

Le profil nivologique

Robert Bolognesi, METEORISK
contact@meteorisk.com



Puisqu'une avalanche résulte d'une rupture du manteau neigeux, il paraît logique d'ausculter ce dernier pour tenter d'y détecter une faiblesse. L'observation de sa constitution (cristallographies, duretés, humidités, températures, résistances et masses volumiques) est ainsi l'une des bases historiques de la prévision des avalanches.

Le profil nivologique s'inscrit pleinement dans cette approche. Il a été conçu pour répondre au mieux à la double nécessité de disposer rapidement d'une information pertinente sur la résistance des couches de neige pour établir une estimation quotidienne du risque local d'avalanches.

METEORISK



1. Le profil nivologique : fondements

L'idée de simplifier la mesure des résistances des couches de neige du manteau neigeux a été adoptée depuis longtemps par les services de prévision des avalanches de l'Armée suisse et par l'Institut SLF de Davos : le profil nivologique présenté ici ne constitue qu'une évolution d'une pratique déjà ancienne et bien connue. Pour autant, cette évolution n'est pas anodine car le profil nivologique présente deux avantages notables:

- il constitue un moyen efficace pour évaluer une donnée révélant mieux que toute autre l'état de stabilité du manteau neigeux : la résistance au cisaillement des couches de neige ;
- il peut être effectué rapidement, ce qui permet de multiplier les relevés et de disposer ainsi d'une information plus fiable.

Il se fonde sur une étude initiée à *METEORISK* au début des années 2000 dans le but de trouver un moyen simple de déceler d'éventuelles faiblesses dans le manteau neigeux. Cette étude comprenait trois volets distincts : une recherche bibliographique, une campagne de mesures et une analyse statistique des données recueillies.

► La recherche bibliographique a permis de rassembler des données issues d'études variées, effectuées dans divers pays dont la France, la Suisse et les Etats-Unis ; les travaux réalisés par André Roch (SLF) et par Laurent Rey et Eric Brun (CEN) ont fourni de précieuses informations.

► La campagne de mesure a consisté à relever simultanément, dans une même strate de neige, la dureté, la résistance au cisaillement (cf. fig. 1.a) et la cristallographie, et à répéter massivement cette opération dans des strates variées, des plus tendres aux plus dures. Un échantillon rassemblant plusieurs milliers de triplets de mesures effectuées dans tous les types de neige, a ainsi été constitué.



Fig. 1.a. Mesures de résistance au cisaillement.

Jugé plus fiable pour mesurer la résistance au cisaillement des neiges fraîches, le cadre de cisaillement a été préféré au scissomètre à couronne.

Afin d'écartier d'éventuelles valeurs aberrantes, plusieurs mesures de résistance ont été effectuées dans chaque strate et seule la valeur moyenne (calculée sans considérer les deux extrema) a été retenue. Par ailleurs, les tests de dureté ont été effectués après avoir déblayé les couches dominant la strate étudiée.

► L'analyse statistique, menée à l'issue de cette campagne de mesures qui s'est déroulée sur plusieurs hivers, a permis de mieux cerner la relation existant entre la dureté de la neige et sa résistance au cisaillement. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (cf. fig. 1.b).

		Dureté				
		1	2	3	4	5
Cristallographie	+	1 N/dm ²	/	/	/	/
	V					
	/					
	□	2 N/dm ²	9 N/dm ²	/	/	/
	∧					
	O	4 N/dm ²	15 N/dm ²	25 N/dm ²	40 N/dm ²	?
	•	/		[15-32]	[32-53]	
-	/	/	/	/		

Fig. 1.b. Résistances au cisaillement pour diverses duretés et cristallographies (synthèse de diverses campagnes de mesures)

Ces valeurs sont les moyennes arrondies des mesures moyennes. Les valeurs entre crochets indiquent les moyennes indicatives des minima et maxima. La résistance au cisaillement n'a pas été mesurée dans les neiges de dureté 5 car l'instrumentation de terrain ne le permet pas et car ces neiges ne sont guère susceptibles de se rompre pour donner lieu à une avalanche (la valeur de leur résistance au cisaillement n'est donc pas utile ici).

