

## Mesures et instrumentation

Robert Bolognesi<sup>1</sup>, Martin Zimmerli<sup>2</sup>

***Résumé.** La collecte de données apparaît comme une étape incontournable de la prévision des avalanches. Elle permet d'une part d'estimer ou de prévoir les risques, et d'autre part de vérifier que les mesures de protection mises en œuvre sont efficaces. La prise d'information comporte plusieurs temps qui consistent à relever les données, à les corriger et à les compléter si nécessaire, à les archiver et enfin à les transmettre. Les informations recueillies doivent au moins renseigner sur les précipitations, les températures, le transport de neige par le vent et le rayonnement. Elles doivent être pertinentes vis-à-vis du problème à résoudre, notamment par la localisation judicieuse du poste de mesures. Ce dernier peut comporter un ou plusieurs points de mesures (pour un même secteur) équipés d'instruments manuels ou automatiques. Les données des différents types de systèmes de mesures automatiques peuvent être importantes pour la gestion des risques d'avalanches. On peut distinguer les stations automatiques qui mesurent des paramètres météorologiques ou nivologiques et les systèmes de détection qui déclenchent un événement dangereux comme par exemple une avalanche. Les stations météorologiques fournissent des informations sur le manteau neigeux et les paramètres météorologiques qui ont une influence sur la métamorphose de la neige. Ces informations sont disponibles en continu depuis des sites qui ne sont pas accessibles en saison hivernale. Elles permettent une bonne estimation de l'état du manteau neigeux et constituent ainsi un outil précieux pour la prévision du danger d'avalanches. Les systèmes de détection des avalanches quant à eux sont utilisés en tant que systèmes d'alarme pour déclencher une mesure de protection temporaire comme par exemple la fermeture d'un axe de circulation. Il existe également des systèmes de détection automatique des avalanches qui sont utilisés pour la vérification du résultat d'une tentative de déclenchement préventif. Les moyens de mesures sont donc nombreux aujourd'hui ; il conviendra de les choisir et de les utiliser avec discernement...*

## Measurements and instrumentation

*Collecting data is a crucial step in the avalanche forecasting. This work gives the opportunity to estimate or predict the risks but also to ensure that the protective actions are effective. It consists in gathering, revising, saving and finally sharing data which should at least inform about snowfall and rainfall, temperatures, blown snow and radiation. The data should be relevant to the problem to be solved, especially by the judicious location of the measurement station. This station may include one or more measurement points (for the same sector) equipped with manual or automatic instruments.*

*The data provided by automatic measurement systems can be of great use for the management of natural hazards. Generally one distinguishes between automatic measurement stations and detection systems. Automatic meteorological stations continuously supply information about the state of the snow cover as well as about the atmospheric parameters influencing the evolution of the snow cover. This information from sites which are inaccessible during winter season is an important base of avalanche warning while information from automatic detection systems are useful to initiate temporary protection measures like the closure and evacuation of traffic axes. Furthermore, detection systems are used to check the results of avalanche artificial release. The tools are numerous at present time; one has to choose and to use them cleverly...*

---

<sup>1</sup> METEORISK, CP 993, CH-1951 SION ; [www.meteorisk.com](http://www.meteorisk.com)

Tel : +41 (0)79 433 30 72 ; Fax : +41 (0)27 323 63 14 ; e-mail : [robert.bolognesi@meteorisk.com](mailto:robert.bolognesi@meteorisk.com)

<sup>2</sup> SensAlpin GmbH, Promenade 129, CH-7260 DAVOS DORF ; [www.sensalpin.ch](http://www.sensalpin.ch)

Tel : +41 (0)81 420 15 24 ; Fax : +41 (0)81 420 15 32 ; e-mail : [info@sensalpin.ch](mailto:info@sensalpin.ch)

## Introduction

Dans toutes les sciences appliquées, sciences de la Terre ou sciences de l'atmosphère, la collecte de données en vue d'analyses explicatives ou prospectives est souvent une étape essentielle. On rappelle ici certains principes généraux à respecter lors de cette étape et l'on évoque la mise en œuvre pratique de ces principes, dans le domaine spécifique de la protection (au sens large du terme) contre les avalanches.

### 1. Principes généraux

#### 1.1. Pourquoi recueillir de l'information ?

Dans une approche qui se veut rationnelle de la sécurisation, on considère qu'une décision doit se fonder sur une analyse qui doit elle-même s'appuyer sur des faits que décrivent des mesures (relevés quantitatifs) ou des observations (relevés qualitatifs). Il est donc admis que ces mesures et observations constituent le fondement de la gestion du risque avalanche, qu'elle soit à assurer par des mesures temporaires ou permanentes, en particulier lorsque ce risque concerne la population. Ainsi, la stratégie qui est aujourd'hui uniformément adoptée et qui définit les « règles de l'art », peut se résumer par 6 actions à réaliser successivement :

| 1.Mesurer/Observer   | 2.Analyser | 3.Prévoir | 4.Décider  | 5.Agir     | 6.Contrôler          |
|----------------------|------------|-----------|------------|------------|----------------------|
| Relever              | Modéliser  | Modéliser | Déclencher | Déclencher | Relever              |
| Critiquer / corriger | Simuler    | Simuler   | Interdire  | Evacuer    | Critiquer / corriger |
| Compléter            |            |           | Evacuer    | Protéger   | (Compléter)          |
| Archiver             |            |           | ...        | (In)former | (Archiver)           |
| Transmettre          |            |           |            |            | Transmettre          |

*Figure 1 : Succession des 6 actions à effectuer dans un processus de sécurisation. La prise d'information s'effectue en début et en fin de processus (colonnes grisées).*

Cette succession d'actions doit être répétée jusqu'à obtention d'un niveau de sécurité jugé acceptable : si la phase 6 ne permet pas de conclure à une réduction du risque, il est nécessaire de reprendre le processus à la phase 1 si les conditions sont susceptibles d'avoir évolué, ou à la phase 4 dans le cas contraire. On remarque ainsi que la prise d'information est nécessaire à deux moments du processus de sécurisation : pour l'initier et pour le conclure. Ceci vaut aussi bien pour la sécurisation « d'urgence » (gestion de crise) que pour la sécurisation « préventive » (choix d'une stratégie paravalanche) ; seule la nature des informations exploitées diffèrera d'un cas à l'autre.

Que ce soit en début ou en fin de processus, les tâches à réaliser sont donc identiques. Il s'agit dans les deux cas :

- de **relever** des données.

C'est la prise d'information proprement dite, effectuée manuellement ou automatiquement à l'aide d'instruments, ou réalisée par simple observation (visuelle en général) ; elle consiste à recueillir toutes les données nécessaires à la suite du processus de sécurisation, en général en se conformant à un protocole précis.

- de **critiquer** et de **corriger**

Les données recueillies vont déterminer une décision ou seront exploitées dans le cadre de futures études. Elles apparaissent ainsi comme très importantes : leur validité doit donc être garantie. Avant d'exploiter une donnée, celle-ci doit donc être critiquée et satisfaire à certains tests de validité. Au besoin, elle doit être corrigée par une nouvelle mesure.

- **de compléter**

Certaines données brutes sont difficilement exploitables ; il faudra donc, dans certain cas, produire des données dérivées plus significatives pour le prévisionniste ou pour le modèle, telles que des cumuls, des moyennes, des variations, des extrema, etc. Parfois, certaines données devront être codées dans un souci de standardisation ou de simplification ; parfois encore, on pourra leur attacher des métadonnées, comme des coefficients de vraisemblance ou des intervalles de confiance par exemple, permettant de faciliter leur exploitation, notamment par des modèles...

- **d'archiver**

Une donnée est une information témoignant souvent d'une réalité passagère. Elle est donc extrêmement précieuse car elle ne pourra être retrouvée en cas de perte : elle doit être archivée avec soin (sauvegardes multiples) ; à noter que cet archivage ne devra pas seulement garantir la pérennité de l'information mais devra aussi permettre d'y accéder facilement et rapidement.

- **de transmettre**

Les technologies actuelles permettent une transmission rapide des données. Il devient maintenant très facile de partager l'information, même en temps réel. Un réseau de mesure doit donc permettre une circulation rapide (mais contrôlée) des données.

On remarquera enfin que les données sont utilisables par plusieurs acteurs très différents du domaine de la montagne : par les professionnels de la neige (guides, pisteurs, nivologues, décideurs,...) qui ont à assurer une mission de sécurité, par les ingénieurs (nivologues, hydrologues, ...) qui sont en charge de travaux d'aménagement du territoire, par les chercheurs qui les utilisent pour étudier un phénomène de façon expérimentale ou pour caler ou valider des méthodes, théories ou modèles, et... par les experts des tribunaux pour déterminer des responsabilités en cas d'accident.

On l'aura compris : **la prise d'information revêt la plus grande importance** et ne doit jamais être reléguée à un second plan.

## 1.2. Quelle information faut-il recueillir ?

Face à la nécessité d'effectuer des mesures et/ou des observations, la question qui se pose est : que faut-il mesurer ou observer ?

Il n'existe pas une réponse universelle à cette question mais un grand principe prévaut : il faut recueillir des données pertinentes. Cela peut paraître une évidence mais il n'est pas si facile d'évaluer la pertinence d'une donnée !

Une donnée sera jugée pertinente si elle possède un lien de causalité (et non seulement de corrélation) avec l'évènement que l'on souhaite prévoir. Ce lien devra par ailleurs être suffisamment étroit et permanent, à défaut d'être direct. Les données ne satisfaisant pas à cette condition devront en général être écartées, sauf si elles constituent des indicateurs révélant une autre donnée pertinente mais plus difficile à recueillir ; l'exemple typique est celui de la mesure du vent qui ne détermine pas lui-même le risque avalanche mais qui, associée à un relevé indiquant la transportabilité de la neige de surface, informe sur le déplacement de neige. Bien sûr, on devrait préférer la mesure directe de la quantité de neige transportée qui est la donnée la plus informative...

Les données pertinentes pour l'estimation d'un risque (nowcasting) sont des grandeurs nivologiques. Les données nécessaires à la prévision sont des grandeurs nivologiques (décrivant l'état du manteau neigeux) et météorologiques (décrivant l'état de l'atmosphère qui intervient sur l'évolution du manteau neigeux).

