

Chapitre 4

Comment connaître les caractéristiques d'un manteau neigeux?

Christophe ANCEY

L'OBJET DE CE CHAPITRE est de donner des indications sur les méthodes pratiques d'investigation des caractéristiques du manteau neigeux. Le premier paragraphe s'intéresse aux sondages par battage et stratigraphique, qui sont couramment utilisés au sein du réseau nivo-météorologique de Météo-France ; l'accent est surtout mis sur l'analyse des histogrammes de battage. Le deuxième paragraphe donne quelques moyens plus sommaires d'investigation et s'adresse surtout aux skieurs et autres randonneurs. Le dernier paragraphe met l'accent sur les renseignements que l'on peut tirer d'une observation directe de la surface du manteau neigeux.

4.1 Connaissance du manteau neigeux

4.1.1 Paramètres physiques du manteau

Pour comprendre un peu mieux la structure et les caractéristiques d'un manteau neigeux donné, on cherche à quantifier un certain nombre de grandeurs représentatives des propriétés que l'on souhaite étudier. Tout d'abord, on cherche généralement à décrire la structure du manteau et à cet effet on réalise une coupe verticale pour mettre en évidence la superposition des différentes couches. C'est l'objet du sondage stratigraphique. Ensuite, on essaye de caractériser ces couches

par le relevé d'un certain nombre de mesures ou de données qualitatives :

- la *hauteur* de la couche : le profil étant vertical, la hauteur d'une couche est mesurée verticalement avec un décimètre. Il faut prendre garde de ne pas confondre avec l'épaisseur de la couche (mesurée selon la perpendiculaire à la ligne de pente) ;
- la *nature des grains* : on donne le type de grains et leur diamètre moyen. Dans certains cas, une même couche est constituée de plusieurs sortes de grains et on les indique par ordre d'importance. L'observation se fait à la loupe, plus rarement à l'œil nu (valable pour des gobelets), mais elle est parfois délicate à réaliser sur le terrain [1]. L'usage de l'iso-octane permet d'observer au microscope les grains longtemps après leur prélèvement [2] ;
- la *masse volumique* : c'est la masse de neige contenue dans un volume d'1 m³. Elle se mesure en pesant la masse de neige contenue dans un carottier. La masse volumique dépend de nombreux paramètres, notamment l'humidité, le degré de vieillissement, etc. Elle varie entre 20 et 600 kg/m³ ;
- la *température* : elle est mesurée par une sonde électronique ou avec un thermomètre classique ;
- la *teneur en eau liquide* (TEL) : c'est une mesure de l'humidité de la neige. On parle en général de TEL volumique mais il existe aussi une TEL massique. On la définit comme le rapport du volume d'eau liquide sur le volume total de neige (en %). On la détermine à l'aide d'un appareil basé sur l'atténuation des ondes radioélectriques. Dans tout le texte, seule la TEL volumique sera utilisée ;
- les *caractéristiques mécaniques* : on mesure la *résistance au cisaillement* à l'aide d'un scissomètre (cf. chap. 6, § 1.5.1.) et la *résistance à la pénétration* à l'aide d'un sondage par battage (ou plus sommairement par un test manuel).

4.1.2 Sondages stratigraphique et par battage

Les nivo-météorologues arrivent à donner une description relativement complète du manteau neigeux à l'aide d'une série de sondages stratigraphiques et de battage. Un sondage est caractéristique d'une pente, d'une exposition, d'une altitude, et d'un instant donné : sous forme d'un histogramme, il donne strate par strate le type de grains, des valeurs de résistance mécanique, d'humidité, de température.

Principe

Un profil stratigraphique est précédé en général par un sondage par battage. Cette méthode est issue des études géotechniques pour étudier le sol lors de la construction d'ouvrages. Elle consiste à enfoncer un tube en laissant tomber le long d'une tige un poids (appelé mouton, de poids P) d'une distance fixée h . L'opérateur fixe cette hauteur h pour avoir approximativement un enfoncement de 1 cm par lâcher.

On réitère l'opération n fois jusqu'à ce que cet enfoncement soit compris entre 3 et 5 cm. On continue ainsi de suite jusqu'à la pénétration totale. Lorsque la sonde a une longueur insuffisante, on la rallonge avec des tubes supplémentaires

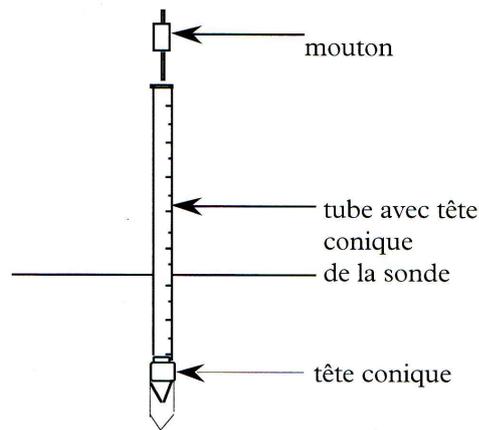


Figure 4.1 Schéma de principe d'une sonde de battage

(de longueur 100 cm). On désigne par q le nombre de tubes utilisés et Q le poids de la tige (en général $Q = 1 \text{ kgf}^1$). En connaissant la mesure de la pénétration de la sonde (notée d en cm), on détermine une résistance au battage R :

$$R = \frac{nhP}{d} + P + qQ.$$

La résistance à la pénétration donne une idée de la cohésion des couches suffisamment épaisses et, plus difficilement, une idée des résistances à la traction et à la compression. Il faut retenir que, plus la résistance R est élevée, meilleure est la cohésion de la couche.