On constate que :

- la résistance moyenne au cisaillement des neiges très tendres (dureté 1) varie du simple au quadruple selon leur cristallographie, mais reste toutefois très faible : de 1 à 4 N/dm².
- la dispersion des valeurs mesurées est plus grande pour les neiges dures que pour les neiges tendres.
- la résistance au cisaillement des neiges mi-dures et dures est peu dépendante de leur cristallographie.

On en déduit qu'il est possible d'estimer la résistance au cisaillement d'une couche de neige sans devoir utiliser un scissomètre mais seulement à partir d'un simple test manuel de dureté éventuellement complété par l'observation de la cristallographie pour les neiges tendres.

L'étude s'est conclue par l'élaboration d'un formulaire permettant de dresser rapidement, sur le terrain, un profil des résistances du manteau neigeux (cf. fig. 1.c). Ce profil a été baptisé *profil nivologique* (et parfois nommé *profil nivologique simplifié* ou encore *profil nivologique rapide*) pour éviter toute confusion avec le *profil stratigraphique* associé au sondage par battage. Enfin, après divers relevés effectués sur des sites venant de connaître une avalanche mais aussi dans des pentes présentant un manteau neigeux stable, le profil nivologique a été jugé informatif et, dès 2005, il a été utilisé à METEORISK pour la prévision locale des avalanches en complément des autres relevés nivo-météorologiques.

Profil nivologique										
Lieu :										
Altitude : m		Déclivité : °		Orientation :						
Date :		Heure :		Réf.: 1						
Observateur(s) :										
Dureté (test manuel)					Grains	Humidité (1..5)	ρ (kg/m ³)	ϕ (1/10 mm)		
5	4	3	2	1						
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> © Robert Bolognesi METEORISK 150 cm </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 100 cm 2 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 50 cm </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Sol 15°C 10°C 5°C </div>										

N/dm² 40 25 15 9 4 2

Fig. 1.c. Formulaire permettant de dresser un profil nivologique du manteau neigeux

- ① Le cartouche permet de localiser, dater et référencer le relevé.
- ② La zone graphique permet de représenter les résistances au cisaillement (N/dm²) et les températures (°C) relevées au sein du manteau neigeux : quadrillage brun pour les premières, quadrillage bleu pour les secondes. L'axe vertical permet d'indiquer le niveau (base et sommet) des différentes strates du manteau neigeux.
- ③ Le tableau permet de décrire les strates en indiquant leur cristallographie (type et taille des grains de neige), leur humidité (test manuel) et leur masse volumique.

A l'aide de ce formulaire, il suffit de faire un test de dureté dans chacune des strates du manteau neigeux, après avoir fait une coupe, pour pouvoir dresser et visualiser aussitôt le profil de résistance (cf. chapitre suivant).

2. Le profil nivologique en pratique

2.1. Matériel nécessaire

On peut effectuer un profil nivologique avec un matériel très réduit : une pelle et une sonde à avalanche, un formulaire et un crayon suffisent ; mais pour effectuer un relevé complet, les outils suivants sont utiles :

- un thermomètre à sonde,
 - un mètre pliable,
 - un carottier avec un sachet et un peson,
- et éventuellement :
- une plaquette d'observation des grains de neige avec une loupe,
 - un pinceau large et doux ou une petite balayette,
 - un couteau.



Fig. 2.1.a. Matériel nécessaire pour effectuer un profil nivologique

Ce matériel se glisse facilement dans le sac à dos. L'opérateur reste ainsi très mobile et peut intervenir en terrain difficile si besoin.

