisation du talon des skis offre un bon compromis, mais la profondeur du bloc est limitée par les fixations dés que la neige présente une certaine cohésion (une soixantaine de centimètres).

6.2.2 Les questions que vous vous posez

• Quelle confiance accorder à l'indice donné par un seul essai? Une étude statistique montre que même sur une pente à peu prés uniforme, le résultat du bloc glissant est variable, toutefois cette variation est limitée autour d'une valeur médiane : ainsi, il y a 67 % de chances que le test indique cette valeur moyenne, et 97 % que l'indice de risque trouvé soit compris dans un intervalle de plus ou moins 1 autour de la valeur médiane [42, 43, 44, 45, 46] (voir § 6.1.5). En effectuant un seul essai, on a donc 97 %, de chances de tomber sur l'indice moyen du risque d'avalanche pour une pente donnée en se contentant d'un intervalle de confiance de ± 1 . Cette marge de sécurité assez large a en revanche le défaut de rendre assez floue la conclusion autour des indices d et e, et ne facilite guère la décision. De manière grossière, on peut résumer cette prise de décision à trois choix (en allant dans le sens de la sécurité):

Indice donné par un test	Déclenchement	Conclusion
a-d	lors de la mise en place du	renoncer
	coin ou par simple surcharge	
$e ext{-}f$	lors de sauts à ski ou à pied	passage possible, prendre
		des précautions si besoin est
$\underline{}$	rien ne se passe	« sûr »

• Quand doit-on pratiquer le test?

Étant donné le temps nécessaire à la réalisation d'un test (au moins dix minutes pour deux skieurs expérimentés), on ne peut ponctuer d'essais tout l'itinéraire. On réalise un tel test lorsque les conditions sont incertaines ou lorsqu'on a des doutes. Elle présente son intérêt lorsque tout un groupe est amené à skier dans un versant raide (plus de 30°). Pour des pentes de plus faible ampleur, il est plus avantageux de progresser un par un dans la pente. Certaines personnes concluent, à partir d'un seul coin suisse ou d'un bloc norvégien, quant à la stabilité du manteau neigeux sur un massif ou sur plusieurs jours, ce qui conduit à un dangereux excès de confiance, et parfois à des accidents.

• Peut-on se contenter d'un test de surface?

II est certain que l'on gagne du temps en se contentant d'une profondeur d'une cinquantaine de centimètres (au lieu de 1,5 m) lors de la réalisation d'un bloc glissant. De plus, un grand nombre de plaques déclenchées accidentellement par des skieurs ont des épaisseurs inférieures à 60 cm. Ce raisonnement est vrai dans bien des cas, mais peut conduire à de graves erreurs d'appréciation: une stabilité moyenne des couches superficielles peut cacher une instabilité marquée des couches en profondeur.

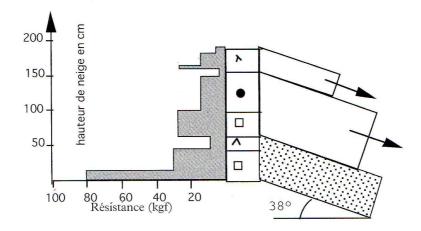


Figure 6.9 Profil simplifié de l'accident de la face nord du Staldenhorn du 6 février 1990 (voir récit chap. 9, § 9.3.2). Le premier décrochement a affecté les 30 premiers centimètres (neige fraîche soufflée); la surface de glissement est constitué par la surface supérieure de l'épaisse couche de grains fins sous-jacente. Le décrochement secondaire a affecté cette couche de grains fins (50 cm d'épaisseur) et une couche de faces planes (environ 40 cm); le glissement s'est effectué à la limite des couches faces planes/gobelets. Un essai de coin suisse indique que la première rupture a lieu après deux sauts (indice de risque e.2) et la deuxième après un troisième saut (indice e.3). Un test de surface ne permet de détecter que la première instabilité [52].