On doit distinguer ces deux types de données pour diverses raisons :

- leurs représentativités spatiales sont très différentes : une donnée nivologique ne fournit qu'une information très ponctuelle et difficilement généralisable ; par exemple les mesures d'épaisseur du manteau neigeux, effectuées sur un versant uniforme, montrent que cette donnée peut varier du simple au double sur un hectare. Ces variations sont encore plus importantes, évidemment, dès lors que les mesures sont prises à des altitudes ou orientations différentes ; les données météorologiques, en revanche, se montrent plus souvent représentatives d'une zone plus étendue.
- leur « durée de vie » sont également très variables (très courte pour les données météorologiques, plus longue pour les données nivologiques).
- Les méthodes de collecte sont enfin très différentes : les relevés sont largement automatisables pour les données météorologiques, mais restent le plus souvent manuels pour les données nivologiques.

On notera que la pertinence des mesures ne concerne pas seulement la nature des données : elle concerne également la localisation, la fréquence et la précision des relevés. Par exemple, il n'est guère pertinent de mesurer les précipitations en dixièmes de millimètre, toutes les minutes, sur une arête à haute altitude, même si la technologie permet théoriquement de le faire !

Enfin, les observations et mesures peuvent répondre à 2 usages différents : établir des analyses et prévisions ou déclencher une alarme. Dans le premier cas, on observe et on mesure des indicateurs de risque ; dans le 2<sup>ème</sup> cas, on détecte le phénomène.

En principe, les données utiles à l'estimation du risque avalanche sont celles qui informent sur la structure du manteau neigeux dans les zones de départ des avalanches : elles doivent suffire à renseigner sur l'éventualité d'une rupture et sur la taille de l'avalanche potentielle. Cependant, ces données sont très difficiles à collecter car l'accès à ces zones de départ est souvent difficile et dangereux. Il faudra donc se résoudre à collecter d'autres données qui pourront fournir des indications utilisables. Ainsi, de façon très générale, on doit s'attacher à mesurer au moins 4 « données-clés » : les **précipitations**, le **transport de neige par le vent**, les **températures** et le **rayonnement**. Ces mesures nécessitent une instrumentation assez sophistiquée. Si cette dernière ne peut être mise en œuvre, on pourra se limiter à relever les précipitations, le vent, les températures et la nébulosité. C'est l'information minimale sans laquelle il semble hasardeux de tenter une quelconque prévision « argumentable ». Des données concernant **l'occurrence des avalanches** seront un complément extrêmement précieux pour déclencher des alarmes mais aussi pour toutes les approches statistiques.

Ces diverses considérations permettent de réaliser que les données à recueillir peuvent varier selon le cas considéré. Les critères déterminant les données à collecter (nature, lieux, fréquence, précision) sont *toujours* :

- le besoin,

Il doit être parfaitement cerné avant tout déploiement, même modeste, d'instruments de mesures. Les données à collecter seront en effet différentes s'il s'agit d'évaluer l'ampleur d'une avalanche exceptionnelle ou si l'on veut faire une prévision quotidienne du risque. Elles seront également différentes si cette prévision est locale ou régionale, si elle est quotidienne ou horaire, si elle est qualitative ou quantitative...

- les moyens

Ils définissent très souvent les possibilités : les stations de mesures automatiques représentent un investissement non négligeable, tandis que des relevés manuels demandent des ressources humaines parfois coûteuses.

- les contraintes.

Les contraintes peuvent parfois être nombreuses : topographie accidentée imposant plusieurs postes de mesure, accès difficile prescrivant des stations automatiques, climat rigoureux défavorable à des stations automatiques « low cost », situation nécessitant des relevés fréquents et effectués 24h/24, forte fréquentation touristique des lieux avec risque de vandalisme, zone naturelle protégée, etc.

Finalement, le dispositif de mesure idéal sera celui qui satisfera les besoins le mieux possible compte tenu des moyens mobilisables et des contraintes locales. *On ne pourra pas se passer de cette analyse sous peine de concevoir un dispositif inadapté.*

## 1.2. Où doit-on collecter les données ?

Le lieu idéal sera fonction du problème à résoudre mais il existe tout de même certaines règles qui seront valables en toutes circonstances. De manière générale, les données collectées devront apporter des éléments de diagnostic efficace. Si ce diagnostic ne concerne qu'une zone très restreinte, on aura souvent intérêt à rechercher la proximité entre le point de mesure et les zones de départ des avalanches. En revanche, si l'on souhaite établir un diagnostic concernant un large territoire, on recherchera un point tel que les données recueillies puissent être facilement généralisées.

Plusieurs cas peuvent se présenter, selon les moyens techniques disponibles :

### 1.2.1. Installation d'un poste simple de mesures manuelles.

Il est souvent impossible, en montagne, de mesurer avec une égale fiabilité les précipitations et le vent, en un même point. Cette configuration est donc déconseillée. Cependant, si l'on ne peut disposer que d'un seul point de mesure (ce qui arrive souvent pour des raisons économiques), on devra soit choisir un point soumis au vent à condition de pouvoir y mesurer ou y évaluer le transport de neige par le vent, soit choisir un point abrité du vent à condition de pouvoir obtenir au moins une estimation du vent en altitude. Le premier choix est tout à fait convenable pour la prévision des avalanches, mais ne fournira pas de bonnes séries climatologiques en ce qui concerne les précipitations. Le deuxième choix, au contraire, permettra de construire de meilleures séries mais sera souvent peu efficace pour la prévision car il ne permettra pas l'observation d'une des données primordiales pour la prévision locale des avalanches (le transport de neige). Dans les deux cas, on essaiera autant que possible de choisir une altitude assez proche de celle des zones de départ des avalanches, et de situer le point sur un versant de même orientation que celle des pentes qui connaissent les avalanches à prévoir. On notera toutefois que, dans certaines situations très particulières, on peut déroger à ces règles générales : c'est le cas, notamment, pour la prévision des avalanches dont le déclenchement n'est pas déterminé par le vent (avalanches en forêt par exemple).

### 1.2.1. Installation d'un poste fractionné de mesures manuelles.

Il s'agit d'un poste composé de 2 ou même de plusieurs points de mesures distincts (mais où l'on recueille des données concernant un unique secteur). Cette solution est très intéressante car elle permet de mesurer convenablement les diverses données nécessaires à la prévision des avalanches. Généralement, on installera un point de mesure du vent en altitude, à l'écart de tout obstacle et dans une zone où le vent n'est pas canalisé (ceci est absolument fondamental) et un point de mesure des autres données en un lieu proche mais abrité du vent. Un poste fractionné ne peut dispenser de la mesure du transport de neige par le vent car on ne peut disposer d'une mesure continue du vent et de relevés très fréquents des précipitations.

### 1.2.2. Installation d'un poste simple de mesures automatiques.

Cette solution est déconseillée sauf, éventuellement, si l'instrumentation installée permet de mesurer le transport de neige par le vent. Dans le cas contraire, les données recueillies ne permettront pas d'établir une prévision locale des avalanches, mais seulement de compléter une prévision régionale. On comprend aisément les raisons qui font que cette solution n'est pas recommandée : en altitude, la mesure automatisée des précipitations est très peu précise car on ne peut disposer que des variations de hauteur du manteau neigeux qui ne dépendent pas uniquement des précipitations mais aussi du tassement, de la fonte, et de l'érosion ou de l'apport de neige par le vent. Par exemple, il sera impossible d'évaluer la précipitation si celle-ci débute sous forme de pluie au passage du front chaud, puis se transforme en neige et est accompagné par des vents forts au passage du front froid. Il sera donc souvent préférable de positionner ce poste à basse ou moyenne altitude, dans une zone protégée du vent, en complétant les relevés automatiques par des données ou estimations sur les vents en altitude. Finalement, l'intérêt d'une telle installation s'avère donc limitée : elle ne dispense pas de relevés manuels et ne fournit pas de données depuis une zone inaccessible. La solution consistant à installer une station de mesure automatique unique est donc, sauf situation particulière, assez peu productive bien que coûteuse. Bien entendu, cette faible « rentabilité » ne leur enlève pas tout intérêt...

### 1.2.3. Installation d'un poste fractionné de mesures automatiques.

Un poste fractionné de mesures automatiques est le plus souvent composé de 2 stations de mesures automatiques distinctes, l'une étant consacrée à la mesure du vent (avec éventuellement d'autres données atmosphériques), l'autre à la mesure des précipitations et de toutes les autres données nivo-météorologiques. Ces deux stations peuvent être complétée par une troisième, dédié à la détection des avalanches (cette configuration optimale a été cependant rarement installée jusqu'à ce jour). La station « vent » sera installée en général sur un point culminant ; si ce dernier est un dôme, alors la situation sera sans doute idéale car elle permettra d'effectuer également de bonnes mesures de transport de neige (dans la limite des capacités actuelles des capteurs automatiques). La station « neige » sera installée à proximité de la station vent mais dans une zone abritée du vent. Enfin la station « avalanche » sera installée en un point compatible avec les diverses limitations techniques qu'elle peut connaître : à l'écart des routes, voies ferrées, remontées mécaniques pour les systèmes sismiques, dans une zone la moins masquée possible pour les systèmes acoustiques... Il est indispensable de consulter les fabricants pour connaître et prendre en compte avec précision les éventuelles contraintes des matériels concernés.

#### 1.2.4. Localisation d'un poste fractionné de mesures mixtes.

Un poste fractionné de mesures mixtes apparaît comme un petit réseau ponctuel comportant à la fois une ou plusieurs stations de mesures automatiques, un ou plusieurs points de relevés manuels, un ou plusieurs points d'observation visuelle. C'est, sans aucun conteste, le meilleur système de mesures nivo-météorologiques que l'on puisse concevoir. Il surpasse largement toutes les autres installations possible car il permet d'enregistrer une information riche et fiable, avec des mesures effectuées en continu, des dispositifs d'alarme, des mesures nivologiques et d'observation qualitatives impossibles à automatiser, et surtout un contrôle permanent par un opérateur humain qui sera à même de corriger les données recueillies si nécessaire. On choisira de placer une station « vent » sur un dôme culminant, une station « neige » sur un replat d'altitude abrité du vent, un point de mesures manuelles à une altitude moyenne sur une légère pente d'orientation similaire à celle des zones de départ des avalanches, un point d'observation visuelle dans un site offrant une vue panoramique large, et un ou plusieurs points de sondage du manteau neigeux dans une pente courte, assez raide (30° au moins) et sûre.

