

Guide "Ouvrages à vent paravalanches"



Florence NAAIM-BOUVET

Michel TRUCHE

Janvier 2014

SOMMAIRE

1	Le vent.....	5
1.1	La longueur de rugosité.....	6
1.2	La vitesse de frottement u_*	7
2	La neige et ses métamorphoses (Goetz, 2010).....	7
2.1	Formation des différents cristaux de neige.....	7
2.2	Modification des cristaux au cours de leur chute.....	9
2.3	L'évolution du manteau neigeux.....	9
3	Le transport de neige par le vent : processus physiques.....	11
3.1	Processus physiques.....	11
3.1.1	L'entraînement aérodynamique des particules.....	11
3.1.2	Les différents mécanismes du transport éolien de la neige.....	15
3.1.3	Les quantités de neige transportées.....	16
3.2	Metrologie : Les capteurs de transport de neige par le vent.....	18
3.2.1	Les capteurs mécaniques.....	18
3.3	Les capteurs acoustiques.....	20
3.3.1	Les capteurs optiques.....	22
4	Les problèmes liés au transport de la neige par le vent.....	23
4.1	Transport de neige par la vent et répartition de la neige en montagne.....	24
4.1.1	La formation des corniches.....	26
4.1.2	L'érosion des crêtes.....	30
4.1.3	La formation de plaques à vent.....	30
4.1.4	la répartition de la neige A L'ECHELLE DU MASSIF.....	31
4.2	Transport de neige par le vent et risque d'avalanche.....	34
5	La modélisation du transport de neige par le vent.....	36
5.1	La modélisation physique.....	36
5.2	La modélisation numérique.....	40
5.2.1	Approche à l'échelle du couloir – NEMO (Irstea).....	40
5.2.2	Approche à l'échelle du massif – SYTRON (Meteo France).....	41

6	Ingénierie des ouvrages paravalanches	42
6.1	Les barrières à neige	42
6.1.1	Principe de fonctionnement et historique	42
6.1.2	Porosité et garde au sol.....	45
6.1.3	Caractéristiques des dépôts générés	49
6.1.4	Orientation d'une barrière à neige par rapport à la direction du vent dominant	51
6.1.5	Positionnement d'une barrière à neige par rapport aux zones de départ d'avalanche	53
6.1.6	Autres cas d'implantation	55
6.1.7	Les différents types de barrières à neige	55
6.1.8	Entretien et coût	60
6.2	Les panneaux vire-vent.....	61
6.2.1	Principe de fonctionnement et historique	61
6.2.2	Les différents types de vire-vent.....	61
6.2.3	Porosité, garde au sol et espacement	62
6.2.4	Positionnement des vire-vent dans une zone de départ d'avalanche	63
6.2.5	Entretien et coût	65
6.3	Les toits-buses	66
6.3.1	Principe de fonctionnement et historique	66
6.3.2	Porosité, inclinaison, espacement et positionnement par rapport à la crête.....	68
6.3.3	Entretien et coût	71
6.4	Les pupitres	72
6.5	Inventaires et caractéristiques des ouvrages à vent paravalanches	72
7	Conduite d'un projet et études préalables	85
7.1	Mise en garde dans le cas des zones de départ d'avalanche	85
7.2	Etude de la topographie locale et des vents au sol sur la zone à protéger	86
7.3	Implantation des ouvrages : exemples.....	90
7.3.1	Larche.....	91
7.3.2	Barèges.....	92
7.3.3	Efforts liés au vent.....	95

8	Références.....	97
---	-----------------	----

ANNEXES :

Les haies pare-congères.....	102
Les bandes boisées.....	104
La plantation en zone d'ablation.....	105
Le choix des essences et l'entretien.....	106

PREAMBULE

En novembre 2011 s'est tenue à Larche (Alpes de Haute – Provence), une réunion technique d'agents de l'Office National des Forêts – service de Restauration des Terrains en Montagne (ONF- RTM) des Alpes et des Pyrénées portant sur le transport de la neige par le vent et les dispositifs éoliens paravalanches mis en œuvre en bassins d'alimentation d'avalanche. L'animation de cette rencontre était confiée à l'Institut national de Recherche en Sciences et Techniques pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA).

Afin de valoriser ce travail, le ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE) a passé commande en 2012 de l'élaboration d'un guide ouvrages à vent paravalanches.

L'élaboration de ce guide méthodologique, copiloté par RTM (Direction technique) et IRSTEA, s'inscrit dans le cadre de l'assistance technique à la Direction Générale de la Prévention des Risques et aux services régionaux déconcentrés (DREAL et DEAL), risque avalanche (action 5 de la Mission d'Intérêt Générale 2012).

Son contenu vise à :

- expliquer le principe de fonctionnement des ouvrages,
- présenter un catalogue de ces ouvrages,
- présenter de l'ingénierie requise pour leur mise en œuvre,
- présenter l'entretien nécessaire à la pérennité de ces ouvrages.

INTRODUCTION

En montagne, les chutes de neige s'accompagnent souvent de vent. En l'absence de chute de neige, la neige peut également être reprise au sol sous l'effet du vent. Tout au long de l'hiver va donc se produire un transport de masse de neige considérable qui va reconfigurer la topographie. En effet d'une façon schématique, la neige va être arrachée dans les zones exposées au vent et déposée dans les zones de ralentissement du vent. En montagne, les effets du transport de la neige par le vent sont rarement bénéfiques : formation de congères, de corniches, de plaques à vent, perte de visibilité, érosion du manteau neigeux sur les crêtes des domaines skiables.

Dans le domaine de la protection paravalanche, pour faire face à ces phénomènes préjudiciables, il a été conçu des ouvrages à vent qui, interposés dans le flux de neige transporté par le vent, ont pour objet de le maîtriser et de provoquer son dépôt dans une zone sans risque. La problématique de recours à ce type d'équipements, utilisant le vent pour asseoir la maîtrise du transport de neige, nécessite d'aborder la connaissance du vent, son rôle dans la mise en envol des particules de neige et dans leur transport en zone de montagne. L'ingénierie des ouvrages à vent paravalanches, incluant conduite de projets et études préalables, sera ensuite abordée.

1 LE VENT

Le vent correspond à la circulation de l'air des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions au sein de l'atmosphère. Le vent est un écoulement turbulent. Dans les études de fluide (eau, air,...), on distingue les mouvements laminaires et les mouvements turbulents. Alors qu'en écoulement laminaire, on peut accorder à la succession des couches fluides un certain caractère ordonné, aucune régularité n'apparaît dans un écoulement turbulent. Tout se passe comme si la stabilité de l'écoulement disparaissait et laissait place à un brassage extrêmement complexe des couches fluides. Un écoulement turbulent est aléatoire, tridimensionnel et rotationnel. Chacun peut citer des effets bien visibles de la turbulence. Un drapeau oscillant autour d'une position moyenne au gré du vent en est une. La vitesse instantanée de vent ($U(t)$) peut être décomposée en une composante moyenne ($\overline{U}(t)$) et une composante instantanée ($U'(t)$).

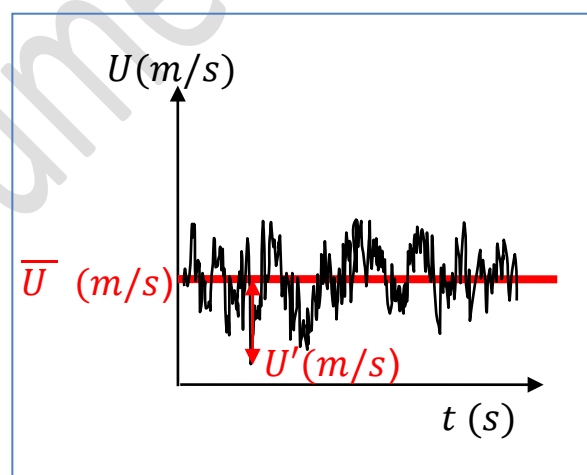


Figure 1. Turbulence du vent

$$U(t) = \overline{U}(t) + U'(t)$$

Equation 1

A basse altitude, la vitesse moyenne $\bar{U}(z)$ du vent est réduite par les forces de frottements induites par la présence du sol. Au sein de cette couche limite (couche d'air dans laquelle la variation de vitesse en fonction de l'altitude est non nulle) et dans le cas d'une atmosphère neutre (cas où le flux de chaleur est nul au sein de la couche limite atmosphérique), la vitesse du vent varie en fonction de la hauteur suivant une loi logarithmique (Figure 2) :

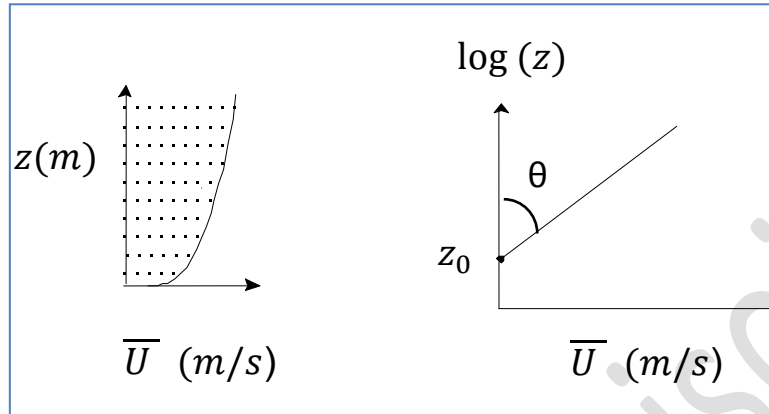


Figure 2. Profils de vitesse de vent dans une couche limite atmosphérique neutre

$$\bar{u}(z) = 5.75 u_* \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{ou encore} \quad \bar{u}(z) = \frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)) \quad \text{avec} \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}}$$

Equation 2

- avec
- $\bar{u}(z)$ la vitesse moyenne (m/s) à la hauteur z (m),
 - u_* la vitesse de frottement (m/s),
 - z_0 la longueur de rugosité (m),
 - τ_p la contrainte moyenne (N/m²) exercée par le fluide sur la surface du sol,
 - ρ la masse volumique du fluide (kg/m³),
 - K la constante de von Karman (=0.41).