2.2. Mode opératoire

Effectuer un profil nivologique est une opération facile à réaliser mais qui demande un peu de méthode. Voici comment procéder :

1 Choisir **avec soin** le lieu du relevé.

Chercher une zone représentative de celle que l'on souhaite analyser : on choisira en général une pente similaire aux zones de départ (déclivité, altitude et orientation semblables), en s'assurant qu'elle ne soit pas exposée à une avalanche ou à un autre danger (chutes de pierres ou de séracs par exemple) ; on déterminera le lieu adéquat en testant l'épaisseur et la constitution du manteau neigeux avec la sonde avalanche (cf. fig. 2.2.a, haut).

2 Creuser un trou jusqu'au sol ou jusqu'à une strate très dure (croûte de regel épaisse et difficile à entamer à la pelle, par exemple).

NB : Il est inutile de creuser au-delà d'une couche très résistante.

3 Lisser le plan vertical de coupe avec la pelle.

Si le plan de coupe est exposé au soleil, il faudra le « rafraîchir » régulièrement.

4 Distinguer les différentes strates du manteau neigeux.

Elles sont identifiables aux variations de texture, de couleur et de cohésion de la neige. On peut les marquer sur le plan de coupe pour bien les visualiser (cf. fig. 2.2.a, bas).

5 Décrire chacune des strates du manteau neigeux :

- mesurer la hauteur de la base et du sommet de la strate
- estimer la dureté de la neige par test(s) manuel(s)
- identifier le type de grain dominant et évaluer leur diamètre
- estimer l'humidité de la neige par test(s) manuel(s)

et éventuellement :

- relever les températures vers la base et le sommet de la strate
- mesurer la masse volumique de la neige

Dresser le profil de résistance, tracer éventuellement la courbe des températures, et reporter les données dans le tableau (cf. fig. 2.2.c).

6 Noter d'éventuelles informations complémentaires.

Par exemple : indiquer la présence de givre de surface ou de sable, mentionner le résultat d'un test de stabilité en indiquant le niveau de rupture, etc.

7 Compléter le cartouche.

Attention : un profil doit toujours être daté et localisé.



Fig. 2.2.a. Réalisation d'un profil nivologique

Après avoir choisi un lieu adéquat, creusé le trou, lissé le plan de coupe et repéré les différentes strates de neige du manteau neigeux, on procède aux tests de dureté. On pourra alors dresser immédiatement le profil des résistances.

*NB : dans les strates profondes, les tests de dureté doivent être effectués après avoir déblayé les couches supérieures, notamment s'il s'agit de strates fragiles.
(photos Ph. Aigroz).*

2.3. Interprétation

Les différentes résistances rencontrées au sein du manteau neigeux peuvent dessiner une multitude de profils, certains caractérisant des manteaux neigeux presque inébranlables, d'autres révélant des manteaux instables, parfois à la limite de la rupture.

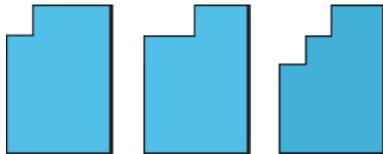
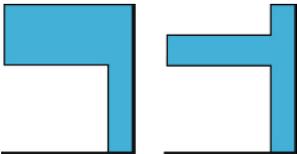
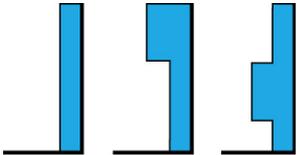
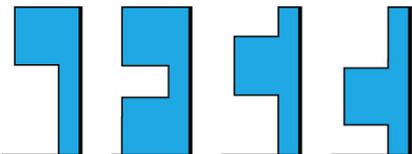
	Profil type	Interprétation
😊	 <p>Profils massifs avec fortes résistances</p>	<p>Profils révélant un manteau neigeux tassé et consolidé.</p> <p>Bonne stabilité sauf présence d'un plan de glissement (basal ou interne).</p>
😊	 <p>Profil avec très forte résistance en surface</p>	<p>Profils typiques des manteaux neigeux soumis au cycle dégel-regel printanier ou à un fort gel après la pluie.</p> <p>Très bonne stabilité tant que la croûte de regel subsiste.</p>
😞	 <p>Profils filiformes avec faibles résistances</p>	<p>Profils décrivant soit des manteaux totalement détrempés, soit des manteaux formés par d'abondantes chutes de neige récentes.</p> <p>Très forte instabilité : avalanche spontanée possible.</p>
😞	 <p>Profils à indentations à résistances faibles à modérées</p>	<p>Profils correspondant à des manteaux ventés ou en cours de tassement ou d'humidification.</p> <p>Forte instabilité : avalanche provoquée possible.</p>