On reporte le profil de battage sous forme d'un histogramme que l'on complète par la mesure de la masse volumique, de la TEL et en précisant la nature de chaque grain (F1 désigne le type de grains majoritaires, F2 indique le type de grains minoritaires) et leur diamètre moyen (D_m). Ces mesures sont effectuées en creusant une tranchée verticalement dans le manteau pour effectuer le sondage stratigraphique. Le profil stratigraphique permet d'individualiser les différentes strates. Un indice sommaire permet d'évaluer la dureté (D) de chacune selon que l'on enfonce :

- le poing (dureté 1) ;
- les quatre doigts (dureté 2) ;
- un doigt (dureté 3) ;
- un crayon (dureté 4) ;
- un couteau (dureté 5).

On peut de même se faire une idée du degré d'humidité (H_u) de la couche en essayant de former des boules de neige avec une main gantée. On attribue :

- le degré 1 lorsque la confection de boules est impossible (neige sèche),
- le degré 2 lorsque cela est possible (neige peu humide),
- le degré 3 lorsque la boule mouille le gant (neige humide),
- le degré 4 lorsque l'eau suinte de la boule (neige mouillée),

1. en kgf pour kilogramme-force où $1 \text{ kgf} = 10 \text{ newtons}$.

- le degré 5 lorsque l'on est en présence d'un mélange eau+neige.

Le profil stratigraphique permet aussi de mettre en évidence l'existence de couches minces dont la faible épaisseur empêche la détection par la méthode de battage classique. Le choix de la situation du sondage est essentiel pour que le sondage soit représentatif du manteau. L'extrapolation à d'autres pentes, altitudes, expositions est délicate. Il faut de plus noter qu'il n'y pas toujours une superposition précise du relevé stratigraphique et de l'histogramme de battage. Ce décalage éventuel est atténué par l'utilisation d'un pénétromètre dynamique (voir le *pandalp*, § 4.1.2). Il ne faut pas oublier de noter les conditions météorologiques au moment du sondage et la description du lieu.

Éventuellement, on peut mesurer la résistance au cisaillement d'une couche à l'aide d'un scissomètre, qui se compose d'un petit moulinet muni de quatre ailettes qu'on enfonce dans la neige. On tourne le moulinet jusqu'à avoir rupture de l'échantillon ; on peut relier la résistance au cisaillement à la valeur du couple exercé pour qu'il y ait rupture (voir chap. 6).

Représentation d'un sondage

La manière la plus facile de reporter les données est de les représenter sous forme d'un histogramme qui donne un profil de résistance (issu du sondage par battage) accompagné du profil de température. On juxtapose un tableau réalisé à partir des données du sondage stratigraphique : nature des grains (F1, F2), diamètre moyen (Dm), dureté (DUR), humidité (H), masse volumique (MV), et teneur en eau liquide (TEL) en fonction de la hauteur de neige (HHH). On complète en général par le descriptif du lieu (massif, date, exposition, altitude) et des conditions atmosphériques (température de l'air, nébulosité, précipitation, vent, etc.). À noter qu'il existe plusieurs variantes de représentation selon les pays.

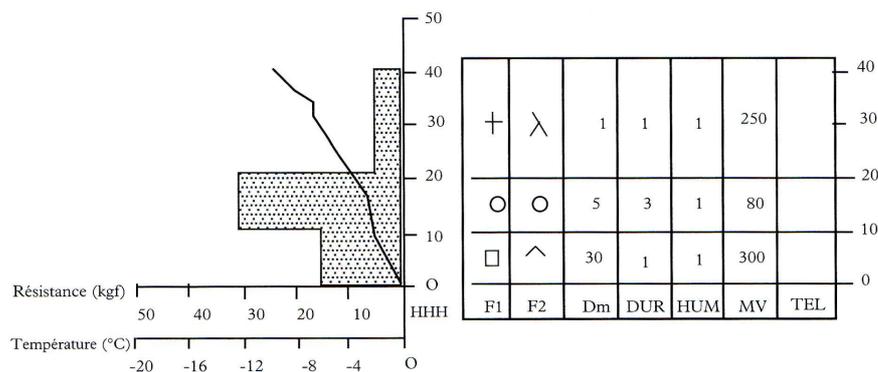


Figure 4.2 Type de représentation préconisé par Météo-France. HHH désigne la hauteur de neige en cm, F1/F2 le type de grains majoritaires/minoritaires, Dm le diamètre moyen, DUR et HUM les indices de dureté et d'humidité, MV et TEL, les mesures de masse volumique et de TEL.

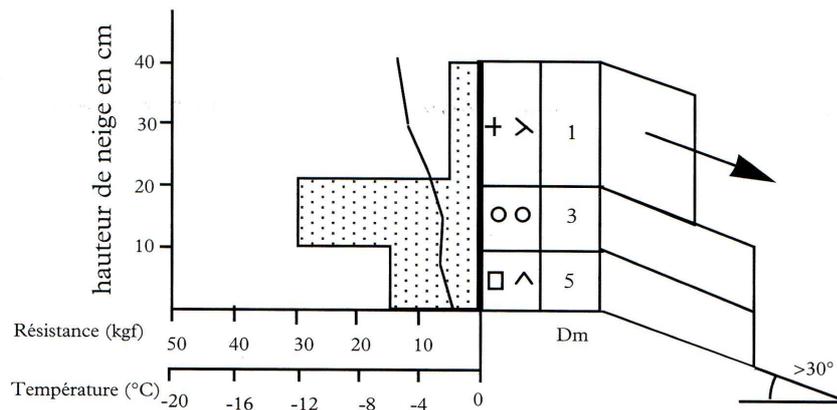


Figure 4.3 Type de représentation en usage en Suisse (IFENA) et aux États-Unis. La flèche indique qu'il y a eu un décrochement de la couche superficielle. La déclivité est indiquée également.