On constatera que certains réseaux de mesures actuels (qui ne comportent pas de postes fractionnés mais surtout des postes manuels simples situés à basse altitude) ne remplissent pas ces critères de localisation. Ils sont ainsi souvent inadaptés à une prévision locale fine des risques d'avalanches. On ne s'en étonnera pas car ils ont souvent été conçus pour un autre usage : la prévision qualitative régionale des avalanches.

#### 1.3. Quand doit-on collecter les données ?

La question du moment de la mesure se pose régulièrement dès lors que des relevés manuels sont à effectuer. L'heure exacte des relevés peut être définie par les exigences d'un réseau : si le poste de mesure fait partie d'un ensemble de plusieurs postes, il est important que les relevés soient effectués aux mêmes instants en ces différents lieux ; c'est à cette condition qu'ils pourront être agrégés et comparés. C'est aussi souvent un impératif d'organisation : l'heure des mesures est donc dictée par les exigences (technique, humaines...) d'exploitation du réseau.

En dehors de ce cas particulier, on retrouve le principe fondamental qui stipule qu'une donnée doit être collectée... lorsqu'elle est pertinente. Pour la prévision des avalanches de fonte se produisant aux heures chaudes de la journée par exemple, un relevé effectué à 11h00 sera souvent plus précieux que le relevé climatologique journalier effectué à 08h00. Cependant, si le choix du moment apparaît assez libre, il conviendra de respecter l'heure choisie de façon à pouvoir produire certaines données dérivées à partir des données brutes comme des cumuls ou des variations qui seront autant de repères précieux pour le prévisionnistes. Mais on pourra effectuer plusieurs relevés dans une journée. Enfin, on devrait théoriquement toujours raisonner en heure solaire (heure TU) et non en heure locale...

## 1.4. Comment effectuer les relevés ?

La présentation de tous les protocoles de mesures et d'observation dépasse le cadre de cette introduction. On se bornera donc ici à rappeler quelques principes généraux qui doivent toujours être respectés.

### 1.4.1. Calibrages

Les appareils utilisés doivent avoir été soigneusement calibrés et installés. Il est inutile de relever une température au dixième de degré si le thermomètre est défectueux ou s'il est exposé au soleil par exemple ! Il est indispensable de se référer aux notices des constructeurs et de prévoir une maintenance du matériel.

### 1.4.2. Echantillonnage

Les relevés concernant une grandeur connaissant une forte variabilité ne devraient pas être uniques. Pour mesurer la masse volumique de la neige par exemple, on conseille de faire deux relevés au moins et d'en prendre la moyenne ; pour la mesure de l'enfoncement de la sonde, on préférera retenir la moyenne de cinq relevés au moins, etc. Les mesures nivologiques sont particulièrement délicates car elles fournissent souvent des éléments forts de diagnostic voire de décision alors que leur variabilité est grande. Elles doivent donc être réalisées avec un grand discernement, l'opérateur devant toujours se poser la question : « cette valeur est-elle significative ? ».

## 2. Relevés manuels

### 2.1. Intérêt des relevés manuels

Dans la pratique, les relevés sont généralement composés de données quantitative effectuées à l'aide d'instruments mécaniques ou électroniques, et d'observations parfois quantitatives mais souvent qualitatives, provenant d'un constat souvent visuel réalisé par un opérateur.

Les relevés manuels présentent l'inconvénient d'être ponctuels et de nécessiter une intervention humaine qui est toujours contraignante, surtout en montagne et en hiver. Pourtant, ils présentent certains avantages :

- ils peuvent fournir des données impossibles à obtenir de manière automatique (masse volumique de la neige, enfoncement du tube de sonde, qualité de la neige de surface, type de nuages, etc.) ;
- ils peuvent être instantanément validés ou corrigés par l'observateur et peuvent ainsi être très fiables ;
- ils ne demandent qu'une instrumentation réduite et peu coûteuse, notamment en ce qui concerne leur maintenance ;
- ils impliquent fortement l'observateur qui acquiert une meilleure perception de la situation lorsqu'il effectue les relevés que lorsqu'il ne fait que les consulter ; cet avantage est parfois déterminant lorsque l'observateur assure également la fonction de prévisionniste.

Pour ces diverses raisons, et en dépit des limites qu'entraîne l'intervention humaine, les relevés manuels restent très utiles et ne peuvent être remplacés par des relevés automatiques.



## 2.2. Types de postes de mesures

- Le poste traditionnel, situé à basse ou moyenne altitude.

Il apparaît comme un parc clôturé (superficie de l'ordre de 50 m<sup>2</sup>) comportant une perche à neige permettant de mesurer la hauteur totale de neige au sol, une planche à neige pour relever les précipitations neigeuses, un pluviomètre et un abri ventilé dans lequel on placera les thermomètres, hygromètres (éventuellement un thermohygrographe) et un baromètre. Les appareils seront mécaniques afin d'éviter les dysfonctionnements que pourrait occasionner le froid. La mesure du vent sera effectuée avec un anémomètre de poche, ne restant pas à demeure. Si possible, on laissera le matériel de mesure complémentaire (balance ou éprouvette pour la mesure des précipitations, anémomètre, etc.) dans un local voisin.

La fabrication et l'installation de l'abri doit répondre à des normes (taille, hauteur, orientation) établies par les services météorologiques, afin de rendre les mesures comparables. Il convient de consulter ces services pour installer de tels postes, dans un souci de coordination et de partage des données.



Figure 2 : Poste de mesures traditionnel avec abri ventilé ; on distingue le pluviomètre et la planche à neige.

- Le poste réduit, situé à haute altitude.

Les conditions climatiques étant généralement sévères au-dessus de 2500 m, il est très difficile d'y maintenir un poste traditionnel. L'abri, en particulier, peut être endommagé ou enfoui sous la neige lors des tempêtes ; le pluviomètre fournira souvent des valeurs fantaisistes à cause des vents forts qui règnent en altitude... On peut donc raisonnablement s'écarter des normes évoquées précédemment et installer un poste réduit qui ne permettra pas de constituer des séries climatologiques mais qui apportera souvent des données extrêmement précieuses pour la prévision locale des avalanches.

Un poste réduit se présentera également sous la forme d'un parc clôturé comportant une perche à neige avec une longue faveur faisant office de girouette, une planche à neige et si possible un driftomètre (figure 3) qui est absolument nécessaire si le poste est soumis au vent (ce qui est le plus souvent souhaitable pour un poste d'altitude). Aucun instrument n'est laissé à poste du fait de l'absence d'abri. Les données qui feront défaut comme par exemple les températures minimales et maximales seront remplacées par des données décrivant partiellement leurs effets comme l'enfoncement du tube de sonde ou la masse volumique de la neige de surface... Tout le matériel de mesure est donc portatif : il consiste en un thermomètre à sonde, un hygromètre, un réglet, un anémomètre, une sonde courte (figure 4), une boussole, un carottier et un peson.



Figure 3 : Mesure du transport de neige par le vent à l'aide d'un driftomètre, à un poste d'altitude.

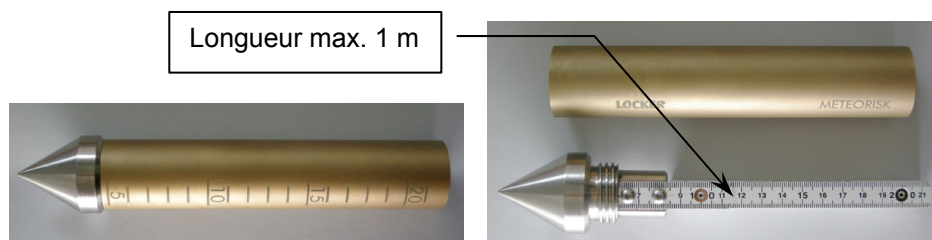


Figure 4 : Sonde courte, équivalente au premier tube de la sonde de battage (même diamètre, même poids) mais plus facilement transportable pour les postes d'altitude.

### 3. Relevés automatiques

#### 3.1. Généralités

Les données d'une station automatique peuvent constituer des éléments importants dans la gestion des risques naturels. Cependant, il faut réaliser qu'une instrumentation ne constitue jamais, à elle seule, une méthode de gestion des risques : elle n'apporte qu'une aide à la décision aux responsables de la sécurité. Ces décisions restent à prendre à partir de ces données mais en liant celles-ci avec les autres informations disponibles et avec les connaissances et les expériences des prévisionnistes.

L'emploi des différentes méthodes de gestion des risques naturels s'est modifié dans les dernières décennies. Cette mutation a différentes origines. En Suisse, l'hiver 1951 qui a connu beaucoup d'événements avalancheux catastrophiques a suscité de grands efforts dans la protection de la population des régions alpines contre les avalanches. Ce fut le début de l'intégration systématique d'une analyse des risques d'avalanches dans l'aménagement du territoire (cf. module 7). De grands investissements ont été réalisés dans des structures de protection contre les avalanches comme des claies et râteliers, des digues, des tunnels ou des galeries ainsi que dans le soin des forêts protectrices.

|                               | <b>hiver 1950 / 51</b>                | <b>hiver 1998 / 99</b>      |
|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| <b>dommages aux personnes</b> | 91 morts<br>en janvier / février 1951 | 17 morts<br>en février 1999 |
| <b>dégâts matériels</b>       | 105 millions CHF <sup>3</sup>         | 0.5 milliards CHF           |

La comparaison des dommages aux personnes et des dégâts matériels entre les hivers 1951 et 1999 en Suisse démontre bien deux points :

- les investissements pour la protection des villages et des grandes axes de circulation ont été efficaces
- le potentiel de dégâts a augmenté fortement par l'utilisation élargie du terrain alpin

Cette augmentation spatiale et temporelle des besoins de protection contre les avalanches ainsi que la pénurie des ressources financières ont initié un changement dans la stratégie de protection contre les avalanches qui intègre désormais des mesures temporaires de réduction du risque d'avalanches.