Fig. 2.3.a. Interprétation basique des profils nivologiques les plus typiques.

On retiendra que les profils filiformes et les profils à indentations sont souvent alarmants, en particulier lorsque l'on observe :

- une nette différence de la taille des grains de deux couches superposées ;
- une couche de neige sèche à cohésion faible ou moyenne (dureté < 3) reposant sur une couche fragile (+, V, □, Λ) ou sur une croûte dure.

2.4. Exemples

Certains profils sont particulièrement révélateurs de l'instabilité, comme ceux qui montrent l'association « plaque friable sur couche fragile », souvent très dangereuse pour les skieurs randonneurs.

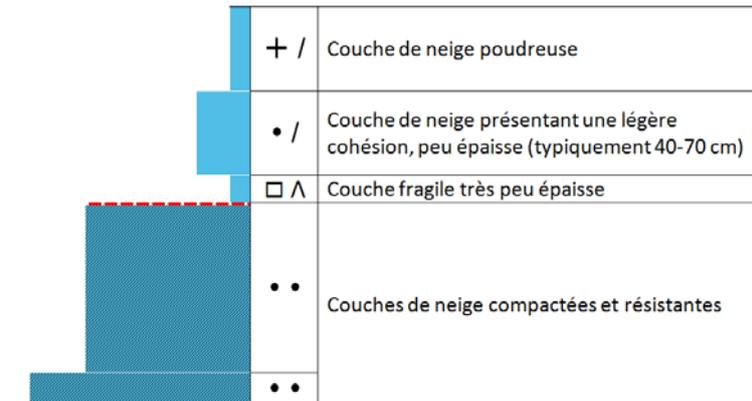


Fig. 2.4.a. Exemple de profil nivologique caractéristique de manteau neigeux instable.
Un manteau neigeux présentant une telle structure est susceptible de se rompre en cas de surcharge, générant alors une avalanche mobilisant ses couches supérieures.