Analyse quantitative d'un sondage

La résistance au battage R traduit la cohésion de la couche. Une résistance inférieure à 4 kgf indique la présence d'une couche de faible cohésion tandis qu'une couche de résistance supérieure à 50 kgf est considérée comme solide. Les couches fragiles minces (épaisseur inférieure à 2 cm) ne sont pas détectables avec un sondage par battage ; il faut alors se ramener à l'utilisation de l'indice de dureté (D). Ce test manuel est l'équivalent grossier du sondage par battage (voir tableau 4.1).

Tableau 4.1 Table équivalence des tests de résistance à la pénétration.

Cohésion	Degré	Test manuel	R équivalente (kgf)
Très tendre	1	Poing	0–2
Tendre	2	4 doigts	2 – 15
Dur	3	1 doigt	15 – 50
Très dur	4	Crayon	50–100
Compact	5	Couteau	> 100

La température permet de préciser les processus de métamorphoses en cours. Pour des conditions nivo-météorologiques pérennes, le calcul des gradients couplé à l'analyse morphologique des couches permet de faire des hypothèses sur l'évolution du manteau. Si la température de la neige est de 0°C , il y a présence d'eau liquide et mesurer la TEL. Le troisième paramètre, la TEL, permet d'apprécier l'humidité des couches. Si une faible valeur de la TEL (le seuil est voisin de 5 %) permet d'accroître la stabilité (cohésion capillaire), des valeurs supérieures au seuil augmentent l'instabilité de la couche.

Analyse qualitative d'un sondage

Le profil de résistance permet de subdiviser le manteau en quelques parties homogènes (où la résistance à la pénétration est du même ordre de grandeur). L'allure du profil de battage est régulièrement croissante si les résistances sont croissantes

en allant de la surface vers le sol. On peut aussi déceler les couches fragiles, qui confèrent au manteau une structure en plaques, c'est-à-dire une succession irrégulière de couches cohérentes séparées par des couches fragiles (de plus ou moins grande épaisseur). Une analyse plus fine doit tenir compte par la suite des renseignements concernant la morphologie, la masse volumique, l'humidité, l'épaisseur de chaque couche et la nature des liaisons entre couches. Dans ce dernier cas, une attention tout particulière doit être portée dès que l'on rencontre une discontinuité ou une couche mince entre deux parties bien individualisées :

- surface de contact entre une vieille neige (dont la métamorphose est bien avancée) et une neige récente ;
- couche intermédiaire de faible cohésion : givre de surface enneigé ou couche de gobelets ;
- croûte de regel ou lamelle de glace
- surface de contact entre de la neige sans cohésion et la partie supérieure (couches superficielles).

Exemples de sondage stratigraphique

Les figures suivantes illustrent quelques exemples de sondage et leur analyse.

- Manteau neigeux à structure de plaque dure.
- Manteau neigeux de printemps.
- Manteau neigeux de faible cohésion.
- Manteau neigeux après une chute neige.
- Manteau neigeux après un épisode neigeux.

Perspectives dans l'utilisation du battage : le pandalp

Depuis 1992, un nouveau système issu des techniques utilisées en reconnaissance des sols a été testé : il s'agit du Pandalp (pour *pénétromètre autonome numérique dynamique assisté par ordinateur*) qui permet d'automatiser l'acquisition des données et les procédures liées à la manipulation de la sonde. En revanche, contrairement au sondage classique (il faut n coups pour que la sonde s'enfonce d'une distance d), le pandalp calcule une résistance dynamique à la pénétration en connaissant l'enfoncement et la vitesse d'enfoncement pour un coup donné (relation empirique donnée par la formule des Hollandais). Un tel système nécessite en outre un seul opérateur et si le temps de préparation du matériel est plus long par rapport à la méthode classique, l'exécution du profil est nettement plus rapide. En revanche son prix (environ 6000 euros) et les précautions de manipulation du matériel sont actuellement les freins au développement du Pandalp. La finesse du résultat est considérablement augmentée ; les strates minces sont plus facilement détectables [4]. La prévision du risque d'avalanche réalisée à partir de sondages par battage s'en trouve dès lors améliorée.

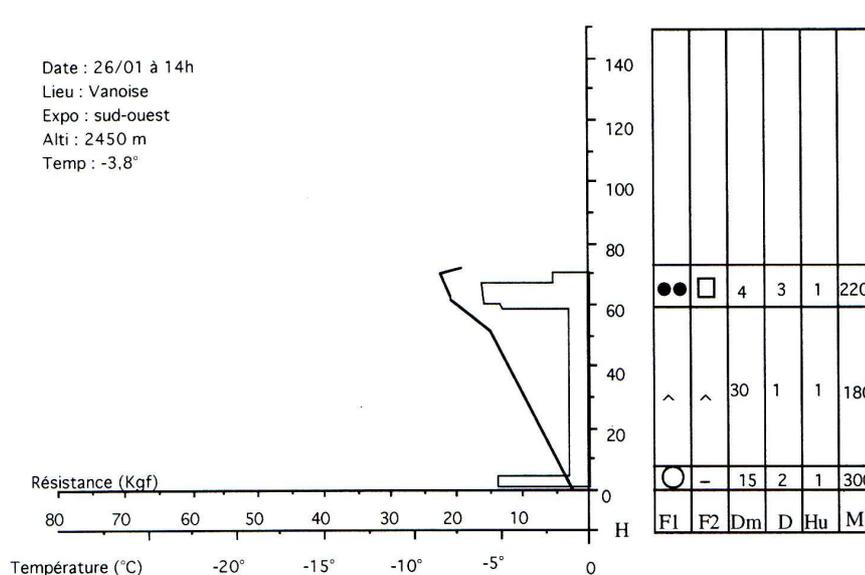


Figure 4.4 Profil réalisé dans le massif de la Vanois par beau temps le 26 janvier à 14h à 2450 m. Le profil met en évidence l'existence d'une plaque de faible épaisseur (10 cm), composée de grains fins (neige légèrement ventée?) et de grains à faces planes (métamorphose de gradient moyen due aux conditions anticycloniques régnant depuis plusieurs jours). Cette plaque repose sur une épaisse couche de gobelets (50 cm) de faible cohésion. Cette couche d'épaisseur importante date probablement de décembre (temps sec et froid). Le gradient de température est encore important (jusqu'à $0,18^\circ/\text{cm}$ entre 40 et 50 cm). On peut considérer ce manteau comme instable compte tenu de la superposition d'une plaque dure (solidité moyenne, faible épaisseur) sur une grosse couche de faible cohésion : il a provoqué la mort d'un skieur retrouvé enseveli sous 1,50 m de neige. D'après [3].