• Toutes les variantes sont-elles équivalentes?

Elles le sont en principe à condition de bien respecter le protocole de mise en charge et les dimensions du coin ou du bloc (surface de 3 m²) [42, 43, 44, 45, 46].

• Existe-t-il des conditions de neige limitant l'utilisation du bloc glissant?

L'indice de risque peut être erroné si les skis traversent ou s'approchent trop (moins de 5 cm) de la surface de glissement. Par ailleurs si la couche déclenchée a une épaisseur trop faible, la conclusion doit être regardée avec suspicion: il faut que l'épaisseur de la couche (mesurée perpendiculairement à la pente) soit suffisante [42, 43, 44, 45, 46]. Ainsi, pour de la neige fraîche à 100 kg/m³, il faut une épaisseur déclenchée supérieure à 40 cm. Sur le terrain, le skieur ne peut qu'apprécier la masse volumique et si l'essai provoque le glissement d'une couche d'épaisseur moyenne (moins de 20 cm), le skieur doit se poser des questions sur la validité du test. Dans le cas de neige humide, le test n'est pas valable.

• Le choix du lieu clé test a-t-il beaucoup d'influence sur le résultat?

Oui, il doit être représentatif de la pente où l'on compte progresser tout en n'exposant pas les opérateurs aux avalanches (voir récit chapitre 10, §3.2.6). Il doit être loin (au moins dix mètres) de tout obstacle (rocher, arbre, dépression, etc.) ou trace de ski. Une pente est rarement un plan uniforme, elle présente souvent des dépressions (combe, thalweg, etc.) et des dos (croupe, arête large).

\bullet Un essai positif (degré f ou g) est-il suffisant pour écarter tout risque d'avalanches?

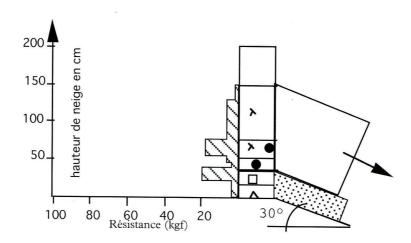


Figure 6.10 Profil simplifié du manteau neigeux à la fracture près du Tschingellochtighorn (2658 m, Adelboden, Suisse). Le 5 mars 89, le BRA annonce un risque local fort. Un couple entreprend une course dans un versant ouest, comme le bulletin le recommande. A la montée, il suit sans problème une croupe jusqu'au sommet. A la descente, il attaque sur la croupe prise à la montée, puis apercevant un skieur seul dans la combe voisine, visiblement en poudreuse, il s'engage dans cette combe vers 2550 m. Une avalanche se déclenche aussitôt et l'emporte (1 mort). Un essai de coin glissant in situ (réalisé le lendemain à l'endroit de la rupture) donne un indice de risque c. Dans la combe la neige transportée par le vent (du sud) s'était accumulée les jours précédents. Le manteau résiste au passage d'un skieur, mais pas de deux. Sans doute, s'ils étaient redescendus par l'itinéraire de montée sur la croupe (plus dégarnie), rien ne se serait passé [52].

Un essai de bloc glissant permet de déduire le(s) plan(s) de glissement potentiel d'une avalanche. On déduit la stabilité à partir du glissement de couche(s) de neige soumises) à une charge donnée. Cette méthode est efficace pour la majorité des avalanches concernant des skieurs (c'est-à-dire déclenchées par eux) et mobilisant de la neige sèche; elle n'est pas absolument fiable, même lorsque l'on peut conclure à une bonne stabilité car les mécanismes du déclenchement ne se résument pas uniquement au glissement de strates; ce n'est pas la seule raison qui explique l'imperfection de la méthode, voir les exemples de déclenchement à distance (par des skieurs) donnés aux chapitres 5 et 10.

• Doit-on réaliser des essais uniquement sur des pentes de déclivité supérieure à 30°?