Cette nouvelle stratégie – désignée en Suisse par l'expression « *gestion intégrale du risque de dangers naturels* » demande de :

- connaître les dangers naturels (localisation, fréquence...)
- évaluer les dangers naturels en permanence
- prendre en compte les dangers naturels dans les planifications
- pouvoir réduire le danger

Dans le cadre de la gestion intégrale du risque d'avalanches les différentes mesures de protection possibles sont comparées en termes d'efficacité selon une analyse coûts - bénéfices. Alors que des mesures de protections paravalanches permanentes comme des râteliers, des digues ou des tunnels ont été souvent retenues par le passé pour la protection des habitations ou des axes de circulation importants, aujourd'hui des mesures temporaires sont souvent préférées, surtout s'il s'agit de protéger un axe de circulation secondaire ou un domaine skiable.

<sup>3</sup> chiffre corrigé par l'indice des prix

Ce développement en même temps que l'évolution rapide des moyens techniques a fortement augmenté la demande en systèmes de mesure automatiques dans le domaine des dangers naturels au cours des deux dernières décennies.

### 3.2. Types de systèmes de mesure

On peut distinguer d'une manière générale :

- les stations météorologiques qui mesurent automatiquement des paramètres météorologiques ou nivologiques
- les systèmes de mesure qui détectent un événement comme par exemple une avalanche

Le premier type de station automatique enregistre des informations sur les facteurs qui peuvent provoquer une avalanche. Ces informations permettent d'estimer le risque actuel ou passé et de faire un pronostic pour le futur immédiat ou plus lointain. Les données d'une station automatique peuvent être utilisées pour le choix et le dimensionnement des mesures permanentes de protection, ou comme données d'entrée pour la modélisation des avalanches ou comme information de base pour les prévisions d'avalanches au niveau local, régional et national, ou encore pour la recherche scientifique.

Le deuxième type de systèmes de mesures sert uniquement à la détection immédiate d'un événement.

Cette information peut servir à :

- déclencher une mesure de protection temporaire comme par exemple la fermeture d'une route ou d'une ligne de chemin de fer ;
- vérifier le succès d'un déclenchement artificiel et à prendre éventuellement d'autres mesures de protection utiles ;
- apercevoir une montée du risque par l'augmentation du nombre d'événements spontanés.

### 3.3. Mesure de paramètres

L'application la plus typique et la plus commune d'une station automatique est la prévision des avalanches. Dans cette application les stations automatiques apportent divers avantages par rapport aux relevés manuels car :

- on est quasiment libre dans le choix du site, ce qui permet d'obtenir des informations très représentatives des zones de départ d'avalanches ;
- les stations fournissent (de jour comme de nuit) des données en continu avec une résolution temporelle configurable et –avec quelques limites– durant les périodes de mauvais temps et de mauvaise visibilité

Des informations fiables sur les conditions présumées du manteau neigeux sont une base indispensable pour une conception et un dimensionnement corrects des mesures de protection permanentes. Pour cette application il est plus important d'avoir à disposition une longue série de mesure avec des valeurs extrêmes par hiver que d'avoir des mesures avec une haute résolution temporelle. Pour cette raison des relevés manuels sont souvent utilisés alors que l'importance des mesures automatiques est toujours en progression pour cette application.

Il existe des cas plus spécifiques où on a besoin d'informations très locales pour un lieu peu accessible pendant les périodes hivernales. La figure 5 montre l'exemple d'une station de mesure automatique du vent à côté des paravalanches de Crasta Mora au-dessus du village de Bever, en Suisse. Ces paravalanches ont été régulièrement recouverts de neige



soufflée par le vent et leur efficacité en a été ainsi réduite. Par conséquent les autorités locales ont décidé de faire construire des ouvrages de protection contre la neige soufflée. Pour définir la position et les dimensions optimales de ces constructions, une station de mesure automatique a été installée afin de mesurer le champ de vent local au niveau de la crête, à côté des paravalanches, pendant quelques saisons hivernales. A cause de l'accès difficile, il était impossible d'effectuer ces relevés manuellement ; en revanche, une station automatique permet d'obtenir une série de mesures continues pendant une ou plusieurs saisons hivernales.



*Figure 5 : Station de mesure automatique du vent près des paravalanches de Crasta Mora au-dessus du village de Bever, Suisse, à 2380 m d'altitude.*

### 3.3.1. Quelles sont les mesures possibles ?

Pour le prévisionniste il est important de bien connaître les propriétés du manteau neigeux actuelles et passées. De plus il lui faut des informations sur les paramètres météorologiques qui influencent ces propriétés du manteau neigeux et les processus de métamorphose de la neige.

Conformément à ces besoins on utilise trois types de stations automatiques qui diffèrent les uns des autres par le choix des paramètres mesurés et – ce qui est souvent méconnu des utilisateurs – par les critères de localisation de la station. Ainsi on distingue en Suisse : les stations « neige », les stations « vent » et les stations « transport de neige ».

- Les stations « neige »

Elles servent à relever les propriétés du manteau neigeux et des paramètres météorologiques qui influencent ces propriétés. Les paramètres typiques mesurés par une station de neige sont :

- La hauteur totale de neige
- Les températures du sol, dans et à la surface de la neige
- La température et l'humidité de l'air
- La force et la direction de vent
- La radiation solaire



*Figure 6 : station « neige » pour les prévisions d'avalanches  
(Zermatt – Alp Hermetje, Valais – Suisse, 2380 m).*



- Les stations « vent ».

Elles servent à mesurer le champ de vent global et quelques paramètres météorologiques qui peuvent être trop influencés par la topographie à l'emplacement typique d'une station « neige ».

Les paramètres typiques mesurés par une station de vent sont :

- La force et la direction du vent
- La température et l'humidité de l'air
- La pression atmosphérique



Figure 7 : station « vent » (Albristhorn, Suisse, 2762 m)

- Les stations « transport de neige »

Le phénomène du transport de neige par le vent est déterminé à la fois par les propriétés de la surface de neige et par les caractéristiques du vent.

Les paramètres typiques mesurés par une station « transport de neige » sont :

- Le transport de neige par le vent
- La force et la direction de vent

En outre, certaines stations délivrent également des mesures de hauteur de neige dans les zones d'érosion et de dépôt de la neige, ainsi que la température de l'air.



Figure 8 : station « transport de neige » (Andina, Chili, 4425 m)



### 3.3.2. Où installer les stations automatiques ?

Le principal problème technique pour les stations de mesures en montagne, c'est le givrage des capteurs et autres composants comme par exemple le panneau solaire. Différents concepts ont été développés et testés mais la seule vraie solution à ce problème reste l'emploi de capteurs chauffés. Par contre il n'est pas possible d'alimenter un chauffage efficace par une source d'énergie autonome comme des panneaux solaires. Il faut donc tout d'abord décider la priorité entre un choix libre du site ou un choix libre des capteurs. Pour des mesures climatologiques, le choix libre de capteurs est souvent primordial et limite le choix du site aux endroits où une alimentation par ligne électrique est disponible. Dans le domaine des prévisions d'avalanches par contre un choix libre du site est normalement préféré ce qui exige une alimentation autonome interdisant l'usage de capteurs chauffés.

Afin de tirer le meilleur profit des données d'une station météorologique pour les prévisions d'avalanches il est très important de respecter quelques règles dans le choix du site de la station. Certains préfèrent prendre les mesures le plus près possible des zones de départ des avalanches. Mais ce concept ne permet pas d'utiliser les données mesurées pour tirer des conclusions pour d'autres sites dans la même région. De plus de nombreuses études au sujet de la distribution des paramètres de stabilité d'un manteau neigeux indiquent que cette stratégie du choix de site peut mener aux estimations erronées. En Suisse on préfère donc la stratégie consistant à mesurer des paramètres sur les sites qui sont les plus représentatifs possibles pour toute une région, ce qui permet des interprétations pour d'autres lieux en liant les données mesurées avec la connaissance du terrain et l'expérience des utilisateurs des stations.

Les règles pour le choix des sites pour les trois types de stations sont :

|                    | <b>Station<br/>« neige »</b>                                                                                                    | <b>Station<br/>« vent »</b>                          | <b>Station<br/>« transport de neige »</b>                                                        |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Topographie</b> | <i>terrain plat<br/>d'un diamètre<br/>minimal de ~50m<br/>loin des ruptures<br/>de pente, non<br/>perturbé par le<br/>vent.</i> | <i>sommet ou crête<br/>loin de tout<br/>obstacle</i> | <i>bosse ou crête ;<br/>lieu situé entre les zones<br/>d'érosion et de dépôt de<br/>la neige</i> |
| <b>Altitude</b>    | <i>correspondante<br/>aux zones de<br/>départ<br/>d'avalanches</i>                                                              | <i>au-dessus de<br/>tous les<br/>obstacles</i>       | <i>correspondante aux<br/>zones de départ<br/>d'avalanches</i>                                   |

### 3.3.3. Résolution temporelle

La question « quand mesurer ? » ne se pose pas vraiment pour des stations automatiques qui sont capables de fournir des données quasiment en continu. Evidemment il faut définir les intervalles de mesure et d'enregistrement en considérant les limites de la mémoire du système, des capacités de transmission de données et de l'énergie disponible pour cette transmission. Mais avec le développement rapide des moyens techniques, ces questions deviennent de plus en plus secondaires.

En règle générale l'intervalle de mesure et d'enregistrement de données est à définir en fonction de la vitesse des variations des paramètres importants et des phénomènes qui sont influencés par ces paramètres. Du fait que, dans le domaine de la prévision des avalanches, les processus observés sont relativement lents, un intervalle de mesure de quelques secondes à quelques minutes et un intervalle d'enregistrement de l'ordre de dix minutes se sont montrés absolument suffisants.

### 3.3.4. Comment procéder

Sans entrer dans les détails techniques, les composants techniques les plus importants d'une station automatique sont listés ci-dessous.