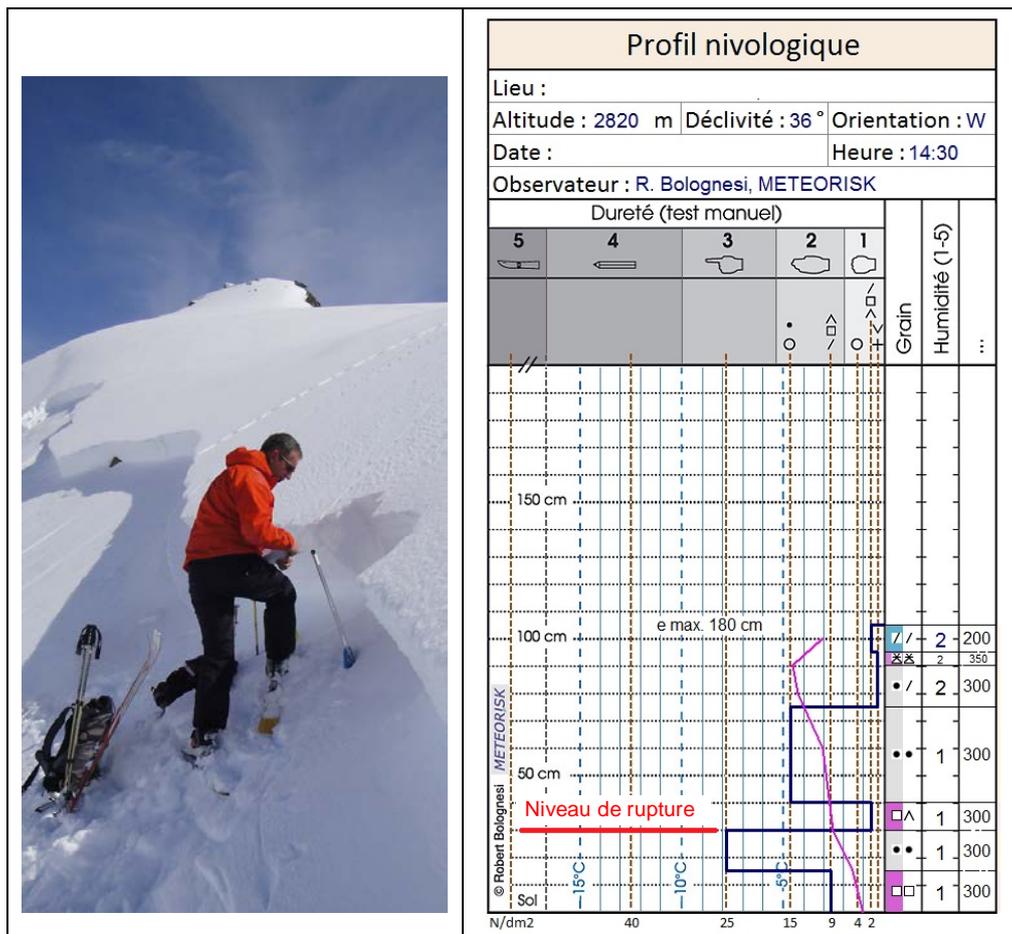


Fig. 2.4.b. Profil nivologique réalisé dans la zone de départ d'une avalanche accidentelle.
Ce profil constitue un véritable cas d'école : une structure à indentation très instable.
(photo R. Mayoraz).

2.5. Le logiciel *NivoGraph*

Le fait qu'il soit possible de dresser immédiatement, sur le terrain, une représentation graphique des résistances du manteau neigeux constitue un avantage appréciable pour émettre, confirmer ou partager rapidement un avis sur le danger ponctuel d'avalanche.

Cependant, pour élargir les possibilités d'analyse, un logiciel a été développé à *METEORISK* (R. Bolognesi) dès l'hiver 2007-08. Ce logiciel, nommé *NivoGraph*, est intégré à l'environnement informatique *NivoLog*. Il permet d'enregistrer un profil nivologique sous deux formes numériques : comme fichier de données d'une part et comme image d'autre part. Le profil nivologique peut ainsi être archivé dans une base de données, transmis par e-mail ou encore exploité par des modèles de prévision. Par ailleurs, divers calculs peuvent être effectués pour aider à estimer la stabilité du manteau neigeux. Ainsi, un premier module d'analyse est déjà implémenté, alors qu'on entrevoit des perspectives d'analyse automatique prometteuses à l'aide d'algorithmes de pattern matching.