Limites d'utilisation du sondage stratigraphique

Dans l'analyse précédente, l'étude de la stabilité et du risque d'avalanche n'a été qu'évoquée (voir chap. 6 et 10 pour plus de détails). La prévision du risque à partir de ce type de sondages n'est pas toujours évidente : une interprétation fine est affaire de spécialistes. Par ailleurs, il faut signaler que :

- la résistance à la pénétration donne une idée de la cohésion au sein de la couche, mais ne donne aucun ordre de grandeur de la résistance à la traction ou du frottement entre deux couches, alors qu'ils constituent les deux paramètres essentiels dans la détermination du risque ;
- une bonne cohésion n'est pas synonyme de stabilité, justement à cause de la possibilité de glissement possible entre deux couches, qui est indépendante de la cohésion de chacune des deux couches ;
- les sondages réalisés sur des zones plates ne sont pas toujours représentatifs d'une pente donnée (l'extrapolation est délicate). De plus, le manteau étant un matériau stratifié anisotrope, la résistance à la pénétration varie selon la direction de la sonde : pour un manteau neigeux aux caractéristiques identiques (épaisseur, nature des grains, etc.), le profil de battage aura une forme

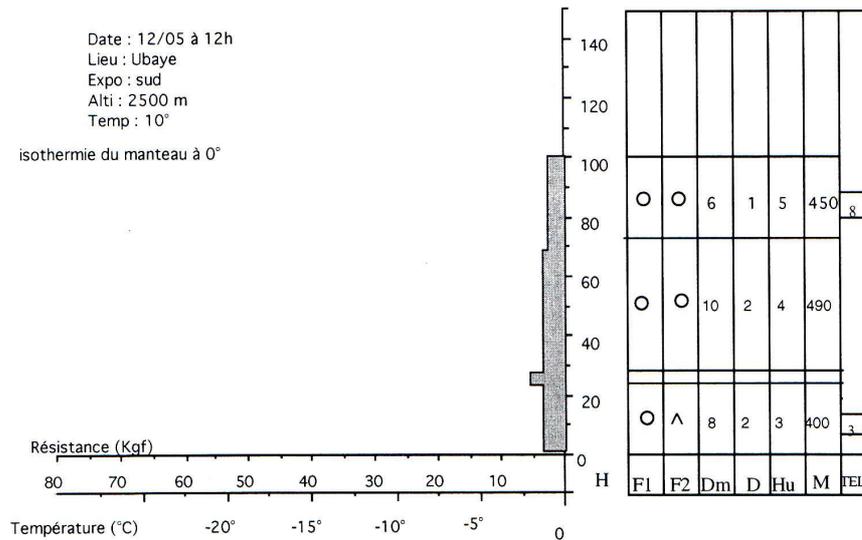


Figure 4.5 Profil réalisé dans la vallée de l'Ubaye par beau temps le 12 mai à 12h à 2500m d'altitude. L'ensemble du manteau est de faible cohésion et largement humidifié. La TEL est supérieure à 6 % sur la quasi-totalité du manteau, ce qui indique le « pourrissement » de l'ensemble du manteau qui est déjà ancien (la masse volumique approche dans la partie médiane les 500 kg/m³). Le risque d'avalanche (mobilisant de la neige lourde) n'est pas négligeable. D'après [3].

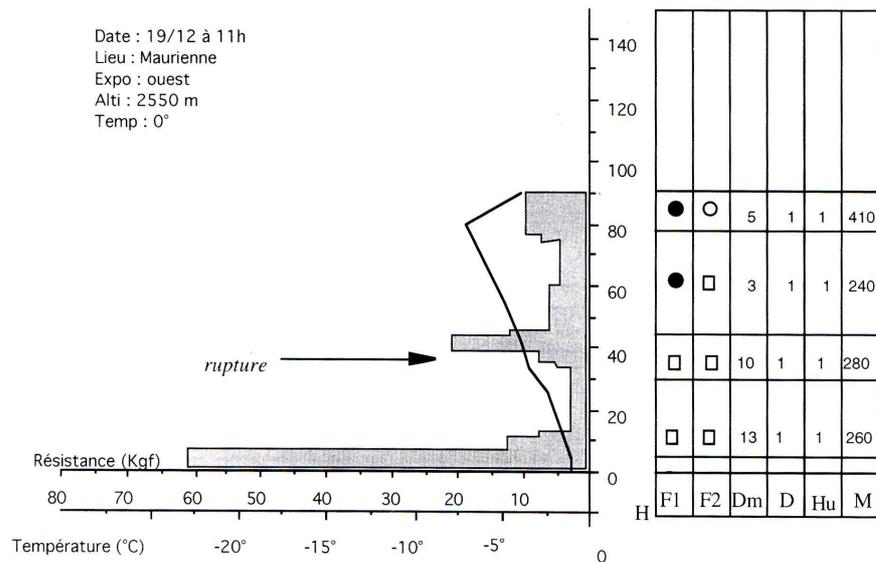


Figure 4.6 Profil réalisé dans la vallée de la Maurienne par temps couvert le 19 décembre à 11h à 2550 m. Le manteau est composé de neige froide et dense mais de faible cohésion. Il présente une structure en sandwichap. Deux couches (entre 60 et 75 cm et entre 10 et 40 cm) sont visibles et présentent une résistance faible (moins de 8 kgf). La partie inférieure (de 5 à 55 cm) du manteau est composée essentiellement de faces planes. Il s'agit d'un couvert neigeux fragile qui est parti naturellement en avalanche avec départ en plaque. La rupture a affecté les cinquante premiers centimètres en surface (entre 40 et 90 cm). La raison du départ et de la ligne de fracturation (en pleine pente) ne sont pas élucidées. Le sondage n'a été effectué que le lendemain.