- capteurs

| <b>Paramètres</b>                         | <b>Principes de mesure</b>                                             |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <i>hauteur de neige</i>                   | <i>temps de propagation d'une impulsion ultrasonore</i>                |
| <i>température de la surface de neige</i> | <i>mesure de la radiation infrarouge</i>                               |
| <i>température air / neige</i>            | <i>thermistor</i>                                                      |
| <i>humidité de l'air</i>                  | <i>mesure capacitaire</i>                                              |
| <i>vent</i>                               | <i>mécanique (girouette)<br/>ou temps de propagation d'ultrason</i>    |
| <i>radiation</i>                          | <i>échauffement de surfaces de couleurs différentes ou photo-diode</i> |
| <i>transport de neige par le vent</i>     | <i>capteur acoustique FlowCapt<sup>4</sup></i>                         |

- acquisition de données

Le coeur d'une station automatique est le data logger. Ces instruments permettent de lire les valeurs des capteurs, d'effectuer des calculs avec ces valeurs, d'enregistrer les données et de conduire et contrôler toutes les fonctions techniques d'une station automatique. Il existe différents types de data logger qui se différencient dans l'extension de leur fonctions surtout au niveau de la programmation.

<sup>4</sup> produit de IAV Engineering Sarl, Tannay, Suisse, détails sous [www.isaw.ch](http://www.isaw.ch)

- système de communication

Un système de communication sert d'une part à transférer les données depuis la station automatique à l'ordinateur, d'autre part à vérifier l'état technique de la station et à modifier sa programmation ou sa configuration.

Il existe beaucoup de systèmes de communication. Ceux qui sont les plus utilisés pour des stations automatiques sont :

- transmission par réseau téléphonique GSM / GPRS / 3G
- liaison radio
- ligne téléphonique
- transmission par satellite

- alimentation

Comme indiqué auparavant les stations automatiques pour la prévision des avalanches sont munies d'une alimentation autonome. Normalement c'est une alimentation par panneau solaire mais en cas d'ensoleillement faible il existe la possibilité d'utiliser des piles à combustibles.

- structure mécanique

Les détails de la construction mécanique d'une station automatique sont souvent très importants pour la qualité et surtout pour la durabilité d'une instrumentation, notamment dans un environnement de haute montagne. De plus il est important de faciliter les travaux de maintenance par une conception adaptée de la structure.

### 3.4. Observer des événements

Une application toute différente des systèmes automatiques de mesure est la détection des événements dès qu'ils se produisent. Si cette information sur le déclenchement d'une avalanche est utilisée pour initier une mesure de protection comme par exemple la fermeture d'une route ou d'une ligne de chemin de fer, on parle d'un système d'alarme de dangers naturels. Il y a différentes conditions présidant au choix d'un système d'alarme pour sécuriser un axe de circulation. Normalement un projet est basé sur une analyse du risque et un calcul coûts-bénéfice. Un système d'alarme est typiquement utilisé pour des axes de circulation avec un risque initial moyen – c'est à dire pour des routes qui ne sont pas énormément fréquentées. Une analyse du risque initial et du risque résiduel permet de définir le rapport entre le coût du système (installation et maintenance) et la réduction de risque qu'il permet.

Les conditions topographiques doivent être favorables pour pouvoir installer un système d'alarme. Il faut que le couloir d'avalanche soit assez bien canalisé pour pouvoir détecter les avalanches sans équivoque. De plus la distance entre l'endroit où l'on détecte l'événement et la zone à protéger doit être assez grande pour permettre d'évacuer toute cette zone. Par contre si cette distance est trop grande il est souvent difficile de faire la distinction entre les grandes avalanches qui arrivent jusqu'à la route et les autres qui s'arrêtent en amont.

Normalement plusieurs systèmes de mesure différents sont utilisés conjointement pour détecter des avalanches. Cette redondance augmente la fiabilité du système et diminue le taux de fausses alertes. La figure 9 montre un système d'alarme à Liddes (Valais – Suisse) où un radar doppler, une mesure de force de traction sur un câble de détection placé en travers du couloir d'avalanche et trois géophones sont utilisés pour la détection d'avalanche. En cas de détection d'un événement, un signal radio est transmis au système de signalisation qui est situé au bord de la route, environ 1 km plus bas et qui commande la fermeture immédiate par des feux rouges. En même temps une centrale de surveillance ainsi que les utilisateurs du système sont informés par des messages informatiques ou téléphoniques. Quelques minutes après l'alarme les feux rouges sont éteints et remplacés par des feux oranges clignotants. Tout de même le système reste opérationnel et en mode détection. Une interface locale ou une commande à distance permettent aux utilisateurs de remettre les feux au vert après avoir contrôlé que la route n'est pas barrée par la neige de l'avalanche.



*Figure 9 : Station de détection d'un système d'alarme avalanche  
(Liddes, Valais – Suisse, 1720 m)*

### Le système ARFANG

Les systèmes de déclenchement artificiel à distance sont utilisés de plus en plus surtout pour la sécurisation de pistes ou de routes ; c'est un grand avantage que de pouvoir déclencher sans visibilité (de nuit ou par mauvais temps) mais les utilisateurs ressentent de plus en plus le besoin d'avoir une information fiable sur le résultat du déclenchement et sur l'ampleur d'une avalanche éventuellement déclenchée ; cette information valoriserait fortement le système de déclenchement. Différents systèmes ont été testés pour cette vérification (géophones, radars). Il existe un autre système qui s'est montré adapté à cette tâche : le système de détection par goniométrie infrasonore nommé ARFANG.

Les signaux de quatre microphones infrasonores sont exploités en continue par une unité centrale de traitement de données. Pour chaque paire de microphone une corrélation est faite pour la partie cohérente des deux signaux. Les délais entre chaque paire de microphone permettent de déterminer la direction d'où vient un signal infrasonore au voisinage du système. Avec des critères topographiques pour les couloirs d'avalanches – dont on connaît la direction et le tracé par rapport au site du système de détection – et en identifiant la caractéristique infrasonore typique pour distinguer une avalanche d'autres

sources infrasonores, on arrive a une assez bonne détection de l'activité avalancheuse dans le champs de visibilité de l'installation ARFANG.

En cas de détection positive les informations sont conditionnées et mises en forme graphique. Les utilisateurs sont alertés par un message (SMS, e-mail ou autre) et les informations de la détection sont disponibles par internet.

Alors que pour un système d'alarme, la détection des avalanches doit être très fiable, avec ARFANG on arrive à un taux de détections correctes d'environ 60% sans louper des avalanches d'une certaine taille (une fois que le système est bien réglé et adapté aux propriétés infrasonores du site d'installation). Cette précision est largement suffisante pour vérifier le succès d'un déclenchement artificiel dont on connaît le moment exact. Par ailleurs, les informations sur les avalanches spontanées servent à alerter les responsables de la sécurité en cas d'une augmentation de l'activité spontanée.

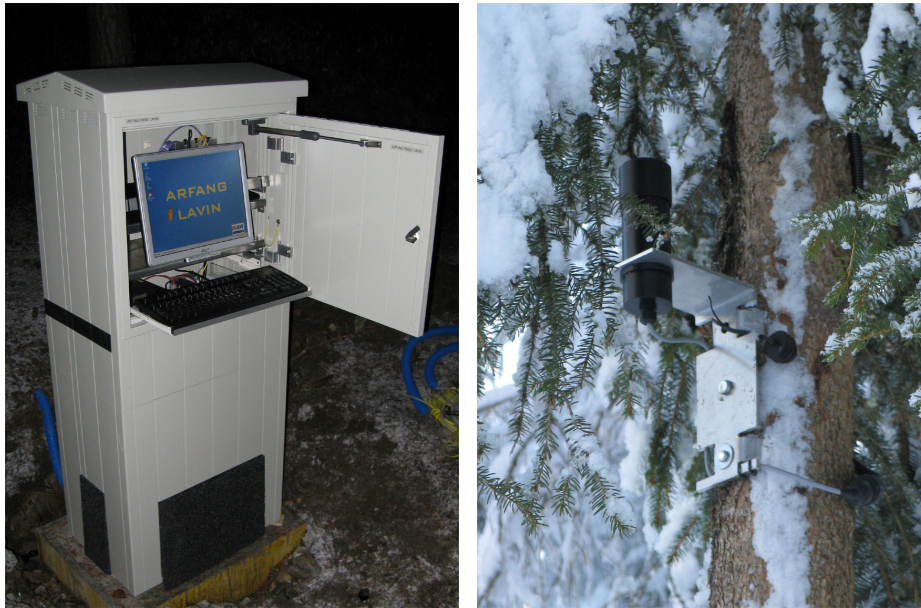


Figure 10 : Unité centrale de traitement et microphone infrasonore du système ARFANG

On le voit : les possibilités techniques pour effectuer des relevés en montagne sont actuellement diverses et variées. Il faudra toutefois les utiliser à bon escient pour en tirer le meilleur parti...



# **Annexes Module 3**

## Le profil nivologique simplifié et le logiciel *NivoGraf*

Robert Bolognesi<sup>1</sup>

Du fait qu'une avalanche résulte d'une rupture d'équilibre du manteau neigeux, il paraît assez naturel de vouloir « ausculter » ses couches de neige pour essayer de prévoir le phénomène... De fait, l'observation des caractéristiques internes de la couverture de neige (cristallographies, duretés, humidités, masses volumiques, températures et résistances à l'enfoncement) est l'un des fondements méthodologiques actuels de la prévision des avalanches. Les résistances à l'enfoncement sont ainsi, depuis longtemps, mesurées au moyen du sondage par battage.

Mais en pratique, ce sondage présente certains inconvénients :

- il peut demander plus d'une heure de travail à deux personnes ;
- il ne permet pas, en général, de détecter les couches fragiles minces et d'en mesurer la résistance au cisaillement ;
- il nécessite un matériel relativement lourd, encombrant et assez coûteux.

Ces inconvénients peuvent sembler minimes mais ils sont suffisants pour que ni les guides ni les randonneurs ne l'utilisent, et pour que les pisteurs ne le pratiquent en général qu'une fois par semaine et en un seul lieu, ce qui est très largement insuffisant si l'on veut essayer d'estimer les risques d'avalanches avec un peu de précision. En effet, la forte variabilité de la structure du manteau neigeux limite fortement la représentativité spatiale et temporelle de ce relevé ponctuel, notamment lorsqu'il est effectué en altitude.

Enfin (et surtout), la pertinence même du sondage par battage qui consiste à mesurer la résistance à l'enfoncement d'une sonde sous l'effet de chocs, est discutable. En effet, le résultat d'un sondage est très fortement dépendant de l'opérateur et, par ailleurs, n'est pas toujours révélateur du risque réel. L'intérêt du sondage par battage a ainsi été mis en doute à diverses reprises et par divers auteurs, au cours des dernières décennies. Bien qu'aucun consensus ne se dégage encore actuellement à ce propos, ce doute donne toute légitimité à l'emploi de méthodes complémentaires.