Les études effectuées par Guyot (1986) ont montré que même si la neutralité thermique n'était pas respectée, la loi logarithmique était applicable jusqu'à une hauteur de 3 mètres au dessus du sol.

1.1 LA LONGUEUR DE RUGOSITE

On trouvera dans le tableau suivant quelques exemples de valeurs de z_0 :

Nature du terrain	z_0 en cm
Glace	10^{-3} à $3 \cdot 10^{-3}$
Sable	10^{-2} à 10^{-1}
Herbe rase	1 à 4
Herbe haute	4 à 10
Forêt	20 à 90
Habitat bas	100 à 200
Ville	100 à 400

Tableau 1. Exemples de valeurs de z_0

z_0 ne correspond pas directement à la hauteur des obstacles.

Certaines surfaces déformables voient leur rugosité modifiée par la valeur de u_* ; c'est le cas pour les étendus d'herbes hautes et la mer. Pour la mer, on préconise par exemple des lois de la forme :

$$z_0 = b \frac{u_*^2}{g}$$

Equation 3

avec g l' accélération de la gravité (m/s^2),
 u_* la vitesse de frottement (m/s),
 b une constante.

La présence de particules dans l'air modifie également la valeur de la rugosité.

$$z_0 = C_0 \frac{u_*^2}{2g}$$

Equation 4

La valeur de C_0 varie en fonction de la configuration du sol ($C_0 = 0.0265$ pour un lac recouvert à 75% de neige, $C_0 = 0.00771$ pour un lac dont 20% à 60% de la surface est recouverte de neige (Tabler (1980)).

1.2 LA VITESSE DE FROTTEMENT u_*

u_* est la vitesse de frottement ; elle a effectivement la dimension d'une vitesse mais est simplement un symbole mathématique ayant pour expression $\sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}}$ où τ_p est contrainte moyenne (N/m^2) exercée par le fluide sur sol.

Cependant son importance physique n'est pas négligeable. u_* est en effet directement proportionnelle au taux de croissance de la vitesse du vent avec le logarithme de la hauteur : $u_* = \frac{tg\theta}{5.75}$ (l'angle θ est défini sur la Figure 2).

Ces deux propriétés de la vitesse de frottement u_* représentent deux aspects d'un même phénomène : c'est le changement de vitesse du vent avec la hauteur qui cause une force de frottement dans l'air et le transmet au sol.

Cependant, pour le non spécialiste, cette notion de vitesse de frottement est souvent difficile à appréhender car elle n'est pas directement mesurable en un point et son ordre de grandeur est inhabituel. Ainsi, une vitesse de 10 m/s mesurée à 10 m au dessus d'une surface de sable ($z_0 = 10^{-2}$ cm) correspond à une vitesse de frottement de 0,35 m/s.

Dans la suite du document cette vitesse de frottement u_* sera couramment employée.

2 LA NEIGE ET SES METAMORPHOSES (GOETZ, 2010)

2.1 FORMATION DES DIFFERENTS CRISTAUX DE NEIGE

Les grands plans d'eau (océans, grands lacs, mers,...) génèrent par évaporation solaire une grande quantité de vapeur d'eau qui, en s'élevant dans l'atmosphère (de plus en plus froide), se refroidit et se condense en microgouttelettes. Ces gouttelettes peuvent rester liquides bien en dessous de zéro degré. Ce retard à la

congélation appelé surfusion peut cesser à la moindre perturbation (choc, poussière, impureté). Dans les nuages, ce sont des particules en suspension, appelées noyaux de congélation et noyaux de condensation, qui rompent l'équilibre et servent de point de départ à la formation du cristal. Toutes les molécules d'eau avoisinantes viennent se condenser sur cette impureté. Ainsi grandit le cristal de neige dont la forme, la taille, les ramifications sont principalement fonction de la température et de la quantité de vapeur d'eau disponible.

Bien que l'on ait l'habitude de parler d'étoiles de neige et de représenter la neige sous cette forme, il ne s'agit pas de la seule variété de cristal. Certes la neige peut tomber sous forme d'étoiles, qui lors de leur chute dans l'atmosphère, s'enchevêtrent en flocons.

Le cristal initial ou germe est un cristal de forme hexagonale. Mais suivant les températures qui règnent pendant son grossissement, certaines de ses parties ont une croissance privilégiée. Cela donne naissance à des cristaux typiques (Figure 3).

- cristaux de type aiguilles ou colonnes (pour une croissance avec une température comprise entre -6°C et -10°C).
- cristaux de type plaquettes (pour une croissance avec une température comprise entre -10°C et -12°C).
- cristaux de type étoiles (pour une croissance avec une température comprise entre -12°C et -18°C).

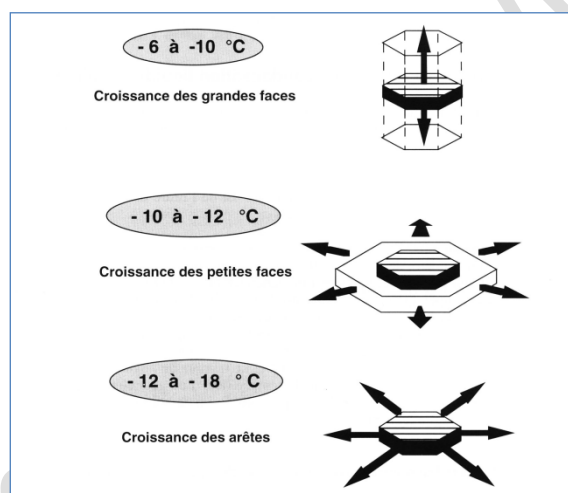


Figure 3. Les différents types de croissance à partir du germe de glace

Selon leurs séjours dans une ou plusieurs plages de températures différentes, les cristaux de neige peuvent avoir des formes combinées diverses, parfois complexes, dues aux différents types de croissance subis. Le Système de Classification International (Mason, 1971), mis en place en 1954 par la Commission Internationale de la Neige et de la Glace comportent actuellement 9 catégories de cristaux de neige fraîche (Figure 4). Mais Magono et Lee (1966), quant à eux, répertorient 80 types de cristaux de neige.

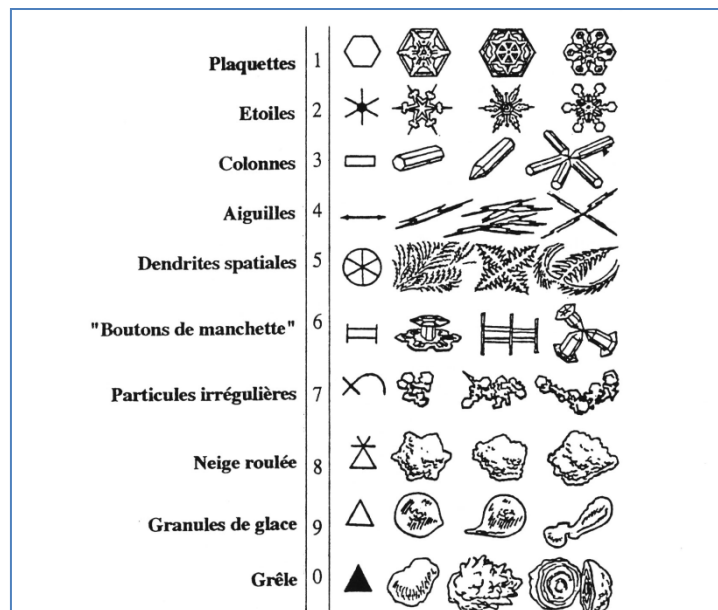


Figure 4. Les différents types de cristaux de neige

2.2 MODIFICATION DES CRISTAUX AU COURS DE LEUR CHUTE

Lorsque les cristaux de neige agglomérés en flocons sont suffisamment lourds pour vaincre les courants ascendants, ils tombent.

- Sans vent et avec des températures basses (inférieure à -5°C) les flocons ne subissent pas de fortes transformations au cours de leur chute. C'est donc une neige peu dense (de 50 kg/m^3 à 150 kg/m^3) qui se dépose au sol. **La neige fraîche est représentée par le symbole +**. Lorsque la température est proche de 0°C , les cristaux se modifient au cours de la chute, parfois même s'humidifient et la masse volumique au sol peut être importante (150 à 200 kg/m^3).
- Avec le vent, une action mécanique due aux chocs entre particules va détruire l'édifice complexe des cristaux qui rapidement deviennent de petites particules, ayant toutefois une forme rappelant le cristal initial : on parle alors de **particules reconnaissables (Symbole /)**. La petite taille des grains accélère le processus de cohésion de frittage (soudure des particules entre elles par création de ponts de glace).