Non, on peut réaliser des essais pour des déclivités supérieures à 20°; néanmoins, pour des pentes comprises entre 20° et 30°, la rupture est rapidement amortie par le frottement et le glissement est à peine perceptible. Il faut donc qu'un opérateur observe la tranche aval du bloc pour déceler un déplacement éventuel (de l'ordre du cm) [42, 43, 44, 45, 46].

• Comment extrapoler le résultat concernant une pente à une autre?

On considère qu'une augmentation de 10° de la pente (5° chez Munter, mais cela semble exagéré) provoque une diminution d'un degré de l'indice de risque. La pente doit conserver les mêmes caractéristiques (se méfier entre autres des changements de pente, des zones de suraccumulation, etc.).

• Peut-on à partir d'un profil stratigraphique (avec un essai manuel de dureté) déterminer les surfaces de glissement?

Il existe des cas d'école, comme une couche de neige fraîche glissant sur une croûte de regel. Mais la surface de glissement potentiel n'est pas toujours décelable à partir d'un sondage par battage ou d'un profil stratigraphique, car elle peut se constituer soit sur une couche mince peu perceptible, soit à l'intérieur d'une couche (de dureté hétérogène).

Quelquefois, la surface indiquée par le bloc glissant n'est pas celle de l'avalanche.

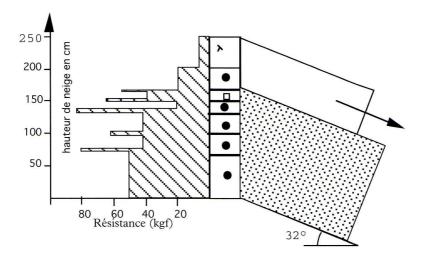


Figure 6.11 Profil simplifié du manteau neigeux à la fracture d'une avalanche accidentelle (provoquée par des skieurs à la descente) dans le versant sud-est du Las Set Rosas (2985 m) dans la région de Samedan (Suisse). Les croûtes de regel dans le sondage stratigraphique sont indiquées en trait gras. Le plan de glissement est constitué par la dernière croûte de regel. Un essai de coin suisse a donné un indice d (réalisé le lendemain de l'accident, vers 2780 m) [52].

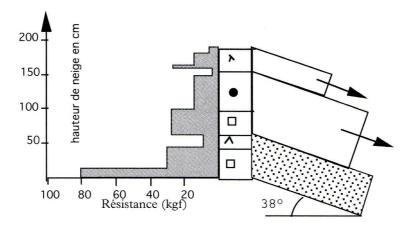


Figure 6.12 Profil simplifié du manteau neigeux lors de l'accident du Piz Ucello, région de San Bernadino (Suisse) le 5 février 1990 (voir récit $\S 3.3.2$). Le coin suisse donne un indice de risque d et la surface de glissement est l'interface entre la couche de neige fraîche et la première couche de grains fins. La surface de glissement de l'avalanche est une dizaine de centimètres au-dessous (interface gobelets/grains fins) [52].

• Peut-on à partir d'un test manuel de dureté déduire le degré de risque?

Non, la dureté ou une bonne cohésion n'est pas nécessairement synonyme de stabilité du manteau. Pour preuve examinons les deux profils suivants: le premier, de bonne allure générale, a pourtant cédé lors d'un essai de coin suisse par simple flexion du skieur (degré d) tandis que le second, d'allure plus fragile et constitué essentiellement de grains à faces planes, ne s'est rompu que sous des sauts à pied (degré g).

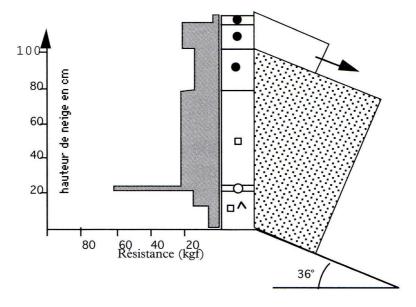


Figure 6.13 Profil simplifié et essai de coin suisse (degré d) le 28 novembre 92 au Radüner Rothorn (Suisse) à 2880 m d'altitude [52].