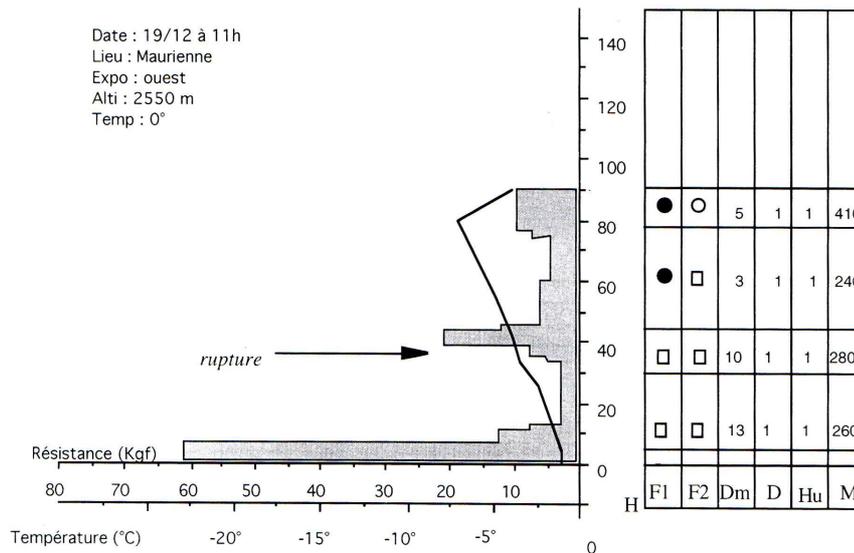


Figure 4.7 Profil réalisé dans la vallée de la Maurienne par beau temps le 10 avril à 16 heures à 2160 m. Le manteau se structure *grosso modo* en 3 parties : à la base, on trouve une épaisse couche de neige transformée (grains fins et ronds sur 40 cm) dont la résistance à la pénétration présente d'importantes variations (entre 10 et 50 kgf). Juste au-dessus, on est en présence d'une couche de faces planes (croûtée à l'interface) sur une vingtaine de centimètres ; sa résistance est médiocre (environ 3 kgf). La couche superficielle est composée de particules reconnaissables en cours de métamorphose (apparition de faces planes), elle reste encore légère (poudreuse skiable). Cette configuration du manteau est responsable d'une avalanche accidentelle ayant emporté deux skieurs (1 victime, 1 blessé). La rupture a mis en mouvement les 40 cm en surface.

différente entre un sondage à plat et un sondage dans une pente à 30° ;

- de ce fait, deux profils stratigraphiques et de battage peuvent se ressembler sans que le risque soit identique [5].

4.2 Moyens sommaires d'investigations

Le sondage de battage et la mesure des paramètres physiques nécessitent un appareillage dont la grande masse des pratiquants ne dispose pas. Pour connaître le manteau neigeux, il existe d'autres méthodes plus sommaires, certes, mais assez utiles. Ces méthodes sont plus ou moins rapides à mettre en œuvre et peuvent donc être facilement utilisées sur le terrain, par exemple durant une sortie à skis lorsqu'on a des doutes sur la stabilité². En outre, elles constituent à la fois un moyen ludique de se familiariser avec la neige et un bon outil pédagogique pour expliquer la constitution d'un manteau neigeux lors de cours sur le terrain.

2. Ce chapitre n'aborde que les méthodes d'investigation du manteau neigeux : elles permettent de se faire une idée sur sa constitution et sur ses propriétés (dureté, cohésion, humidité, etc.), mais ne déterminent pas directement une échelle d'instabilité ou du risque d'avalanches (voir les méthodes du coin suisse ou du bloc norvégien au chap. 6).