La masse volumique des dépôts ventés varie de 150 kg/m^3 à 300 kg/m^3 .

2.3 L'ÉVOLUTION DU MANTEAU NEIGEUX

Le manteau neigeux est un empilement de strates de neige, chaque strate correspondant à un épisode neigeux et ayant une évolution propre. On emploie généralement le terme de grain de neige, et non plus cristal de neige, lorsque l'on parle de neige au sol.

Les différentes métamorphoses de la neige sèche sont conditionnées par la valeur du gradient vertical de température auquel est soumise la couche de neige. On appelle gradient vertical de température GT (Figure 5) la variation verticale de température en fonction de l'épaisseur de la couche de neige.

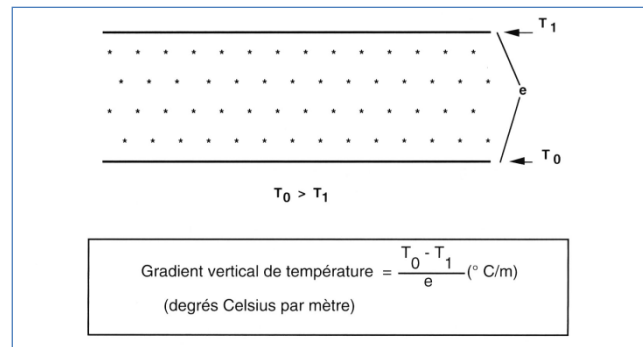


Figure 5. Calcul du gradient vertical de température

- La métamorphose de **FAIBLE GRADIENT** ($0^{\circ}\text{C}/\text{CM} < \text{GT} < 0,05^{\circ}\text{C}/\text{CM}$) permet d'obtenir des **grains fins** (SYMBOLE \cdot). Leur diamètre est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm. Des ponts de glace se forment entre les grains et on parle alors de frittage entre les grains. Cette évolution se traduit par le tassement de la couche de neige, sa prise de cohésion et une augmentation de la masse volumique
- La métamorphose de **GRADIENT MOYEN** ($0,05^{\circ}\text{C}/\text{CM} < \text{GT} < 0,2^{\circ}\text{C}/\text{CM}$) : Les grains résultants montrent de nombreuses facettes, dont les angles sont le plus souvent de 120° . Ils sont appelés **grains à faces planes** (SYMBOLE \square). Leur diamètre est de l'ordre de 0,3 à 0,6 mm. A l'origine, la neige doit donc avoir une masse volumique inférieure à $300\text{-}350 \text{ kg/m}^3$ et être de type +, /, . Cette métamorphose s'accompagne d'un tassement de la neige (surtout s'il s'agit de + ou /), et surtout d'une perte de cohésion importante.
- La métamorphose de **FORT GRADIENT** ($\text{GT} > 0,2^{\circ}\text{C}/\text{CM}$) : Les grains prennent alors une structure de pyramide creuse et sont appelés **gobelets ou givre de profondeur** (SYMBOLE \wedge). Ces grains sont généralement de grande dimension, de 0,5 mm pour les plus petits à près de 4 mm pour les plus gros. Ils sont sans cohésion entre eux et présentent eux aussi un grand danger pour la stabilité des strates supérieures. Seule la présence d'eau liquide peut les faire évoluer. Les neiges qui peuvent être l'objet d'une telle métamorphose doivent aussi avoir une masse volumique inférieure à $300\text{-}350 \text{ kg/m}^3$ (+, /, .)

Une neige humide est une neige qui contient de l'eau liquide. Sa température est toujours de 0° . On obtient alors des **grains ronds** (SYMBOLE \circ). Le diamètre varie généralement de 0,3-0,4 mm pour les neiges fraîches humidifiées à 1-2 mm pour de vieilles neiges. La cohésion entre les grains, assurée par la présence de l'eau liquide, est dite cohésion capillaire. Elle est bonne tant que la T.E.L. (Teneur en Eau Liquide) est faible mais devient mauvaise lorsque la T.E.L. est importante : on obtient alors des avalanches de printemps caractéristiques de pentes raides et ensoleillées. Dans le cas d'un regel, l'eau liquide entre les grains se solidifie et l'on obtient une cohésion de regel.

En résumé, la cohésion de la neige dépend de la qualité de la liaison entre les grains. On distingue ainsi 4 types de cohésion :

- La **cohésion de feutrage** : les cristaux étoilés sont souvent liés les uns aux autres par leurs dendrites qui assurent une liaison fragile. Cette cohésion est de courte durée et disparaît avec la métamorphose destructive de la neige fraîche. Elle permet à la neige de rester accrochée sur les arbres ou les câbles électriques ;
- La **cohésion de frittage** : les parties les plus aiguës du cristal (partie convexe) ont tendance à se sublimer. Cette vapeur d'eau disponible va se diffuser puis se condenser dans les parties concaves. Il y a donc :
 - d'une part un « émoussage » progressif des grains qui étaient à l'origine dendritiques ou anguleux.

- d'autre part l'apparition de formes concaves au point de contact entre les grains, qui sont le lieu de condensation solide conduisant à la formation de ponts de glace. Ces ponts lient fortement les grains entre eux. La vitesse de formation des ponts de glace dépend de la température, mais surtout de la taille des grains dont elle est une fonction décroissante (Tableau 2). Les petites particules de neige résultant de l'action mécanique du vent seront de fait rapidement frittées.

Température Diamètre	-20°C	-10°C	0°C
0,1 mm	20 s	10 s	7 s
0,5 mm	42 mn	22 mn	14 mn
1 mm	5,6 h	3 h	1,8 h

Tableau 2. Temps de frittage en fonction de la température et du diamètre (rapport entre le rayon du pont de glace et du rayon de la particule de 1/10) d'après Hobbs et Mason, 1964

La neige qui était poudreuse devient alors cohérente. Lors du transport de neige par le vent, le frittage s'obtient de façon naturelle en quelques minutes (diamètre compris entre 100 et 200 μm).

- La **cohésion capillaire** : dans les neiges humides, chaque grains est entouré d'un film d'eau liquide très fin qui unit plusieurs grains.
- La **cohésion de regel** : lorsque le froid pénètre dans une couche de neige humide, la pellicule d'eau regèle, soudant entre eux les grains. La neige résiste à l'enfoncement des pas.

Un autre cristal présente également un danger potentiel : le **givre de surface (SYMBOLE ∇)**. Lorsque le ciel est dégagé la nuit, la surface de la neige subit un refroidissement important. L'air situé à son contact se refroidit et l'eau présente peut se condenser en paillettes de givre, pouvant atteindre des dimensions de plusieurs cm. Recouvertes par des chutes de neiges ultérieures, elles pourront constituer un plan de glissement idéal pour les avalanches.

3 LE TRANSPORT DE NEIGE PAR LE VENT : PROCESSUS PHYSIQUES

3.1 PROCESSUS PHYSIQUES

3.1.1 L'ENTRAÎNEMENT AÉRODYNAMIQUE DES PARTICULES

Lorsque la vitesse du vent dépasse une valeur seuil, la force de frottement exercée au niveau du sol est responsable de la mise en mouvement de ces particules.

Pour le sable, Bagnold (1941) a été l'un des premiers à définir cette vitesse de frottement seuil des particules (vitesse de frottement à partir de laquelle le mouvement des particules est initié) comme une fonction du diamètre moyen, de la masse volumique du matériau et de la masse volumique du fluide.

Dans un écoulement, la particule est soumise à l'action du poids et de forces aérodynamiques. Les forces aérodynamiques se décomposent en une force de frottement ou traînée et une force de portance. La force de traînée aérodynamique s'oppose au mouvement de la particule dans l'air et correspond à la résistance à l'avancement. Elle s'exerce dans la direction opposée à la vitesse relative de la particule. La vitesse relative de la particule est égale à la vitesse de la particule moins la vitesse de l'écoulement. La force de portance s'exerce dans la direction perpendiculaire à la vitesse relative de la particule.

Deux particules voisines se touchent par un point de contact P. A l' instant où une particule est délogée, elle tourne autour de ce point de contact (Figure 6). Au moment de l'arrachement, la vitesse de la particule est nulle et Bagnold néglige la force de portance.

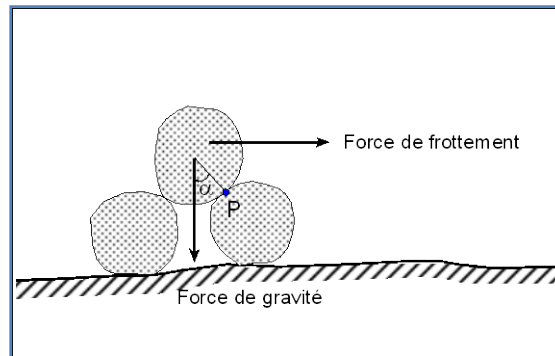


Figure 6. Forces exercées sur les particules au moment de l'arrachement (Bagnold (1941))

L'égalité des moments des forces de traînée et de gravité autour du point de contact P conduit à la relation suivante :

$$u_{*t} = A \sqrt{\frac{(\sigma - \rho)}{\rho} g D_p}$$

Equation 5

avec

u_{*t}	la vitesse de frottement seuil des particules (m/s)
D_p	le diamètre de la particule (m),
σ	la masse volumique de la particule (kg/m^3),
ρ	la masse volumique de l'air (kg/m^3),
M	la masse de la particule (kg).