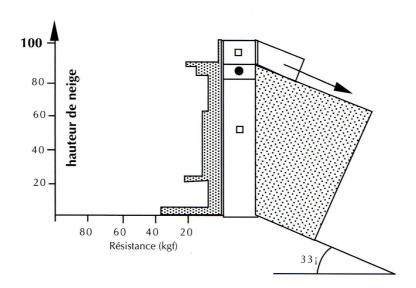


Figure 6.14 Profil simplifié et essai de coin suisse (degré g) le 07 janvier 1993 au-dessus de Parsenn (Suisse) à 2560 m [52].

6.2.3 Le test de la pelle et variantes

Le test de la pelle consiste à isoler une tranche du manteau neigeux de base carrée (la largeur est celle de la pelle, soit une trentaine de centimètres en moyenne), puis à la tirer vers soi ou à la charger pour détecter la présence de plan(s) de glissement potentiel(s). Ce n'est donc pas à proprement parler un test de stabilité.

On creuse tout d'abord une tranchée verticale large d'environ 1 mètre et profonde de 1 à 1,5 m. On en profite pour faire un sondage stratigraphique (grains, test de dureté, d'humidité). On forme ensuite une cheminée de base carrée en dégageant ses côtés latéraux. Le côté amont est découpé à l'aide d'une scie ou du talon d'un ski sur environ soixante-dix centimètres. On introduit avec précaution la pelle dans l'interstice ainsi créé

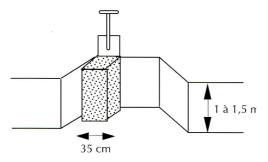


Figure 6.15 Dimensions du test de la pelle selon les normes américaines (voir aussi méthode de Faarlund, chap. 4, 4.2.2).

et on tire vers soi avec les deux mains le manche de la pelle. S'il y a un glissement significatif d'une couche le long d'une surface plane, on examine la surface et le type de grains. La plus ou moins grande résistance en tirant la pelle permet d'évaluer qualitativement la résistance au cisaillement, sans toutefois prétendre répondre à la question « jusqu'à quelle charge le manteau est-il stable? ». Une alternative consiste à placer la pelle sur le sommet de la cheminée, puis à appuyer dessus. La force nécessaire à la rupture est une indication de la résistance au cisaillement et de la charge supportable par le manteau neigeux [51].

En conclusion, on considère pour les deux tests que le manteau neigeux considéré comme stable si la neige est relativement dense et s'il n'y a pas de surface de rupture sur une profondeur de 70 cm.