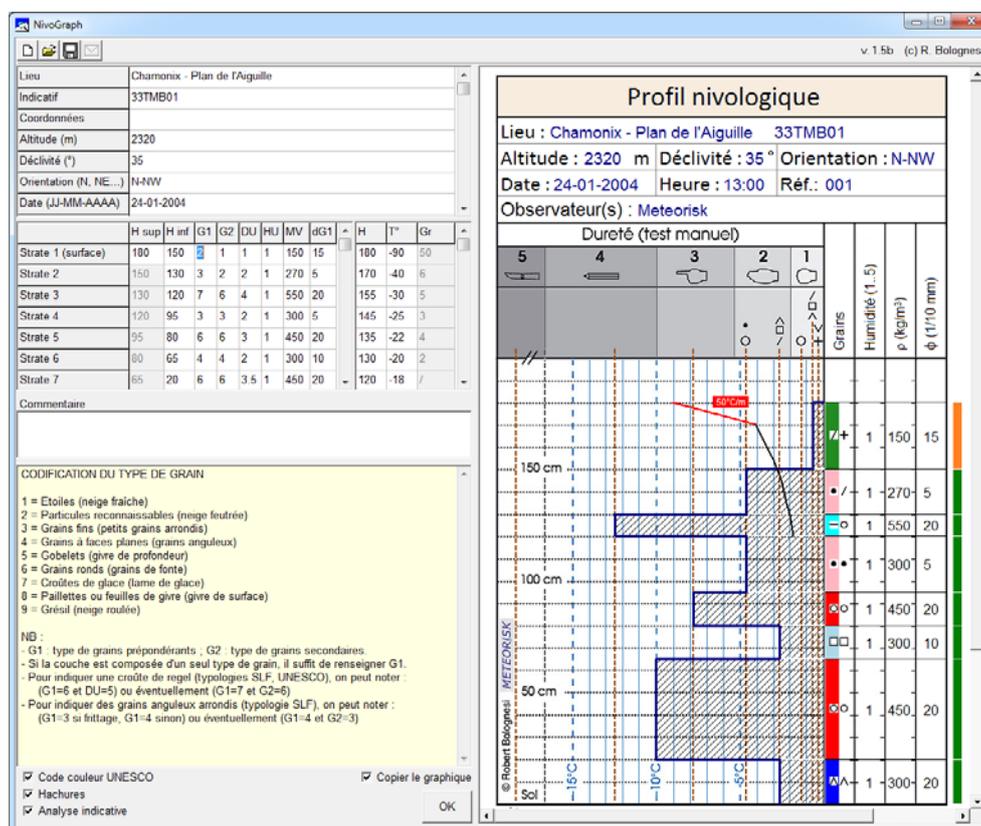


Fig. 2.5.a. Logiciel *NivoGraph*

Ce logiciel permet d'archiver les profils nivologiques sous forme numérique, propose des valeurs par défaut et calcule diverses données utiles comme les gradients thermiques. Une aide contextuelle (texte sur fond jaune clair) rend l'usage du logiciel très facile.

La dernière version de *NivoGraph* respecte la norme graphique internationale de l'Unesco et est compatible avec les diverses classifications des grains de neige (Météo-France et SLF).

3. Le profil nivologique : potentiels et limites

Les principaux avantages du profil nivologique sont les suivants :

- Il fournit une information très significative sur la stabilité du manteau neigeux, particulièrement utile pour la prévision locale des avalanches.
- Il est vite réalisé, ce qui permet de faire plusieurs relevés dans une même zone pour avoir une meilleure perception du manteau neigeux.
- Le mode opératoire est simple.
- Il ne nécessite pas d'appareil de mesure, et n'implique donc pas d'achat coûteux, pas d'entretien périodique, pas de surcharge dans le sac, pas d'encombrement limitant la mobilité.

Le profil nivologique présente aussi certaines limites :

- Il faut avoir une certaine expérience pour choisir convenablement le point de relevé, surtout en altitude et lorsque le relief est accidenté.
- Il faut le pratiquer régulièrement pour savoir l'interpréter avec discernement. Il peut d'ailleurs être avantageusement complété par un test de stabilité.
- Il demande de creuser un trou dans la neige, ce qui peut parfois être pénible dans le mauvais temps.
- Il reste indicatif du fait que les valeurs des résistances au cisaillement déduites des tests de dureté traduisent des résultats expérimentaux.