La vitesse de frottement au moment où la particule est arrachée est appelée vitesse de frottement seuil et est notée u_{*t} .

Pour le sable, Bagnold a montré que A était égal à 0,1 si le rapport $R_* = \frac{u_* D_p}{\nu}$ était supérieur à 3,5. ν représente ici la viscosité cinématique du fluide (m^2/s) et R_* est appelé nombre de Reynolds de la particule.

Dans le cas d'un écoulement turbulent lisse ($R_* < 3.5$), la vitesse de frottement seuil d'arrachement des particules est d'autant plus forte que le diamètre des particules est petit (Figure 7). Ceci n'est pas uniquement dû aux forces de cohésion intervenant pour de fines poudres mais au fait que les particules soient dans ce cas noyées dans la sous-couche visqueuse (il s'agit d'une couche inférieure très fine juste au-dessus de la surface et où l'écoulement est laminaire). En effet, si le diamètre apparent des grains est inférieur au tiers de l'épaisseur de la sous-couche visqueuse, alors celle-ci n'est pas perturbée. On peut le comprendre en imaginant que l'écoulement turbulent ne "perçoit" pas la présence des particules pour les mettre en mouvement. Mais si les grains ont une taille supérieure au tiers de la sous-couche visqueuse, les particules perturbent l'écoulement laminaire du fond du lit et les tourbillons s'étendent plus en profondeur. Ces tourbillons sont alors capables "d'arracher" les sédiments du fond et de les transporter. A titre d'illustration, ce sont les roues d'un 4*4 qui mettront en suspension de la fine poussière en extrayant les particules de la sous-couche visqueuse alors que l'action seule du vent n'aurait pas été suffisante.

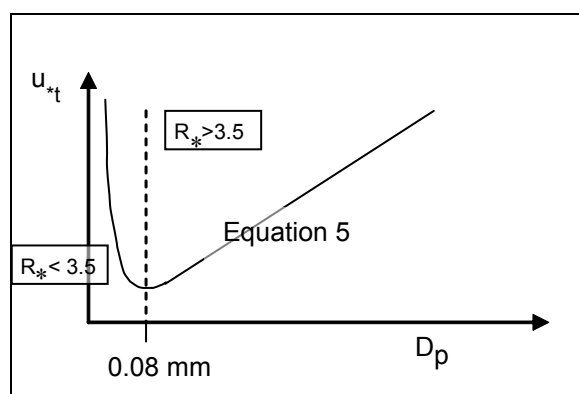


Figure 7. Vitesse de frottement seuil en fonction du diamètre des particules pour du sable (Bagnold, 1941)

En ce qui concerne les particules de neige, la situation est plus complexe car les forces de cohésion interparticules sont généralement plus importantes que la force de gravité. Lors d'un épisode de transport de neige par le vent, le frittage s'obtient de façon naturelle en quelques minutes. Ainsi, au bilan des forces, établi pour déterminer les conditions d'envol des particules, vient s'ajouter la force de cohésion de frittage. On rappelle que le temps, l'humidité, la température et la taille des particules ont une influence sur la cohésion de frittage.

Schmidt (1980) a formalisé l'influence de la cohésion de frittage sous la forme d'une équation, que nous ne rappellerons pas ici. On retiendra cependant les grandes tendances qui en découlent.

- Plus le rapport r/R (rayon du pont de glace sur rayon de la particule) augmente, plus la contrainte de frottement seuil augmente.
- Plus la cohésion de frittage augmente, plus la contrainte de frottement seuil augmente. Or la cohésion de frittage est une fonction :
 - du diamètre de la sphère : elle augmente avec le diamètre,
 - de l'humidité : la surface de contact entre les grains est plus petite pour des humidités faibles ; dans le cas d'une atmosphère sèche, la cohésion atteint une valeur négligeable en dessous de -5°C .
 - de la température : elle diminue avec la température.

On retiendra donc que dans le cas de la neige, la vitesse de frottement seuil u_{*t} dépend plus des forces de cohésion interparticulaires que de la taille des particules.

Au moment de la chute de neige, la vitesse de frottement seuil u_{*t} est d'autant plus grande que la température est élevée et l'humidité importante.

Après la chute de neige, la vitesse de frottement seuil augmente avec le temps ; mais le taux d'accroissement décroît avec le temps et est plus faible pour les basses températures.

Afin de tenir compte de l'influence des forces de cohésion interparticules sur l'occurrence du transport de neige sans avoir pour autant à déterminer les différents paramètres de l'équation proposée par Schmidt le Centre d'Etudes de la Neige (Météo France) a développé un modèle déterministe PROTEON (*PRévision de l'Occurrence du Transport Eolien de la Neige*). Il a mis au point une méthode permettant d'obtenir une caractérisation de la morphologie des cristaux de neige contenus dans des échantillons prélevés sur le terrain (*particules de neige au sol et dans le flux de transport*) tout en enregistrant sur station automatique la vitesse moyenne horaire du vent. La neige à étudier est prélevée dans des flacons d'iso-octane, produit mouillant parfaitement les surfaces de glace et inhibant pendant plusieurs semaines toutes métamorphoses des grains, à condition de maintenir l'échantillon à une température négative. Les échantillons, conservés en chambre froide dès le retour du terrain, sont étudiés ultérieurement : après filtration de l'échantillon, les grains sont observés

sous microscope et leur image numérisée. Un logiciel de traitement d'images permet alors de calculer différents paramètres morphologiques. L'équipe de recherches du CEN a ainsi déterminé un indice de mobilité $m.i.$, fonction de (Figure 8):

- la sphéricité s , variant de 0 à 1 et correspondant au rapport entre la forme arrondie et la forme anguleuse,
- la dendricité d , variant de 1 pour de la neige fraîche à 0 pour de la neige type grains fins ou faces planes.
- la taille des particules (*variant de 0,4 mm à 1,5 mm*)
- l'historique de la couche de neige : une couche de neige ayant subi une phase liquide est considérée comme impossible à éroder, soit parce qu'elle comporte encore de l'eau sous forme liquide, soit parce que cette eau est regelé (*croûte de regel*).

On obtient dans le cas de la neige :

- à dendricité non nulle (*neige fraîche*).

$$m.i. = 0,75d - 0,5s + 0,5$$

Equation 6

- à dendricité nulle (neige ayant subi des métamorphoses par effet de gradient ou par humidification).

$$m.i. = -0,583gs - 0,833s + 0,833$$

Equation 7

Dès lors, on obtient la vitesse d'arrachement seuil (à 10 m et pour une moyenne horaire)

$$U_{t10} = -\frac{1}{0,085} \ln\left(\frac{m_i + 1}{2,68}\right)$$

Equation 8

Avec U_{t10} la vitesse moyenne horaire du vent seuil d'arrachement à 10 mètres de haut.

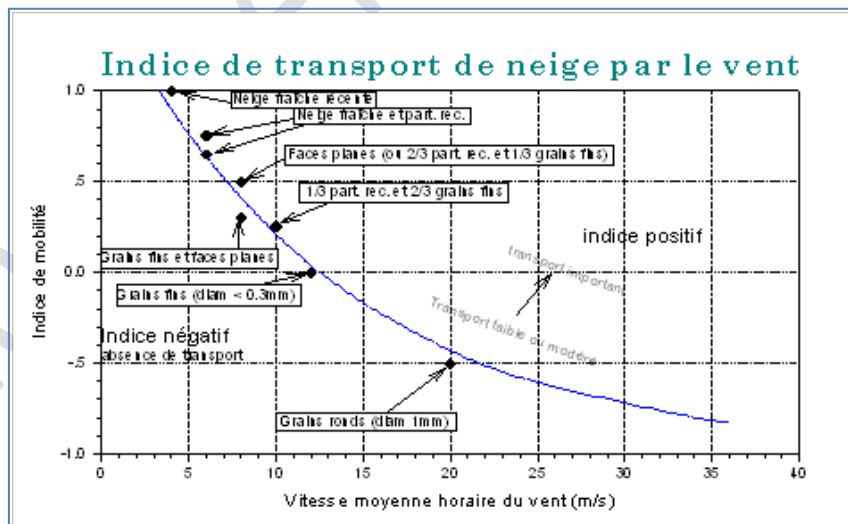


Figure 8. Variation de la vitesse seuil d'arrachement (moyenne horaire à 10 m de haut) en fonction de l'indice de mobilité (d'après G. Guyomarc'h, L. Merindol (1995))

Ainsi la vitesse seuil mesurée à 10 m, peut varier de 4 m/s à plus de 30 m/s en fonction de la qualité de la neige.

3.1.2 LES DIFFERENTS MECANISMES DU TRANSPORT EOLIEN DE LA NEIGE

La neige peut être transportée suivant trois mécanismes (Figure 9) :

- la reptation,
- la saltation,
- la diffusion turbulente.