Mais comment disposer d'une information sur la structure du manteau neigeux qui soit à la fois significative et facile à obtenir ? Le profil nivologique simplifié pourrait apporter une réponse à cette question. En voici une rapide présentation.

---

<sup>1</sup> METEORISK, CP 993, CH-1951 SION ; [www.meteorisk.com](http://www.meteorisk.com)

Tel : +41 (0)79 433 30 72 ; Fax : +41 (0)27 323 63 14 ; e-mail : [robert.bolognesi@meteorisk.com](mailto:robert.bolognesi@meteorisk.com)

## 1. Le profil nivologique simplifié en pratique

Qu'on ne s'y trompe pas : le profil « simplifié » n'est pas un profil diminué ni dégradé ! Ce n'est pas l'information qui est simplifiée mais seulement la façon de l'obtenir. La simplification dont il est question ne concerne donc que le mode opératoire.

Pour réaliser un profil nivologique simplifié, il faut :

- 1 Choisir avec soin le lieu du relevé.  
On cherchera une zone représentative de celle que l'on souhaite analyser : on choisira en général une pente proche et similaire aux zones de départ (déclivité, altitude et orientation comparables) en s'assurant bien qu'elle ne soit pas exposée à une avalanche.
- 2 Creuser un trou jusqu'au sol (ou jusqu'à rencontrer une couche de neige épaisse et très résistante).  
Il n'est pas nécessaire, en général, de creuser au-delà d'une couche difficile à entamer à la pelle et qui ne semble pas susceptible de pouvoir se rompre.
- 3 Lisser le plan de coupe avec la pelle.  
Attention : si le plan de coupe est exposé au soleil, il faudra le "rafraîchir" régulièrement.
- 4 Repérer les différentes couches de neige.  
Elles sont identifiables aux variations de texture, de couleur et de cohésion de la neige. On peut marquer les limites des différentes couches pour bien les visualiser et pour faciliter les observations suivantes.
- 5 Pour chacune des couches de neige identifiées :
  - estimer la dureté et l'humidité de la neige par tests manuels (cf. rappels)
  - identifier le type de grain dominant (à l'aide d'une loupe si besoin)
  - mesurer (ou évaluer) la hauteur de la strate observée
  - reporter ces informations sur le formulaire en commençant par la couche de base du manteau neigeux (et non par la couche superficielle).

Exemples :

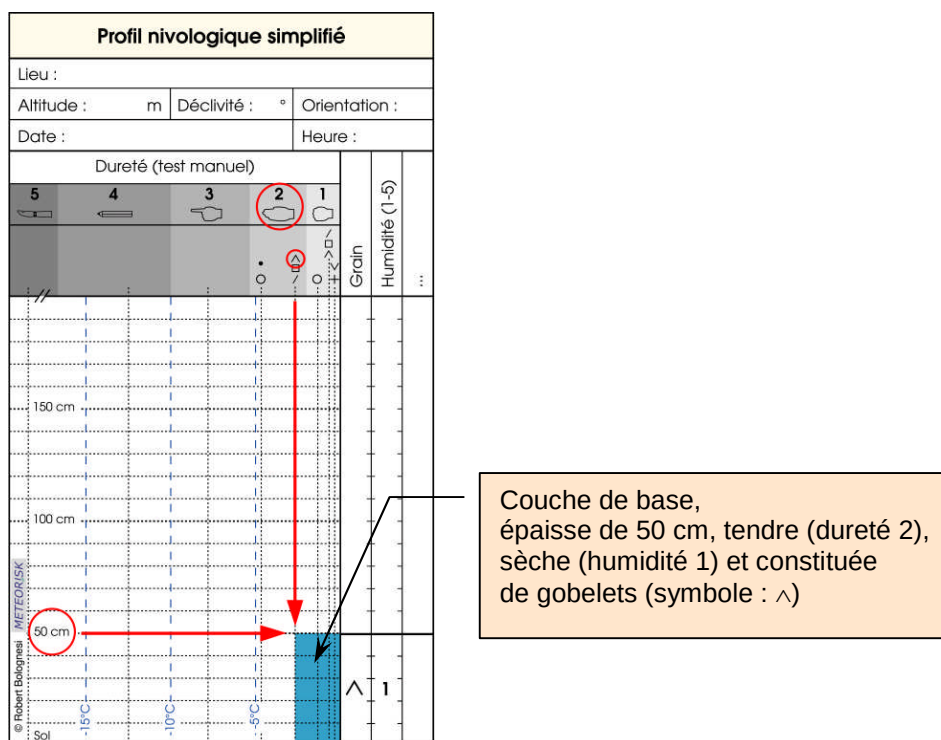


Figure 1 : Le relevé débute par le report des données relatives à la couche de base du manteau neigeux, Dans cet exemple, celle-ci est épaisse de 50 cm, tendre (dureté 2), sèche (humidité 1) et constituée de gobelets.

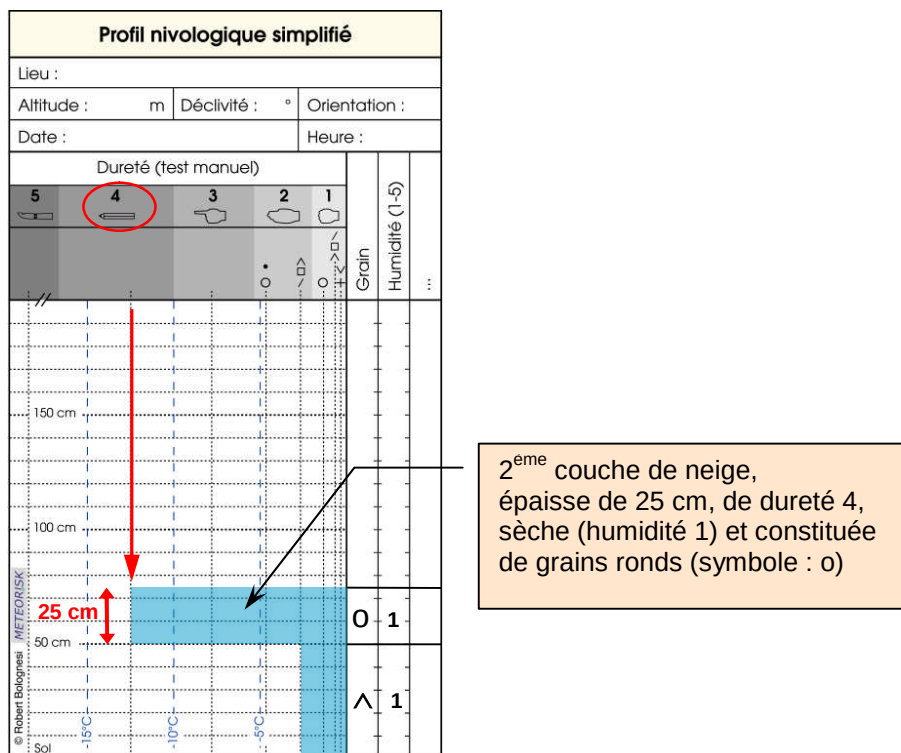


Figure 2 : Report des données relatives à la deuxième couche de neige.

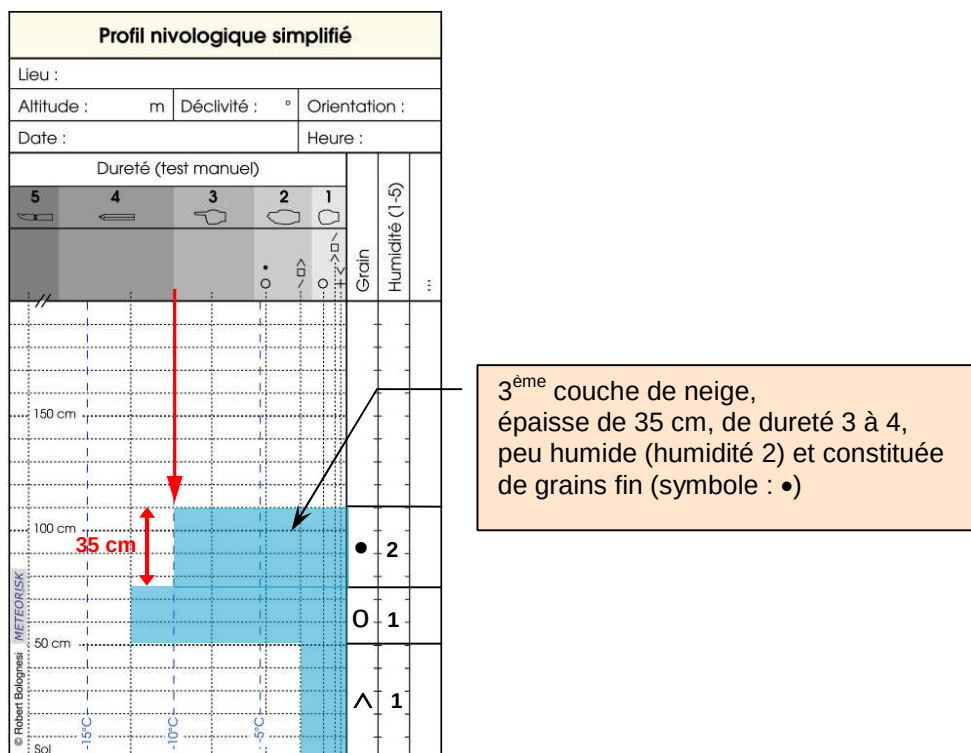


Figure 3 : Report des données relatives à la troisième couche de neige...

## 6 Porter sur le graphique toute autre information utile

Après avoir reporté la résistance, la cristallographie et l'humidité de toutes les couches de neige, on peut noter sur le graphique les températures de la neige, la hauteur des ancrages au sol et toute autre information utile comme par exemple le diamètre des grains de neige, les masses volumiques, etc., comme lors d'un profil stratigraphique conventionnel. Il est également possible de mentionner le résultat d'un test de stabilité en indiquant le niveau de rupture, ce qui peut être parfois révéler un plan de cisaillement ou de glissement difficile à détecter. Il faudra enfin ne pas oublier de compléter le cartouche.