Chacun pourra dresser son propre bilan des avantages et inconvénients du profil nivologique, en fonction de ses besoins et de ses contraintes. Dans tous les cas, il faudra le considérer seulement comme l'un des moyens utiles à la prévision locale des avalanches.

Remerciements

- à Baptiste Fournier et Armand Dussex qui ont participé activement à l'étude (campagnes de mesures et analyse statistique) ;
- aux collaborateurs et partenaires de *METEORISK* qui ont effectué et évalué de très nombreux profils nivologiques, en particulier à Florian Pourraz et à Laurent Langoisseur ainsi qu'aux guides de Chamonix : Christophe Boloyan, Marc Charbonnel et Sylvain Frenco ;
- aux relecteurs de l'article : Nadia Hassine (ingénieure ONF-RTM), Frédéric Jarry (ANENA) et Jean-Marc Vengeon (ingénieur PARN).

Annexe 1 : les tests manuels (rappel)

La dureté d'une couche de neige peut être qualifiée par la possibilité d'y enfoncer horizontalement le poing, les quatre 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 consistant 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'un mélange de neige et d'eau (code : 5).

NB : les tests doivent être effectués avec les gants.

Annexe 2 : les types de grains de neige

Formes de base	+	Etoiles (neige fraîche)
	/	Particules reconnaissables (neige feutrée)
	•	Grains fins (petits grains arrondis)
	□	Grains à faces planes (grains anguleux)
	∧	Gobelet (givre de profondeur)
	○	Grains ronds (grains de fonte)
	-	Croûte de glace (lame de glace)
	∨	Paillettes ou feuilles de givre (givre de surface)
	⊗	Grésil, neige roulée
⊞	Grain anguleux arrondis <i>Grains anguleux subissant une métamorphose destructive, présentant ainsi des arêtes et angles arrondis.</i> <i>Assimilables aux grains fins si frittage, aux grains anguleux sinon.</i>	
⊞⊞	Croûtes de regel <i>Assimilables aux grains ronds avec dureté 5.</i>	

Entre parenthèses figurent les termes employés en Suisse francophone.

Annexe 3 : formulaire de relevé

Profil nivologique									
Lieu :									
Altitude : m			Déclivité : °		Orientation :				
Date :			Heure :		Réf.:				
Observateur(s) :									
Dureté (test manuel)					Grains	Humidité (1..5)	ρ (kg/m³)	φ (1/10 mm)	
5	4	3	2	1					
									
			○	○	○	○	○	○	○
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/	/	/	/	/
			/	/	/				

Références

- Bolognesi R. *La neige*, 4^e édition, Nathan, Paris 2002-2016
- Bolognesi R. *Connaître et pratiquer le profil nivologique*, éditions Le Vent des Cimes, Sion, à paraître.
- Brun E., Rey L. *Bilan de la campagne de mesures mécaniques dans la neige effectuée sur le terrain durant l'hiver 1984-1985*, Note de travail EERM no 199, Direction de la Météorologie Nationale, Grenoble, 1987.
- Collectif *Pratique du sondage par battage et du profil stratigraphique*, Météo-France, CNRM-CEN, St Martin d'Hères, 1994.
- Collectif *The international classification for seasonal snow on the ground*, IHP-VII Technical documents in hydrology no 83, IACS contribution no 1, UNESCO, Paris, 2009
- Dürr L., Lucas C., Stucki T. *Manuel d'observation*, WSL-SLF, Davos, 2020.
- Grivaz G. *L'avalanche des Brévières du 10 février 1950 et ses conséquences*, Revue Forestière Française no 7-8, AgroParisTech, Nancy, 1950.
- Höller P., Fromm R. *The relationship between measured snow hardness and shear strength*, Proceedings ISSW, WSL-SLF, Davos, 2010
- Roch A. *Les variations de la résistance de la neige*, publication no 69, Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Davos, 1965.

Cet article est publié par les éditions Le Vent des Cimes

www.leventdescimes.ch