Au début de l'épisode de transport, les particules sont arrachées uniquement par entraînement aérodynamique, c'est-à-dire par la force du vent. La particule éjectée retombe sous l'effet de la gravité. Elle rebondit et éjecte d'autres particules ; on parle de **saltation**. Lorsque les particules éjectées n'ont pas suffisamment d'énergie pour en éjecter d'autres, on parle alors de **reptation**. On a généralement l'impression qu'elle roule mais en fait elle progresse par « micro-bonds ».

Quand les particules sont transportées par les tourbillons de l'air et ne touchent plus le sol, on emploie le terme de **diffusion turbulente** (Cliché 2). Il existe un état intermédiaire appelé **saltation modifiée** (Cliché 1) où les particules qui sont amenées à avoir des impacts fréquents au niveau du sol ont des trajectoires modifiées par les tourbillons de l'écoulement.

La plupart des observateurs considèrent que l'essentiel du transport par saltation modifiée s'effectue entre 0,1 et 1 mètre de hauteur. En fait, la hauteur de saltation pure n'est que de quelques centimètres.

C'est principalement la saltation qui provoque des accumulations locales de neige ; par ailleurs, la saltation est responsable des deux autres modes de transport éolien (reptation et suspension) et est donc nécessaire pour amorcer l'érosion éolienne. En effet l'entraînement aérodynamique ne permet pas d'arracher les fines particules (Figure 3) qui sont transportées par diffusion turbulente. Ces dernières sont éjectées soit du fait de la saltation, soit pour une raison extérieure (passage de véhicules ou de troupeaux dans le cas du sable).

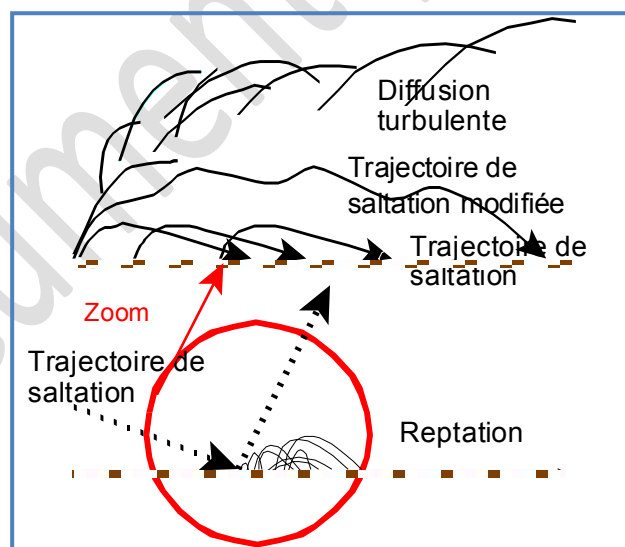


Figure 9. Les différents mécanismes de transport de neige par le vent

La **reptation** est responsable du comblement des petites dépressions (traces de pas...) et intervient également dans la formation et la migration des ondulations de surface de neige (identiques à celle que l'on trouve pour le sable : on parle de ripples). Dans le cas de la **diffusion turbulente**, il suffit que la composante verticale du vent soit de l'ordre de 1 à 1,5 m/s pour que beaucoup de particules de sable de 0,02 mm à 0,1 mm soient emportées. C'est ainsi que le sable du Sahara parvient parfois en Europe après avoir traversé la Méditerranée.

Dans le cas du transport de la neige par le vent, la sublimation des cristaux ne leur permet pas de parcourir de telles distances (la distance maximale de transport est de l'ordre du kilomètre).



Cliché 1. Saltation et saltation modifiée (T.Castelle/EPFL)



Cliché 2. Diffusion turbulente (H. Bellot/Irstea)

Le terme de reptation est également utilisé pour décrire le mouvement lent de la neige au sol sur une pente, sous l'effet de la gravité. Il ne s'agit pas du tout du même phénomène physique.



Cliché 3. Reptation du manteau neigeux (Irstea)

3.1.3 LES QUANTITÉS DE NEIGE TRANSPORTÉES

La littérature offre de nombreuses formulations permettant de déterminer les débits de neige transportés. Ces expressions sont en général issues d'une approche théorique couplée à des mesures expérimentales. La très grande variabilité des conditions expérimentales (*qualité de la neige, longueur sur laquelle la neige est arrachée*) explique la diversité des résultats obtenus.

Citons à titre d'exemple la relation avancée par Dyunin et Kotlyakov (1980), qui proposent (*pour une hauteur comprise entre 1 et 2 m*) :

$$Q = 7,7 \cdot 10^{-5} (U_{10} - 5)^3$$

,Equation 9

avec

Q	le débit (kg/ms)
U_{10}	la vitesse à 10 m du sol (m/s)
5	la vitesse seuil mesurée à 10 m du sol (m/s)

L'information essentielle apparaissant dans cette formule (et d'ailleurs dans la plupart des autres formulations proposées) est que la quantité de neige transportée est proportionnelle au cube de la différence entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse seuil d'arrachement

D'après l'équation 9, le débit de neige transportée par mètre linéaire (perpendiculairement à la direction du vent dominant et pour une hauteur comprise entre 1 et 2 m) est de l'ordre de :

- 2 kilogrammes par mètre et par heure pour un vent de 7 m/s,
- 200 kilogrammes par mètre et par heure pour une vitesse de 14 m/s.

Cependant cette estimation du débit est globale: elle ne fait pas apparaître les variations avec la hauteur. Or il est intéressant de souligner que la concentration massique (et donc le flux massique) est aussi une fonction de la hauteur (par rapport à la surface neigeuse). La couche de saltation, située au niveau du sol, est la plus concentrée. Les données recueillies en Antarctique par Dingle puis analysées par Mellor et Fellers (1986) ont permis d'établir des lois polynomiales (Figure 10) reliant le flux massique et la concentration massique à la hauteur et à la vitesse du vent (hauteur standard à 10 m au dessus du sol).

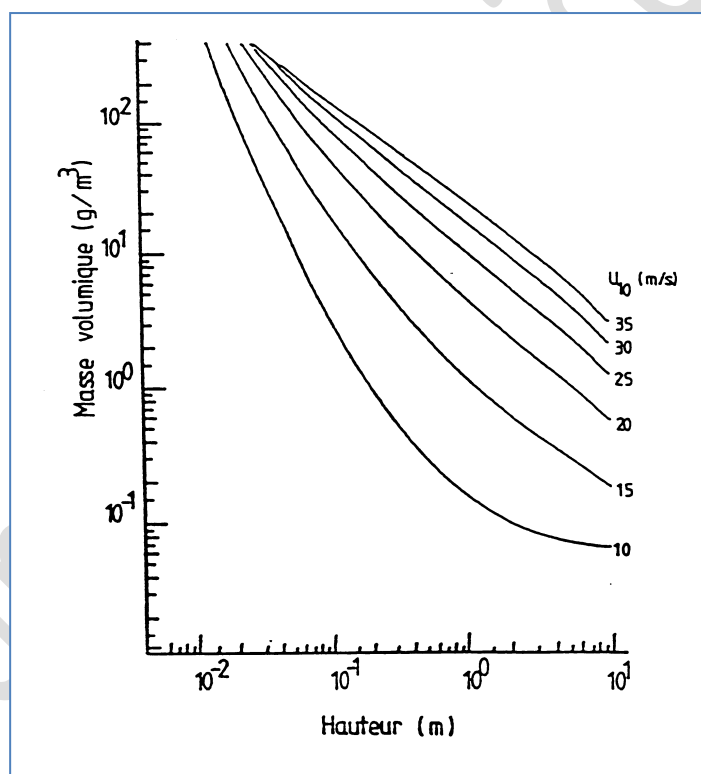


Figure 10. Concentration massique de la neige en fonction de la hauteur au dessus du sol pour différentes vitesses de vent à 10 m (Mellor et Fellers (1986))

On visualise ainsi (Figure 10) que les plus fortes concentrations sont obtenues dans la basse couche, ce qui est visible sur la figure. Cette concentration décroît avec la hauteur. Pour une hauteur donnée, elle croît avec la vitesse du vent.

Cette formulation présente cependant un inconvénient majeur : elle ne tient pas compte du type de neige. En effet, pour une même vitesse de vent, si les qualités de neige sont différentes, les quantités de neige transportée seront également différentes. Dans les formulations semi-empiriques, cette caractéristique est prise en compte par l'intermédiaire de la vitesse de frottement seuil qui intervient alors dans la formulation.

Pomeroy et Male (1992) proposent une formulation du débit de neige Q_s (kg/m/s) transportée dans la couche de saltation pure :

$$Q_s = \frac{0.68 \rho u_{*t}}{g u_*} (u_*^2 - u_{*t}^2) \quad \text{Equation 10}$$

avec u_* la vitesse de frottement (m/s),
 u_{*t} la vitesse de frottement seuil (m/s),

Les différentes formulations du débit de particules correspondent à des débits à saturation; un profil de concentration de particules est considéré comme étant à saturation lorsque, pour une vitesse de frottement donnée, il y a équilibre entre le nombre de particules déposées et le nombre de particules arrachées, c'est-à-dire qu'il n'y a plus d'incorporation supplémentaire de particules dans l'air. La longueur d'ablation ou de reprise (appelé aussi *fetch*) correspond à la longueur (dans le sens de l'écoulement) sur laquelle les particules sont arrachées. Si l'on se réfère aux travaux de Takeuchi (1980), **la longueur d'ablation nécessaire à l'obtention de la saturation en particules peut atteindre quelques centaines de mètres**. C'est là encore un effet de la cohésion des particules de neige. Pour le sable cette longueur n'est que de quelques mètres.