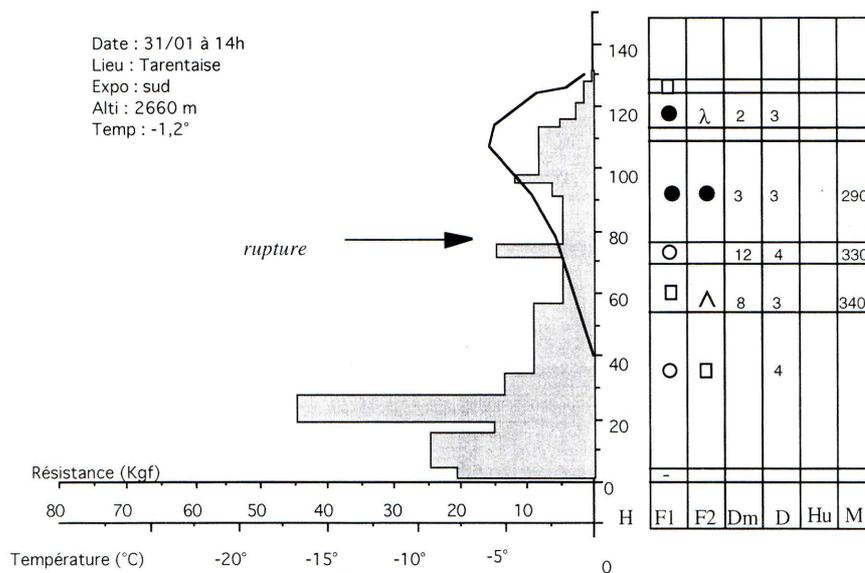


Figure 4.8 Profil réalisé dans la vallée de la Tarentaise par beau temps le 31 janvier à 14 heures à 2660 m. Le manteau neigeux se scinde en deux parties bien distinctes séparées par une croûte de regel entre 72 et 78 cm. La base résulte des importantes chutes de neige qu'il y eut en décembre ; elle a été largement humidifiée (grains ronds) par le redoux qui a suivi. Dans sa partie supérieure, la couche de faces planes et gobelets doit résulter des chutes de neige du début janvier après lesquelles a régné une assez longue période de beau temps, froid et sec. Au-dessus, on a une couche épaisse de grains fins (50 cm) correspondant aux dernières précipitations : en effet, à la fin du mois, le temps s'est rapidement détérioré, avec des chutes de neige jusqu'en basse altitude (25 et 26 janvier) accompagnées de très violentes bourrasques. Le jeudi 26 a été une journée de transition, ensoleillée et sans vent. Ce dernier a soufflé de nouveau violemment le vendredi 28 jusqu'au samedi 29. Le temps était très beau. Une avalanche avec départ en plaque, concernant cette dernière partie (plan de glissement sur la croûte de regel) a été déclenchée, l'après-midi du 29, par le passage d'un groupe de skieurs. Il y a eu 7 personnes emportées, une seule a survécu.

4.2.1 Profil stratigraphique sommaire

L'idée est de reprendre le principe du sondage stratigraphique ; le sondage par battage est remplacé par un test manuel : après avoir creusé la tranchée verticale sur une hauteur suffisante (au moins 1 m), on peut évaluer sommairement la dureté et l'humidité des couches par les tests décrits au § 4.1.2 (enfouissement de la main et confection de boules) ; à l'œil nu, on peut discerner certains types de grains (les gobelets par exemple sont très facilement identifiables). Quant à l'interprétation du risque d'avalanches, le lecteur peut se référer aux chapitres 6 et 10.

4.2.2 Test de la pelle

D'autres tests peuvent également fournir rapidement des données intéressantes, comme le test de la pelle. Il existe plusieurs variantes de ce test sous la même désignation.

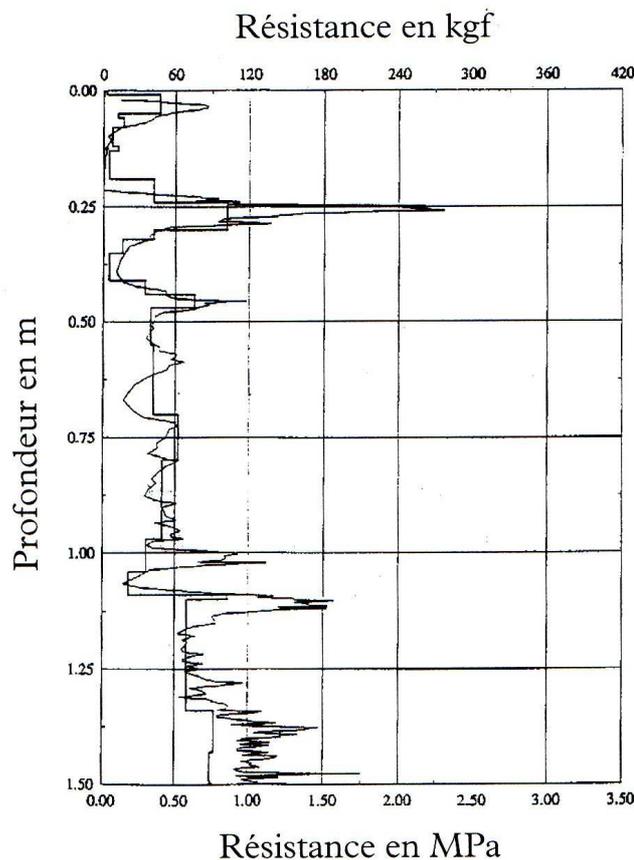


Figure 4.9 Le graphique permet de confronter les résultats donnés par le Pandalp et le sondage classique. Le test a été effectué au col du Lac Blanc (Alpe-d'Huez) le 30 mars 1993. Il s'avère qu'il y a eu une bonne concordance générale des deux courbes même s'il existe des différences d'estimations pour certaines strates (celle à 25 cm de profondeur par exemple). On remarque aussi que le Pandalp détecte certaines couches ignorées par le battage classique (à 1,10 m de profondeur par exemple). D'après [4].

Méthode de Faarlund

Cette méthode permet de détecter les plans préférentiels de glissement (et donc évaluer la quantité de neige mobilisable en cas de départ) et de se faire une idée très sommaire de la résistance au cisaillement. Après avoir creusé une tranchée (possibilité de faire un profil stratigraphique), on découpe à la pelle dans la première partie du manteau (jusqu'à trouver une couche fragile par exemple) un bloc de base trapézoïdale (hauteur et base de 60 cm, sommet de 20 cm). On dégage ses côtés en creusant une tranchée (d'une largeur de pelle) pour éviter les frottements lors du test ; par la suite, on tire vers soi le bloc : plus la résistance est grande, plus le glissement d'une plaque est improbable. Quoique normalisé par certains, ce test est très subjectif et demande de l'expérience pour un résultat rapide mais à la fiabilité moyenne. Par parenthèse, on peut signaler que c'est un test très apprécié par les nord-américains [6].