Exemple :

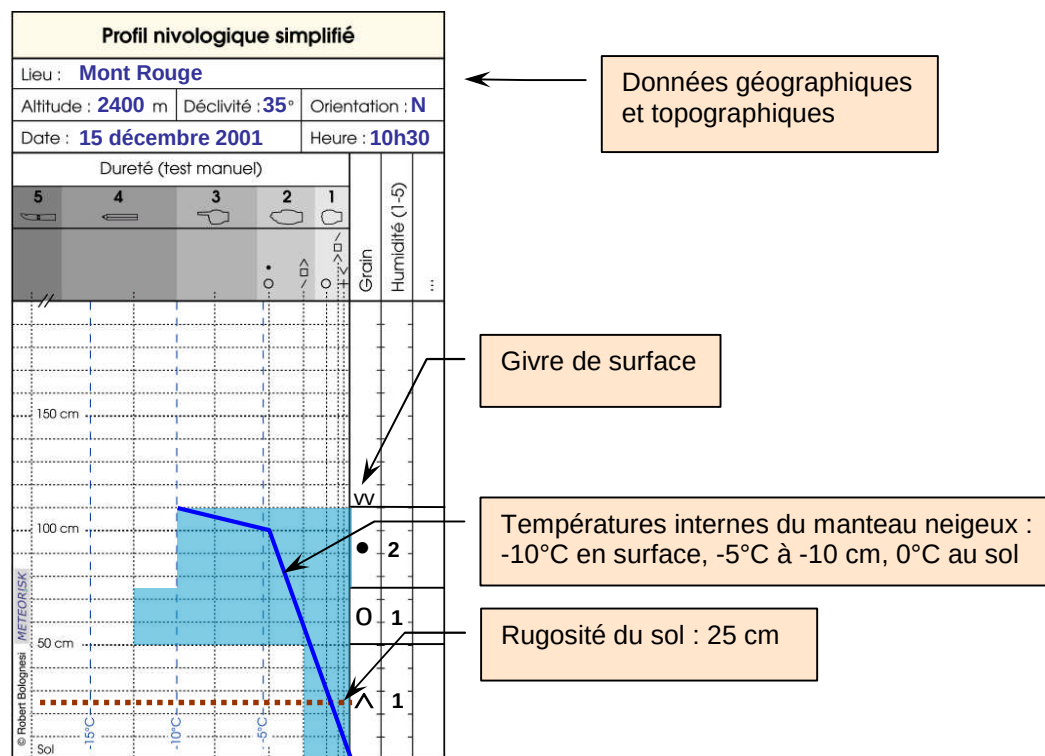


Figure 4 : Profil nivologique complété ; il serait encore possible d'ajouter des données complémentaires, selon le besoin de l'utilisateur, dans la colonne laissée libre à cet usage.

Il est facile de dresser le graphique sur le terrain, en même temps que l'on procède aux observations. Ce travail peut être effectué par une seule personne et ne demande pas plus d'une trentaine de minutes pour être achevé (durée moyenne constatée sur la réalisation de plus de 150 profils nivologiques durant plusieurs hivers).

Le formulaire est de petit format (A5) afin de ne pas être encombrant, et il peut même être encore réduit tout en restant parfaitement utilisable : cela facilite le travail sur le terrain (surtout lorsque le vent souffle) mais aussi, éventuellement, l'affichage dans le refuge où l'espace prévu à cet effet est souvent très restreint (quand il existe).



Le fait que le sondage simplifié permette la réalisation immédiate d'un graphique sur le terrain est très intéressant pour obtenir une représentation instantanée de la structure du manteau neigeux. Il constitue donc un outil répondant très bien au besoin des guides et des randonneurs. Toutefois, une information manuscrite ne permet aucune analyse quantitative automatique ; par ailleurs, elle ne peut être transmise rapidement (à un centre de prévision régional par exemple) ; enfin, une fois archivée, elle ne pourra pas être consultée aisément.

Mais depuis l'hiver 2007-08, un logiciel développé à METEORISK et intégré à l'environnement NivoLog permet d'enregistrer l'information sous deux formes numériques : comme fichier de données d'une part et comme image d'autre part (fichier au format jpg). Le sondage simplifié peut ainsi facilement s'archiver dans une base de données, peut être envoyé par e-mail, et devient exploitable par les modèles de prévision. Par ailleurs, divers calculs peuvent être effectués (tractions tangentielles, probabilités de rupture, par exemple), apportant ainsi des éléments intéressants pour mieux estimer la stabilité du manteau neigeux ; on entrevoit également des perspectives d'analyse automatique, notamment par des algorithmes de reconnaissance de forme.

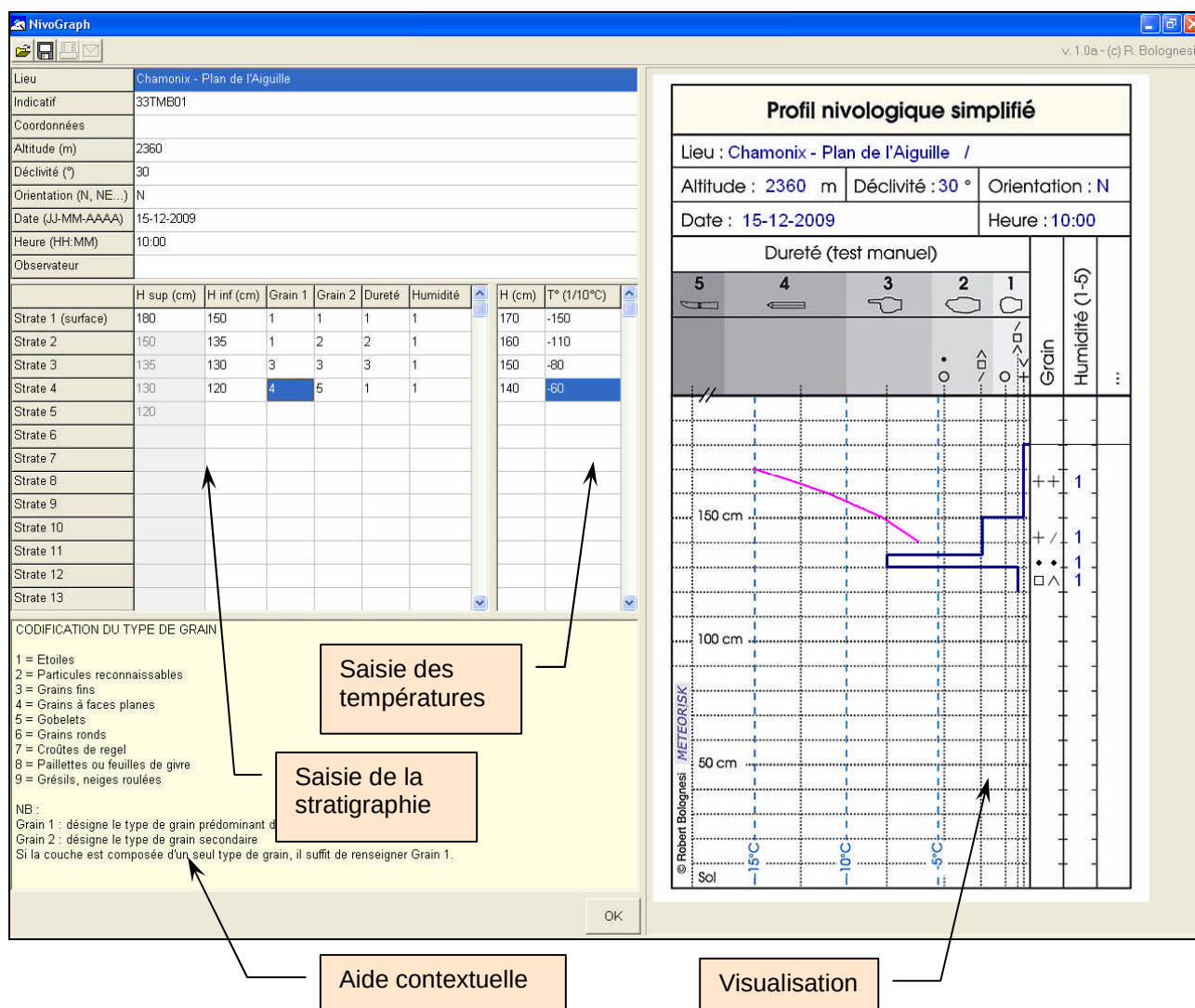


Figure 5 : Archivage numérique d'un profil nivologique simplifié à l'aide du logiciel NivoGraf (environnement NivoLog) ; une attention particulière a été portée sur la convivialité et l'ergonomie du logiciel (aides contextuelles, valeurs automatiques par défaut, visualisation instantanée, etc.) afin de faciliter la saisie des données : 5 minutes suffisent, en moyenne, pour enregistrer un profil complet.



Figure 6 : Réalisation d'un profil nivologique simplifié (responsable du service des pistes des Deux-Alpes) : un relevé adaptée aux réalités du terrain,

## 2. Le profil nivologique simplifié : fondements

L'idée de simplifier la mesure des résistances des couches de neige du manteau neigeux n'est pas nouvelle et a été adoptée depuis longtemps par les services de prévision des avalanches de l'armée Suisse et de l'Institut de Davos. Le profil nivologique simplifié présenté ici constitue donc une évolution d'une pratique déjà ancienne et (re)connue, qui vise essentiellement à apporter une meilleure précision dans l'estimation des résistances de la neige, sans trop compliquer le mode opératoire.

Plusieurs campagnes de mesures ont été effectuées (études *METEORISK*) dans le but de quantifier une relation statistique entre la dureté d'une couche de neige, évaluée par un test manuel, et sa résistance au cisaillement tangentiel mesurée au dynamomètre. Elles ont permis de fournir des variables très significatives pour la prévision locale des avalanches (les résistances au cisaillement des diverses strates du manteau neigeux) par le biais de simples tests manuels.

Pour effectuer ces investigations, un échantillon statistique a été constitué en procédant à des mesures dans diverses couches de neige, superficielles ou internes.