3.2 METROLOGIE : LES CAPTEURS DE TRANSPORT DE NEIGE PAR LE VENT

Les formulations empiriques régissant la concentration ont souvent été obtenues à partir de données expérimentales recueillies dans les plaines du Canada ou en Antarctique. Le type de neige et la topographie varient d'un site à l'autre et il est légitime de s'interroger sur la validité de telles formulations dans un contexte alpin. Seules des mesures in situ permettent de tester les formulations et par la même de s'assurer de leur validité. Cette partie fait le point sur les différentes techniques de mesures envisageables (Bellot et Naaim-Bouvet, 2010).

3.2.1 LES CAPTEURS MÉCANIQUES

Les capteurs dits mécaniques ont longtemps été les systèmes les plus utilisés du fait de leur performance, leur facilité de réalisation et d'utilisation et leur faible coût ; d'ailleurs l'essentiel des formules empiriques établies l'a été par le biais de ces moyens de mesures.

Les pièges à neige sont constitués d'une enceinte de forme et de capacité variable, munie d'une admission et d'une évacuation d'air. Le mélange air-particules de neige pénètre par l'orifice d'admission placé face au vent. L'élargissement de la section à l'intérieur du piège, la présence de filtres ou de chicanes ou encore leur combinaison, réduit la vitesse du vent et donc sa capacité de transport. Il se produit alors la séparation de l'air et des particules, l'air déchargé de particules neigeuses étant expulsé par l'orifice d'évacuation. Lorsque les pièges sont chargés de manière significative, ils sont pesés et la connaissance du temps d'exposition permet de calculer le flux F (g/m²/s).

$$F = \frac{M}{St} \quad \text{Equation 11}$$

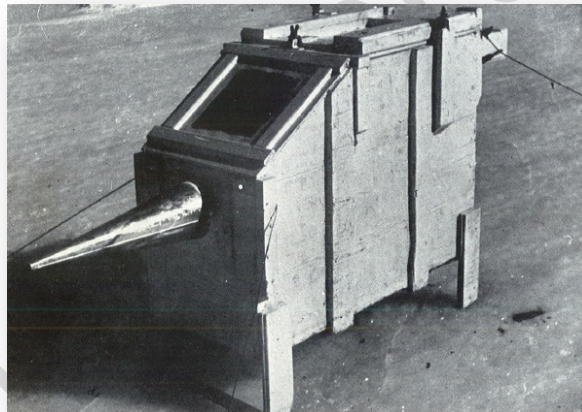
avec M le poids de la neige (g),
 S la surface d'ouverture des filets (m²) et T le temps d'exposition (s).

Dans la couche de suspension, la vitesse horizontale du flux est considérée égale à celle du vent et la concentration en particules devient donc :

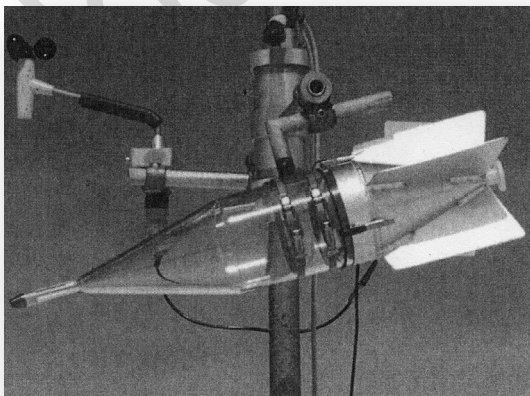
$$C(z) = \frac{F(z)}{U(z)}$$

Equation 12

En France, le pionnier en matière de mesures de quantité de neige transportée fut René Garcia, qui lors de son hivernage à la station Charcot en 1958-1959 capta tout d'abord la neige dans des boîtes de conserve fixées sur un pieu face au vent. Par la suite, il améliora son système pour limiter la turbulence et le refoulement des particules en y adjoignant un tube coudé vers le haut à l'arrière pour supprimer la compression ainsi qu'un grillage. Mais les premières mesures ont été effectuées par des australiens de l'expédition Mawson en Antarctique dès 1912 grâce à la caisse à blizzard (dite de type Mawson (Cliché 4)). De nombreux capteurs mécaniques ont été utilisés par la suite, chaque chercheur ayant son propre modèle et la liste serait longue et sans doute non exhaustive : nous citerons cependant ici les capteurs présentant des avancées particulières. La fusée dite de Mellor en 1965 est munie d'une dérive pour permettre son orientation dans le sens du vent, puis construite en plexiglas (Cliché 5) pour visualiser son remplissage. Le driftomètre (Bolognesi et al., 1995) est constitué d'une platine réglable en hauteur le long d'un mât supportant 8 capteurs dirigés vers les différentes directions cardinales : l'extrémité d'entrée est équipée d'un déflecteur afin que seul le tube dont l'axe coïncide avec la direction du vent capte de la neige et l'extrémité est évasée et est prolongée par un sac collecteur agissant comme un filtre (Cliché 6). Les boîtes prismatiques (Cliché 7) développées à Irstea, proches cousines des caisses à blizzard Mawson, sont empilées les unes sur les autres et destinées à rester sur place pendant toute la saison hivernale. Elles ont par exemple permis de déterminer que 163 tonnes de neige par mètre linéaire de crête avaient été transportées au Col du Lac Blanc durant l'hiver 88-89. Les filets de type « filets à papillons » (Cliché 8) sont quant à eux plutôt destinés à des campagnes très ponctuelles.



Cliché 4. Caisse à blizzard (de type Mawson)



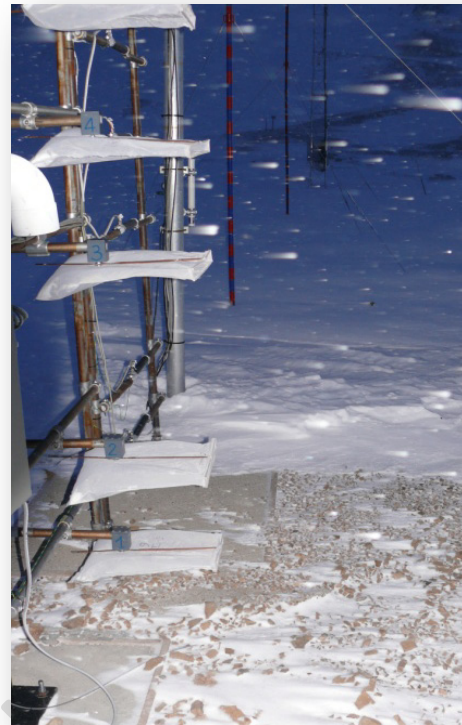
Cliché 5. Fusée de Mellor (R. Bolognesi)



Cliché 6. Driftomètre (R. Bolognesi)



Cliché 7. Boîtes prismatiques (F. Naaim-Bouvet / Irstea)



Cliché 8. Filets à "papillons" (H. Bellot/Irstea)

3.3 LES CAPTEURS ACOUSTIQUES

Une société suisse (IAV Engineering) (Chritin et al., 1999) a mis sur le marché un capteur de transport de neige par le vent portant le nom de Flowcapt, basé sur un principe acoustique. Le Flowcapt est constitué de plusieurs tubes disposés verticalement (Cliché 9), chaque tube étant équipé d'un microphone capable d'enregistrer le bruit causé par les impacts des grains de neige et de fournir un flux exprimé en $g/m^2/s^1$. A cette fin, les tubes sont étalonnés individuellement de manière industrielle pour des chocs supposés rigides élastiques sous un flux variable de particules cuboïdes de PVC à une vitesse constante de $1 m.s^{-1}$. La valeur du flux qui est retournée par le capteur est obtenue à partir de cette relation :

$$Flux = A(Signal)^2$$

Equation 13

Nous avons mené des campagnes de calibration in situ et en soufflerie (Cierco et al, 2007) qui ont montrés que la réponse du capteur dépend de la vitesse des particules à la puissance 4 (Figure 11). Les valeurs de flux issus du capteur sont donc erronées. Par contre la capteur est robuste et permet de connaître précisément si oui ou non il y a transport de neige par le vent (sans cependant faire de distinction avec les précipitations ventées).