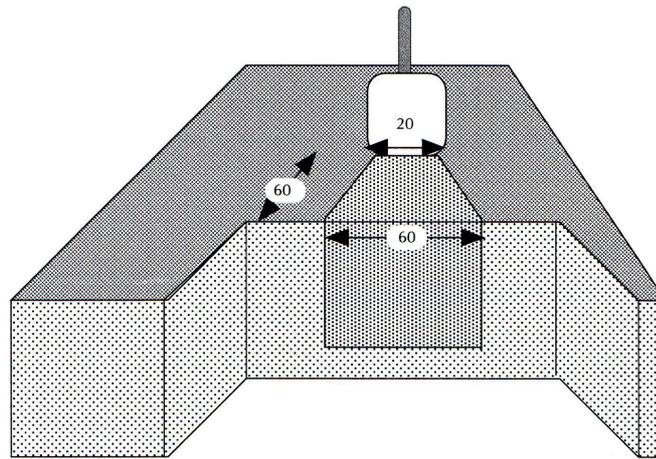


Figure 4.10 La méthode de Faarlund. Il existe de nombreuses variantes. Celle-ci est celle indiquée par l'IFENA en Suisse. Les nord-américains, qui l'utilisent beaucoup, optent pour un bloc de forme carré de base 30 cm. Voir [6] et chap. 6.

Méthode de Munter

Cette méthode permet de se faire une idée de la cohésion de la neige fraîche, qui peut posséder plusieurs consistances. On place un bloc de neige sur une pelle que l'on secoue. La neige est « liée » si le bloc ne se désintègre pas en le soumettant à des vibrations; il y a alors début de frittage (*prise de cohésion*). Dans le cas contraire, il s'agit de neige feutrée (cohésion de feutrage). La neige liée a une cohésion suffisante pour transmettre des contraintes lors d'un déclenchement (cas présumé lors d'avalanches de plaques friables). La notion de qualité critique de neige est liée au début de frittage d'une neige poudreuse.

4.2.3 Test du bâton

Un test courant et très simple consiste à estimer la cohésion des couches superficielles en enfonçant le bâton (poignée ou rondelle). Ce test grossier permet de sentir la présence de couches superficielles sans cohésion (qui laissent passer le bâton) ou d'une croûte de regel (qui arrête le bâton). C'est un test très décrié par les uns (trop sommaire et imprécis) et souvent mis en avant pour les autres (très simple et rapide).

4.3 États de surface de la neige

Observer et comprendre la neige sont deux qualités essentielles du bon skieur, car elles conditionnent en partie plaisir et sécurité du ski. Le plus souvent, le pratiquant n'a d'informations que les renseignements visuels qu'il parvient à tirer de l'observation de la surface sur laquelle il évolue. Il est important qu'il soit en mesure d'apprécier rapidement et correctement un état de surface du manteau par une simple observation. Il faut toutefois garder à l'esprit que l'estimation d'un risque local d'avalanches ne peut se faire uniquement par un examen de surface et



Figure 4.11 Test de la pelle (méthode de Faarlund) accompagné d'un rapide stratigraphique. Cliché C. Ancey.

que le pratiquant, par curiosité ou en cas de doute, peut être amené à sonder le manteau neigeux plus en profondeur (voir § ?? et chap. 6 et 10).

4.3.1 Les neiges du skieur

Le skieur a adapté son vocabulaire pour décrire la surface de la neige. La première distinction se fait entre les « bonnes » et les « mauvaises » neiges selon la facilité à tourner et le plaisir de la descente, indépendamment de toute considération sur la stabilité et la sécurité. Son vocabulaire recoupe le vocabulaire scientifique, le détourne parfois (d'où parfois confusions et amalgames) ou se compose d'idiotismes imagés (cf. [7]).



Figure 4.12 La poudreuse est une neige recherchée (massif du Mont-Blanc). Cliché C. Ancey

Les bonnes neiges

La poudreuse est la neige idéale recherchée par le skieur : il s'agit d'une neige récente, peu ventée, pulvérulente (sèche et de faible masse volumique) et froide. On la qualifie de *neige profonde* dès que son épaisseur dépasse les 40 cm et qu'il n'y a plus de surface d'appui (neige dense ou dure) sous-jacente facilitant le virage. Rapidement, la poudreuse est soumise aux métamorphoses surtout en cas de redoux ou dans le cas d'un versant ensoleillé. La surface va alors se croûter et s'alourdir. L'action du vent est aussi très déterminante. Les accumulations dues au vent (dans les combes par exemple) peuvent dans certains cas garder un caractère poudreux. Il faut noter également que certaines neiges sans cohésion peuvent ressembler à de la poudreuse : d'importantes couches de gobelets ou de givre peuvent se former lors de conditions météorologiques favorables. Une neige poudreuse froide réchauffée en cours de journée par le soleil ou du vent peut devenir de la « neige collante » : il se



Figure 4.13 Une surface érodée est le signe d'une activité importante du vent avec transport de neige. Cliché C. Ancey.

forme alors des « sabots » de neige sous les peaux de phoque ou la semelle des skis ; on dit que les skis « bottent ». La « vieille poudreuse » est une neige déjà tassée et métamorphosée, composée de particules reconnaissables et de grains fins peu frittés et qui a gardé ses propriétés de neige sèche. C'est une neige qu'on rencontre souvent dans les couloirs ombragés dès le mois de mars, assez longtemps après une chute de neige ; elle est idéale pour la pratique du ski de couloir.

La *neige fondante* ou « neige transformée » est appelée encore neige de printemps ou bien neige « gros sel ». Tous ces termes désignent des neiges bien métamorphosées (grains ronds) dont la surface se ramollit et fond sur quelques centimètres sous l'action du soleil tandis que le fond reste dur (croûte de regel). Au cours de la journée (2 ou 3 heures après le début de la fusion superficielle au début du printemps), le ramollissement gagne les couches inférieures ; on parle de « polenta » ou de « soupe ». Si le réchauffement est important, tout le manteau neigeux est alors concerné ; on parle de « pourrissement » du manteau. La fonte dépend des conditions météorologiques (température de l'air, nébulosité, vent, etc.) : un vent froid par exemple peut freiner ce processus malgré le rayonnement solaire. On retrouve ce type de neige tant que le cycle gel/dégel perdure.