Bibliographie

- [1] O. Pesnel et O. Marco (coord.): Aspects socio-économiques de la gestion des risques naturels (1992, Cemagref, Antony) 151 p.
- [2] C. Charlier: « Le risque en montagne, définir le risque: Le risque négocié », Comptes rendus « Séminaire Futur Antérieur » du 21 avril 1994, Paris.
- [3] R. Mathieu: « La trace inachevée », Neige et Avalanches 51 (1990) 8–12.
- [4] I. Bernard, P-P. Danna, J. Hermann, G. J. Martin, A. Rainaud, R. Romi, E. Valette et G. Zalma: La prévention des risques naturels, échec ou réussite des plans d'exposition aux risques? (1993, Société Française pour le Droit et l'Environnement et UNSA, Sophia Antipolis) 207 p.
- [5] C. Dourlens, J.P. Galland, J. Theys et P. A. Vidal-Naquet: Conquête de la sécurité, gestion des risques (1991, L'Harmattan, Paris) 300 p.
- [6] C. Restier-Melleray: « Experts et expertise scientifique, le cas de la France », Revue Française de Science Politique 40 (1990) 546–585.
- [7] G. Decrop et C. Charlier: De l'expertise scientifique au risque négocié: vers des scènes locales de risque?, Rapport (1995, Cemagref, Grenoble).
- [8] J. Saunier: Mission interministérielle d'étude sur la sécurité des stations de montagne, Rapport interministériel 1970.
- [9] G. Borrel: La carte de localisation probable des avalanches, Rapport interne (1993, Cemagref, Grenoble).
- [10] C. Ancey: « Modélisation des avalanches denses. Approches théorique et expérimentale », La Houille Blanche 4/5 (1994) 25–39.
- [11] O. Marco: Instrumentation d'un site avalancheux, Thèse de doctorat Université joseph Fourier (1994), (Cemagref, Paris, 1995) 220 p.
- [12] O. Marco: « Snow avalanches: classification and modelisation », Comptes rendus « Workshop on Rapid Gravitational Mass Movements », Grenoble, coordonné par L. Buisson (1993, Cemagref) 221–227.
- [13] F. Rapin: « The French theory for snow avalanches with aerosol », Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonné par G. Brugnot (1992, Cemagref) 353–362.
- [14] P. Gauer: « A model of powder snow avalanche », Comptes rendus « Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche », Chamonix, coordonné par F. Sivardière (1995, Cemagref) 55–61.
- [15] A. Ghali: « Estimation de la distance maximale d'arrêt des avalanches », Neige et Avalanches 68 (1994) 19–22.
- [16] H. Norem et S. Bakkehøi: « Estimation run-out distances for extreme snow avalanche », Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonné par G. Brugnot (1992, Cemagref) 183–191.

[17] K. Lied et Bakkehøi: « Empirical calculations of snow avalanche run-out distances based on topographic parameters », Journal of Glaciology 26 (1980) 165–177.

- [18] R. Bolognesi: « Avalog: un environnement d'aide à la décision en matière de prévision locale des risques d'avalanche », Symposium ANENA, Chamonix (1991, ANENA, Grenoble) 154–166.
- [19] L. Buisson et C. Charlier: « Avalanche modelling and integration of expert knowledge in the Elsa system », Comptes rendus « international workshop on rapid gravitational mass movements », Grenoble, coordonné par L. Buisson (1993, Cemagref) 49–58.
- [20] L. Buisson et C. Charlier: « Analyse de sites avalancheux: le système ELSA », Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonné par G. Brugnot (1992, Cemagref) 333–342.
- [21] P. Beghin, E. J. Hopfinger et R. Britter: « Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries », *Journal of Fluid Mechanics* **107** (1981) 407–422.
- [22] R. Bolognesi: « Premiers développements d'un modèle hybride pour le diagnostic spatial des risques d'avalanches », La Houille Blanche 8 (1993) 551–553.
- [23] W.J. Ammann: « Concept suisse pour la prévention du danger d'avalanches », Comptes rendus « Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche », Chamonix, coordonné par F. Sivardière (1995, Cemagref) 129–132.
- [24] C. Schneider, L. Navillod, L. Julliot: « Prévention locale du risque d'avalanche, application quotidienne de 3 grandes stations des Alpes », Symposium ANENA, Chamonix (1991, ANENA, Grenoble) 136–144.
- [25] C. Schneider: « Prévention locale du risque d'avalanches à La Plagne », Comptes rendus « Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche », Chamonix, coordonné par F. Sivardière (1995, Cemagref) 119–122.
- [26] H. P. Bader et B.Salm: « On the mechanics of snow slab release », Cold Regions Science and Technology 17 (1990) 287–300.
- [27] R. Bolognesi: « Expert systems, tool for avalanche forecasting », Comptes rendus Université d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonné par G. Brugnot (1992, Cemagref) 307–312.
- [28] J.M. Daultier: « Prévision locale du risque d'avalanches, Alpe d'Huez, domaine des Grandes Rousses », Comptes rendus « Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche », Chamonix, coordonné par F. Sivardière (1995, Cemagref) 139–143.
- [29] G. Guyomarch: « Que faut-il savoir sur Astral? », Neige et Avalanches 70 (1994) 21–25.
- [30] R. Pahaud, G. Brunot et E. Brun: « Organisation du risque d'avalanche en France », Comptes rendus Symposium ANENA, Chamonix, coordonné par ANENA (1991, ANENA, Grenoble) 50–56.
- [31] E. Brun, P. David et M. Sudul: « Prévision du risque d'avalanche », Neige et Avalanches 51 (1990) 17–20.
- [32] J. Villecrose: « La prévision départementale du risque d'avalanche; l'exemple de l'Isère », Comptes rendus « Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige et avalanche », Chamonix, coordonné par F. Sivardière (1995, Cemagref) 157–162.
- [33] J. Martzolf et E. Pahaut: « Attention... L'échelle de risque d'avalanche a changé », Neige et Avalanche **64** (1993) 11–13.
- [34] G. Giraud : « Modèle expert d'aide à la prévision du risque d'avalanche », Symposium ANENA, Chamonix (1991, ANENA, Grenoble) 248–254.
- [35] E. Brun et L. Rey: Bilan de la campagne de mesures mécaniques de la neige effectuées