Cliché 9. Flowcapt constitué de 6 segments installé au Col du Lac Blanc (F. Naaim-Bouvet / Irstea)

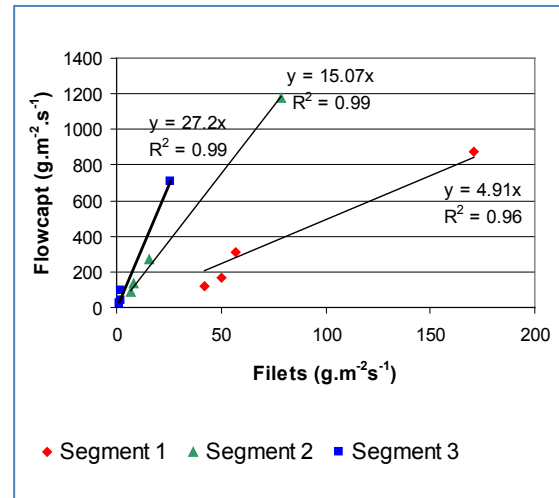


Figure 11. Comparaison des flux mesurés par les filets à papillons et les Flowcapt (Cierco et al., 2007)

Une seconde génération de capteur Flowcapt a été mise sur le marché en 2009 et a été comparée aux mesures issues des capteurs optiques SPC (voir paragraphe ci après). Cette campagne de mesures (Trouvilliez et al., 2014) a montré que le comportement du Flowcapt était meilleur mais que les mesures effectuées conduisaient à une sous-estimation du flux (Figure 12).

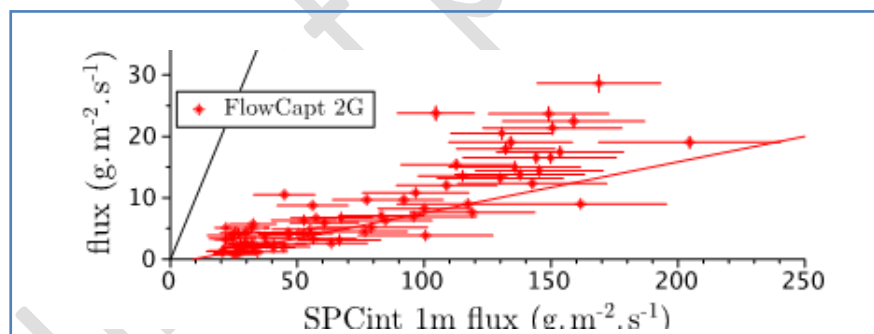


Figure 12. Comparaison des flux mesurés par les filets à papillons et les Flowcapt (Trouvilliez et al., 2010)

Les capteurs Flowcapt sont commercialisés par la société ISAW qui met à disposition en temps réel les données enregistrées par ces stations (http://www.isaw.ch/index.php?nav=data_meteo_stations&lang=en).

Le Conseil Général de la Savoie (Bourgeois et al., 2013) s'est équipé de 6 stations Flowcapt pour assurer au mieux la gestion du risque d'avalanche en temps réel. Les modèles commerciaux sont constitués de deux tubes de 1 m de haut placés l'un au dessus de l'autre. Pour quatre stations, les acquisitions ont été couplées avec une double mesure de hauteur de neige. Un capteur est donc placé avec la station principale sur un secteur plutôt érodé par le vent, l'autre capteur est déporté dans un secteur plutôt soumis à un effet d'accumulation par les vents dominants.

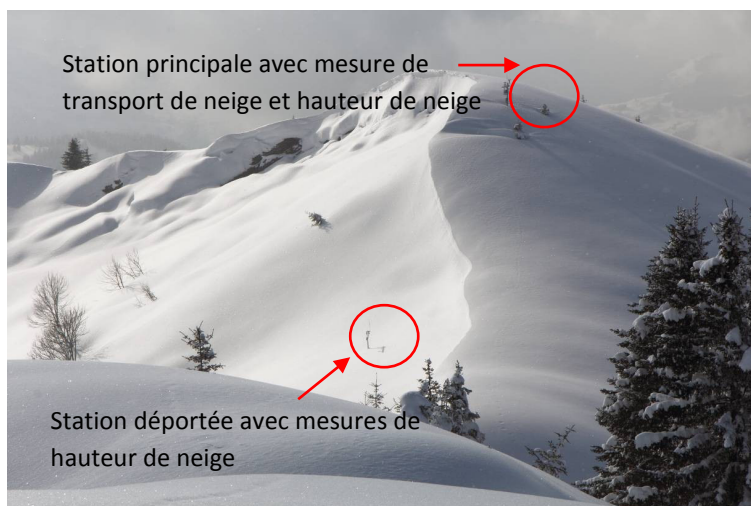


Figure 13. Station Flowcapt de Flumet (Savoie France), avec double capteur de hauteur de neige (Bourgeois et al., 2013)

Le deuxième capteur de hauteur peut également être utilisé pour vérifier qu'un tir de déclenchement préventif a été positif. Dans ce cas il est installé sur un câble tendu (Station de Celliers).

3.3.1 LES CAPTEURS OPTIQUES

Il existe différents capteurs de ce type, tous basés sur le même principe. Le SPC (pour Snow Particle Counter) (Cliché 10) est constitué d'un faisceau optique qui est obstrué par le passage des particules (Sato and Kimura, 1993). Le diamètre et le nombre des particules de neige transportées sont détectés par leur ombre sur des semi-conducteurs photo-sensibles. L'amplitude du pic d'atténuation (U) du signal est proportionnelle à la taille de la particule (Figure 14). Ces particules sont classées en 32 tailles discrètes de 50 à 500 μm et le capteur retourne le nombre de particules pour chaque taille toutes les secondes. Ces particules sont considérées comme sphériques ce qui permet d'établir la relation suivante :

$$\text{Flux} = \sum_{n=0}^{31} x_n \times \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_n^3 \times \rho / S_f / t \quad \text{Equation 14}$$

Avec X_n le nombre de particules détectées dans la classe de taille n,
 R_n la taille moyenne des particules de la classe n,
 ρ la densité théorique des particules,
 S_f la surface du faisceau 50 mm^2 ,
 t le temps soit une seconde.

Le SPC permet d'accéder à la granulométrie des particules transportées mais également à une mesure plus précise du flux en un point grâce à une estimation de la densité des particules. On visualise ainsi que **le diamètre des particules est d'autant plus faible que la hauteur au dessus du manteau neigeux est importante (Figure 15).**

La surface du faisceau de 50 mm^2 est faible et rend les mesures particulièrement sensibles à des effets locaux.



Cliché 10. Le SPC (Snow Particle Counter) (H. Bellot/ Irstea)

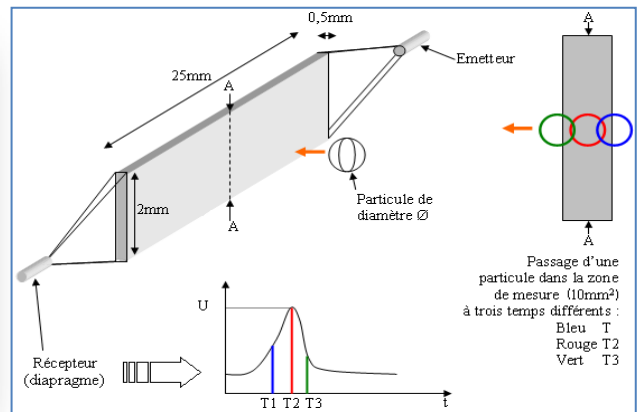


Figure 14. Principe de fonctionnement du SPC

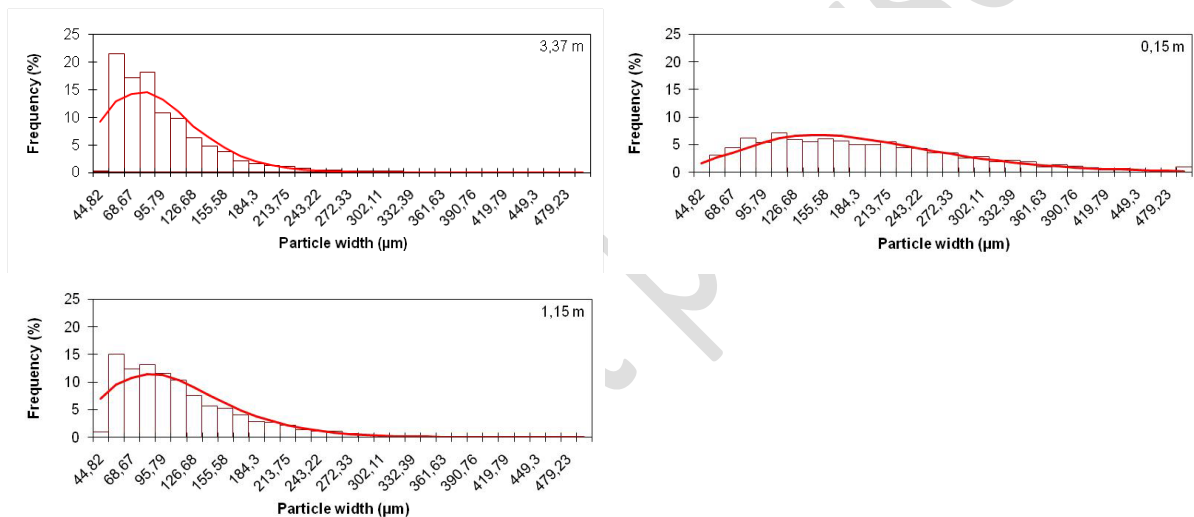


Figure 15. Evolution de la granulométrie en fonction de la hauteur pour un épisode de transport de neige au Col du Lac Blanc

4 LES PROBLEMES LIES AU TRANSPORT DE LA NEIGE PAR LE VENT

En France, on distingue généralement le contexte "haute montagne" du contexte "plateau" :

- dans un contexte « haute montagne » au relief accidenté, les principaux problèmes rencontrés sont la formation de corniches et de plaques à vent génératrices d'avalanches et l'ablation de la neige sur les domaines skiables.
- dans un contexte « plateau » au relief peu marqué, telles que les régions polaires ou le Massif Central, le transport de la neige par le vent pose surtout des problèmes de circulation routière, même si ces derniers ne sont pas absents des zones de montagne. Les problèmes les plus courants sont le manque de visibilité et surtout la formation de congères sur les voies de communications. L'enfouissement des bâtiments reste un problème marginal que ce soit dans un contexte plateau ou un contexte de haute montagne.