Pour chacune des couches de neige considérées, la dureté, la résistance et la cristallographie ont été relevées simultanément. Afin d'éviter les valeurs aberrantes, diverses précautions ont été prises :

- la valeur de résistance au cisaillement qui a été retenue est la moyenne de plusieurs mesures effectuées dans la même couche de neige, calculée en ignorant les deux valeurs extrêmes ;
- le cadre de cisaillement a été préféré au scissomètre à couronne car, même s'il est plus délicat à utiliser, il fournit vraisemblablement des valeurs plus exactes pour les couches de neige récente dans lesquelles il peut être glissé et non enfoncé, ce qui évite une augmentation de la résistance au cisaillement par prise de cohésion à la base des ailettes ;
- les tests de dureté ont été effectués en dégageant les couches de neige dominant la couche examinée (faute de quoi, les duretés des couches profondes sont surestimées) ;
- les cas où le résultat du test de dureté était incertain ont été éliminés de l'échantillon.

On notera enfin que les neiges présentant une dureté supérieure à 4 n'ont pas été étudiées car leur résistance exacte ne paraît pas très informative et est difficile à mesurer.



Figure 7 : Mesure de résistance au cisaillement, accompagnée d'un test manuel de dureté  
(campagnes de mesures METEORISK)

A l'issue de ces campagnes de mesures, des correspondances entre les résultats des tests de dureté et les valeurs mesurées au cadre de cisaillement ont pu être établies. Ces correspondances ne sont bien sûr (et malheureusement) pas univoques : à chaque classe de dureté correspond un certain intervalle de valeurs de résistance au cisaillement. C'est dans les neiges tendres (dureté 1 et 2) que ces intervalles sont les plus larges (en restant cependant d'une étendue raisonnable). Cette imprécision a pu être réduite en différenciant ces neiges selon leur cristallographie.

Les correspondances trouvées entre duretés et résistances sont implicitement retranscrites sur le formulaire : les écarts entre les lignes verticales de ce formulaire représentent fidèlement, en effet, les écarts entre les valeurs de résistance ; on aura compris que l'axe horizontal du formulaire représente donc la résistance au cisaillement, exprimée en  $N/m^2$  (la force étant appliquée tangentielle au plan et non perpendiculairement) ; la graduation de cet axe n'est pas indiquée pour ne pas surcharger le graphique mais aussi parce qu'il sera plus judicieux de considérer le type de profil obtenu que les valeurs relevées.

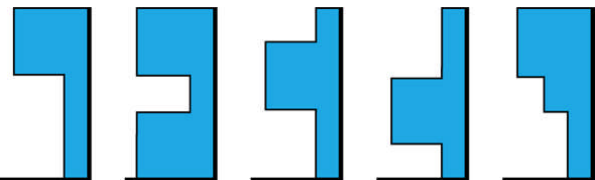
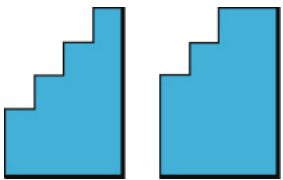
### 3. Le profil nivologique simplifié : interprétation

Les différentes résistances rencontrées au sein du manteau neigeux peuvent dessiner une multitude de profils différents. Schématiquement, on peut distinguer 6 types de profils, certains caractérisant des manteaux neigeux solides, d'autres étant plutôt révélateurs d'instabilité comme :

- les profils filiformes,
- les profils à indentations et à résistances modérées.

Ces deux types de profil sont souvent alarmants, en particulier lorsque l'on observe :

- une nette différence de la taille des grains de deux couches superposées ( $> 1 \text{ mm}$ )
- une couche de faible résistance constituée de grains de forte taille ( $> 1 \text{ mm}$ )

| Conditions généralement instables                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Conditions généralement stables                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p><b>Profils filiformes à faibles résistances.</b><br/>Ces profils décrivent soit des manteaux totalement détrempés, soit des manteaux formés par de fortes chutes de neige récentes. Ils coïncident presque toujours avec des crues avalancheuses avec nombreux déclenchements spontanés ou provoqués.</p>                                      |  <p><b>Profils massifs à fortes résistances.</b><br/>Les manteaux (souvent des névés) sont en principe stables sauf s'ils reposent sur des plans lisses et lubrifiés, n'offrant aucun appui aval. Les avalanches, exceptionnelles, sont plutôt des avalanches de fond spontanées.</p>                           |
|  <p><b>Profils à indentations et à résistances modérées.</b><br/>Ces profils correspondent à des manteaux ventés ou évolués. Les avalanches spontanées sont rares, mais des déclenchements provoqués par une surcharge sont souvent à craindre. Ces profils révèlent des situations complexes, difficiles à analyser et souvent dangereuses.</p> |  <p><b>Profils pyramidaux à résistances croissant rapidement depuis la surface vers la base du manteau neigeux</b><br/>Les manteaux sont généralement stables. Les avalanches sont rares et il s'agit plutôt de coulées de surface ponctuelles, concernant surtout les pentes raides.</p>                     |
|  <p><b>Profils pyramidaux inversés</b><br/>Ces profils sont peu fréquents sauf en début d'hiver. Ils constituent une classe particulière des profils à indentations. L'activité naturelle est souvent faible, mais le manteau est très sensible aux surcharges et des avalanches accidentelles sont possibles.</p>                               |  <p><b>Profil à indentations avec très forte résistance en surface</b><br/>Ces profils sont typiques des manteaux neigeux soumis au cycle dégel-regel printanier ou à un fort refroidissement après la pluie. Les avalanches sont très improbables tant que la couche de regel superficielle est épaisse.</p> |

#### 4. Le profil nivologique simplifié : potentiels et limites

Le profil nivologique simplifié présente des avantages mais aussi quelques inconvénients et, comme tout outil, il montre des potentiels et des limites qu'il faut bien cerner pour un usage convenable.

Les principaux avantages du profil nivologique simplifié sont les suivants :

- Il représente des résistances au cisaillement tangentiel qui paraissent plus significatives de l'état de stabilité du manteau neigeux que les résistances à l'enfoncement vertical d'une sonde sous l'effet de chocs que montre le sondage par battage ;
- Il est assez vite réalisé ; le randonneur peut ainsi le pratiquer au cours d'une sortie sans trop se retarder et le prévisionniste local peut facilement effectuer plusieurs relevés successifs, plusieurs fois par semaine, pour avoir une perception plus réaliste (car moins ponctuelle) du manteau neigeux.
- Il ne nécessite pas d'appareil de mesure, ce qui signifie qu'il n'implique pas d'achat coûteux, pas d'entretien périodique, pas de surcharge dans le sac, pas d'encombrement limitant la mobilité... Seules la pelle et la sonde, qu'on emporte toujours en randonnée hivernale, un formulaire, un crayon, et quelques connaissances nivologiques de base sont nécessaires pour réaliser un profil nivologique simplifié. Le randonneur et le guide peuvent donc le pratiquer sans difficulté. Le prévisionniste, quant à lui, emportera un thermomètre, un carottier et un peson pour effectuer un relevé complet. La loupe et la plaquette ne sont pas indispensables mais peuvent faciliter l'identification des grains de neige. Tout cela reste léger et peu encombrant...
- Le résultat est immédiatement visualisable, sur le terrain, car aucun calcul n'est nécessaire pour tracer le profil des résistances ; il est donc très utile pour les prises de décision immédiates mais aussi sur un plan pédagogique.
- Il est d'un apprentissage facile et rapide ; il suffit d'un peu d'attention et de quelques notions de nivologie pour pouvoir réaliser un profil nivologique simplifié ;
- Les risques de relevé erroné sont limités ; une couche mince et fragile ne peut pas facilement passer inaperçue comme lors d'un sondage par battage.
- Il peut facilement être réalisé par une seule personne. Pour un service des pistes, il est donc aussi peu coûteux en ressources humaines qu'en matériel.

Le profil nivologique possède cependant aussi quelques limites :

- Il faut le pratiquer régulièrement pour savoir l'exploiter avec discernement.
- Certaines des valeurs reportées sont estimées et non mesurées.
- Il demande une part d'interprétation lorsque les couches sont trop minces pour pouvoir y pratiquer le test de dureté.
- Les couches fragiles très minces sont parfois difficiles à détecter par un observateur peu expérimenté. Un test de stabilité rapide comme le test de la pelle est alors un excellent complément au profil nivologique simplifié (comme au sondage par battage traditionnel d'ailleurs).
- Il nécessite de creuser un trou dans la neige, ce qui peut être fastidieux lorsque le manteau neigeux est épais.

## Conclusion

Chacun pourra dresser son propre bilan de ces avantages et inconvénients en fonction de ses besoins, sans oublier que le profil nivologique simplifié ne se veut qu'un outil simple, permettant au randonneur de voir « plus loin » que la surface de la neige, et au prévisionniste de disposer plus facilement d'une information moins ponctuelle sur la structure du manteau neigeux.

Et bien sûr, on n'oubliera pas de prendre en compte les paramètres topographiques pour évaluer la stabilité du manteau neigeux, et les vulnérabilités pour finalement estimer le risque...

## Rappels : les tests manuels

La dureté d'une couche de neige peut être qualifiée par la possibilité d'y enfoncer horizontalement le poing, les 4 doigts serrés, un doigt, le crayon ou seulement la lame du couteau. Ainsi la neige est dite :

- très tendre si l'on peut y enfoncer le poing (code : 1),
- tendre si l'on peut y enfoncer au plus les 4 doigts serrés (code : 2),
- mi-dure si l'on peut y enfoncer au plus 1 doigt (code : 3),
- dure si l'on peut y enfoncer au plus un crayon (code : 4),
- très dure si l'on ne peut y enfoncer que la lame du couteau (code : 5).

Pour rendre compte de l'humidité de la neige, on pratique un test manuel qui consiste à essayer d'en faire une boule. La neige est considérée :

- sèche s'il est impossible de faire une boule (code : 1),
- peu humide si le gant reste sec en faisant la boule (code : 2),
- humide si le gant est humide en faisant la boule (code : 3),
- mouillée si de l'eau coule en serrant la boule (code : 4),
- très mouillée s'il s'agit d'une "soupe épaisse", mélange de neige et d'eau (code : 5).

NB : les tests doivent être effectués avec les gants.

Formulaires de profil nivologique simplifié disponibles gratuitement sur demande à *METEORISK*

Remerciements à Baptiste Fournier et Armand Dussex qui ont participé à cette étude pour laquelle les travaux passés de Laurent Rey et André Roch ont constitué de précieux repères.