sur le terrain durant l'hiver 1984-85, Rapport interne (1985, Centre d'Etude de la neige, n° 199).

- [36] R.I. Perla, T.M.H. Beck et T.T. Cheng: « The shear strengh index of alpine snow », Cold Region and Science Technology 6 (1982) 11–20.
- [37] A. Roch: Les déclenchements d'avalanche, Comptes rendus « Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanche », Davos (1965, International Association of Hydrological Sciences) 182–183.
- [38] A. Roch: Les variations de résistance de la neige, Comptes rendus « Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanche », Gentbrugge (1966, International Association of Hydrological Sciences) 182–195.
- [39] P.M. B. Föhn: « The stability index and various trigerring mechanisms », Comptes rendus Avalanche formation, movement and effects, Davos (1987, IAHS) 195–206.
- [40] R. I. Perla: « Slab avalanche measurements », Canadian Geotechnical Journal 14 (1977) 206–213.
- [41] J. B. Jamieson et C.D. Johnston: « Shear frame stability parameters for large-scale avalanche forecasting », *Annals of Glaciology* **18** (1993) 268–273.
- [42] B. Jamieson: Avalanche prediction for persistent slabs, Thèse de doctorat, University of Calgary, Department of Civil Engineering (1995).
- [43] R.I. Perla: « Experiences with shear frames », Journal of Glaciology 29 (1983) 485–491.
- [44] B. Salm: Guide pratique des avalanches (1983, CAS, Berne) 148 p.
- [45] W. Munter: Le risque d'avalanche (1992, Club Alpin Suisse, Berne) 200 p.
- [46] J.B. Jamieson et C.D. Johnston: « Rutschblock precision, technique variations and limitations », Journal of Glaciology 39 (1993) 666–674.
- [47] J. Schweizer, C. Camponovo, C. Fierz et P.M.B. Föhn: Skier triggered slab avalanche release some practical implications, Comptes rendus « Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche », Chamonix, coordonné par F. Sivardière (1995, Cemagref) 309–315.
- [48] C. Ancey: « Le bloc norvégien: un moyen complémentaire d'analyse du risque local d'avalanches », La Montagne & l'Alpinisme 96 (1996) 64.
- [49] H. Gubler: « Artificial release of avalanche », Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonné par G. Brugnot (1992, Cemagref) 379–407.
- [50] N. Maeno: « Rheological characteristics of snow flow », , Comptes rendus « international workshop on rapid gravitational mass movements », Grenoble, coordonné par L. Buisson (1993, Cemagref) 209–220.
- [51] D.M. Mc Clung et P.A. Schaerer: *The Avalanche Handbook* (1993, The Montaineers, Seattle) 271 p.
- [52] IFENA (SLF): Schnee und Lawinen in der Schweizern Alpen, Rapports **52** à **56** (1988-93, SLF, Davos).