Les mauvaises neiges

La *neige mouillée* est une neige gorgée d'eau, lourde, difficile à manier et glissant peu sous les skis. C'est le cas lors d'une chute de pluie survenant après une chute de neige ou lors d'un réchauffement important du manteau (« soupe »). Gelée, elle devient très dure et verglacée.

La *neige soufflée* est une neige ayant subi sur place l'action du vent ou résultant d'un transport par le vent (dépôt dur, irrégulier et crissant sous les skis). Les

carres des skis accrochent mal et les skis vibrent sur cette surface irrégulière et compacte (on parle aussi de « tôle ondulée »). Le vent peut transporter de la neige pulvérulente (froide et sèche) et la déposer plus loin : dans certains cas, on assiste à la formation d'accumulation de neige dure, qui prend un aspect granulaire, mat, terne et qui reste communément (plus ou moins à tort, cf. chap. 2) appelée « plaque à vent ». Le vent a également une action sur la neige dure, qui se caractérise par un lustrage de la surface du manteau ; ce dernier prend alors un aspect lisse et brillant. La *neige croûtée* est une neige dont la surface comporte une croûte (de regel, de radiation, due au vent, de glace) qui se casse sous les skis et les bloque ou entrave leur mouvement. La « neige cartonnée » est une neige légèrement croûtée.

La *neige trafollée* est une neige qui a été tracée les jours précédents par des skieurs. Leurs traces ont parfois durci et rendent alors la surface irrégulière et désagréable à skier.

4.3.2 Hétérogénéité de la surface

L'épaisseur du couvert neigeux est extrêmement variable sur un site. À une échelle plus réduite, le manteau présente également de nombreuses hétérogénéités : ainsi sa surface présente des irrégularités de surface ou de dureté, dont nous présentons ici les principales caractéristiques.

Irrégularités de la surface

La surface de la neige est rarement homogène car elle subit l'action de plusieurs agents qui l'altèrent.

- La pluie humidifie dans un premier temps le manteau qui l'absorbe comme une éponge, mais au-delà d'une certaine quantité (liée à la percolation), l'eau ruisselle en surface, creuse des rigoles et des concavités qui donnent un aspect matelassé au manteau.
- Le soleil forme des « pénitents » (appelés encore « dents de fusion ») qui résultent de l'évaporation rapide de l'eau entourant les grains (film capillaire) dans des zones bien ensoleillées. Ces dents sont inclinées de 45° vers le sud et mesurent quelques centimètres sous nos latitudes.
- Le vent forme des rides et des formes sculptées appelées *zastrugis* qui indiquent une importante érosion de la zone. La neige se dépose plus loin en accumulations ou en plaques à vent. *Corniches, congères, rides, vagues, zastrugis, barkhanes* sont les signes évidents d'une activité passée ou récente du vent.

Changements superficiels de dureté

Comme la surface du manteau au contact de l'air est le siège d'intenses transformations, une modification de la structure du manteau intervient sur les premiers centimètres de la couche superficielle et y entraîne une variation de la morphologie granulaire et des caractéristiques mécaniques : on assiste alors à la formation de croûtes ou de plaques dont l'origine est diverse. La distinction entre croûte et plaque réside dans leur épaisseur respective : on entend par croûte une couche

superficielle durcie sur quelques centimètres (de 1 à 5 cm), dont la portance est faible, c'est-à-dire que la croûte casse sous le passage d'un skieur. La plaque désigne une couche durcie sur une épaisseur plus importante (plusieurs dizaines de centimètres) et donc généralement capable de supporter le poids d'un skieur. Les agents de formation sont le vent, le soleil, le gel et la pluie.

- L'action du vent dépend de sa vitesse et de la nature de la neige au sol. Lorsque sa vitesse est suffisante, il érode, transporte et dépose la neige reprise. Il agit d'autant plus facilement que la neige est pulvérulente, froide et sèche en surface.
- Le soleil provoque la fusion partielle des grains superficiels. Le gel nocturne donne naissance à une mince pellicule de glace qui donne un aspect vitrifié au manteau. Cette pellicule joue un rôle de serre : il semble en effet probable que sous la croûte de radiation, la neige fonde et qu'il se crée ainsi des espaces vides entre la pellicule et le reste du manteau.
- Le gel intervient dans plusieurs processus. De manière générale, la fonte de la neige en surface due au rayonnement ou à un redoux peut être suivie la nuit par le regel rapide de l'eau qui va souder les grains humidifiés. Si l'épaisseur concernée est faible, il se formera une croûte cassante et hétérogène. Le cas échéant, il se forme une plaque solide qui se ramollit la journée (cycle gel/dégel au printemps).
- Le gel, après la pluie, peut former des plaques de verglas ou de glace. La surface est dure et lisse.

Bibliographie

- [1] E. Brun et E. Pahaut, An efficient method for a delayed and accurate characterisation of snow grains from natural snowpacks, *Journal of glaciology* **37** (1991) 420–422.
- [2] E. Brun et L. Rey, *Bilan de la campagne de mesures mécaniques dans la neige effectuée sur le terrain dans l'hiver 1984-85*, Rapport interne 199, CEN, Grenoble, 1987.
- [3] ANENA, CEN, CAF, *Éléments de nivologie*, (ANENA, Grenoble, 1993).
- [4] J.-P. Navarre, A. Taillefer, R. Gourves, E. flavigny, Le Panda neige, *Neige et Avalanches* **66** (1994).
- [5] W. Munter, *Le risque d'avalanche*, (CAS, Berne, 1992).
- [6] T. Daffern, *Avalanche safety for skiers & climbers*, (Rocky Mountain Books, Calgary, 1992).
- [7] F. Burnier et D. Potard, Chamonix, mode d'emploi, Vertical, janvier 1994.