4.1 TRANSPORT DE NEIGE PAR LA VENT ET REPARTITION DE LA NEIGE EN MONTAGNE

L'écoulement du vent est la clef de la répartition de la neige au sol. Schématiquement lorsque la vitesse du vent est supérieure à la vitesse seuil d'érosion, la neige est arrachée. Par contre lorsque le vent décélère et atteint une valeur inférieure à la vitesse seuil de dépôt, la neige s'accumule.

En montagne la topographie accidentée modifie le profil de vitesse de vent. A l'approche d'une crête le vent au sol accélère et sous le vent de la crête, dans la zone tourbillonnaire où il peut y avoir formation d'un écoulement contraire, il décélère produisant ainsi une accumulation de neige (Figure 16). Lors d'une chute de neige ventée, le vent générera des zones préférentielles d'accumulation de neige.

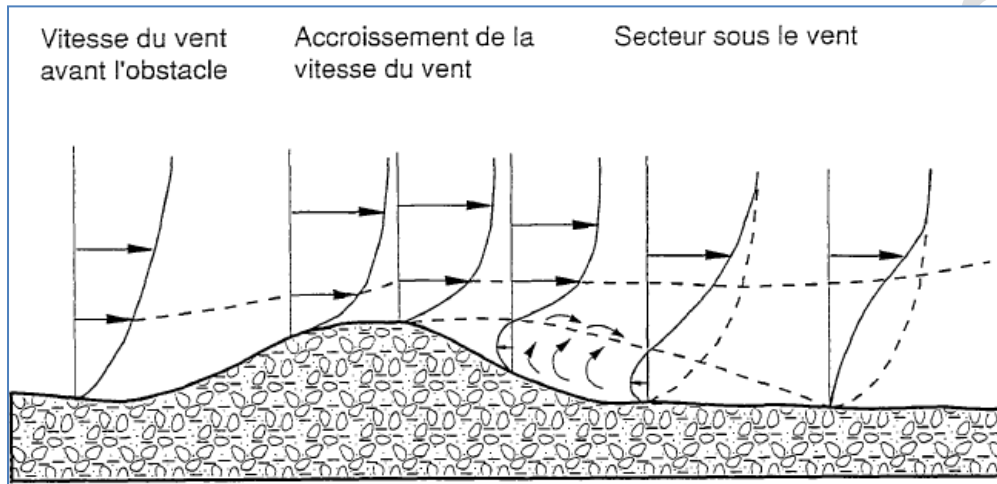


Figure 16. Influence du relief sur le profil vertical du vent (d'après Gandemer 1981)

Ce phénomène n'est pas seulement visible au niveau des crêtes : à une échelle plus fine, des perturbations topographiques comme des ruptures de pentes, un bâtiment, peuvent elles aussi entraîner des dépôts de neige, appelées congères (Figure 17).

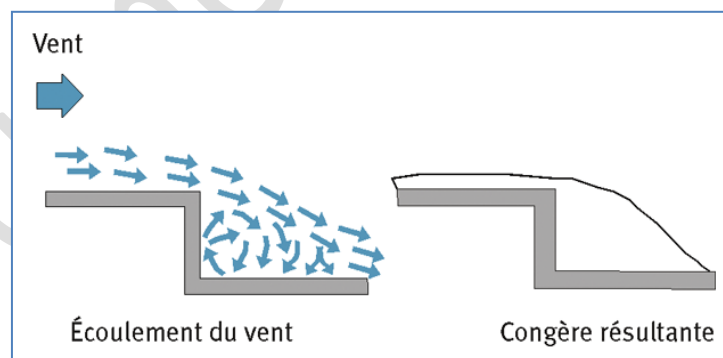
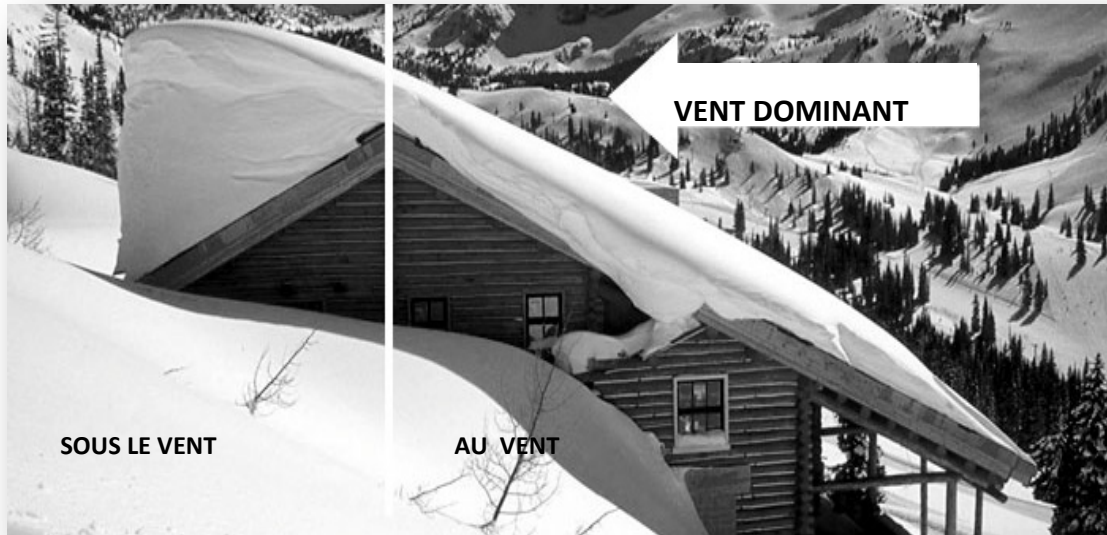


Figure 17. Principe de formation d'une congère

L'illustration qui suit (Cliché 11) est particulièrement pédagogique et permet d'avoir en coupe transversale la visualisation des zones de dépôts (sous le vent) et d'érosion (au vent). Le terme « au vent » signifie à l'amont du point considéré par rapport à la direction du vent et le terme « sous le vent » signifie à l'aval du point considéré par rapport à la direction du vent.



Cliché 11. Formation d'une accumulation de neige au niveau d'un toit (Bruce Tremper)

Tout n'est cependant pas systématiquement aussi simple. L'écoulement des fluides autour d'objets tridimensionnels comme des bâtiments est souvent plus complexe (Figure 18) que l'écoulement au niveau d'une crête. Un des exemples courants est la formation de tourbillons en fer à cheval créant localement des zones de contraintes importantes et érodant la neige. Ce type d'écoulement conduit à la formation d'un cratère visible sur le Cliché 12.

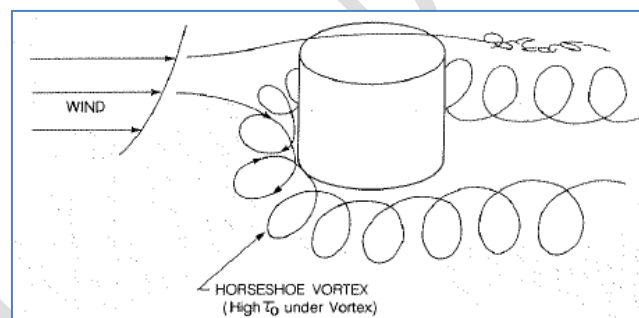


Figure 18. Formation des tourbillons en fer à cheval (Gray et Male, 2004)



Cliché 12. Formation d'un cratère autour d'un bâtiment (H. Bellot/Irstea)

A une échelle encore plus fine, le vent va sculpter des formes éoliennes au sol, dunes, ripples, sastruggis, qui seront plus particulièrement abordées au paragraphe 7.2. Ces structures éoliennes ne constituent pas un problème pour la gestion de la neige en montagne mais permettent de connaître les directions des vents au sol et auront donc un intérêt particulier lors de la conduite des projets.

4.1.1 LA FORMATION DES CORNICHES

C'est la rapidité du frittage entre les grains de neige transportée qui permet d'expliquer la formation de corniches. Il est nécessaire néanmoins que les grains soient en contact un laps de temps suffisant et une des hypothèses est l'existence de forces électrostatiques dans la couche de saltation.

Dans la littérature, il y a peu d'études concernant les processus physiques conduisant à la formation de corniches et les articles, souvent anciens, se limitent à une partie descriptive et des hypothèses non encore confirmées. On peut citer l'étude de (Montagne et al., 1968) dans le Montana. Des corniches situées sur les pentes (35°) sous le vent du Bridger Range ont été suivies pendant l'hiver 66-67. L'épaisseur maximale des corniches en fin d'hiver était d'environ 10 m et elles s'étendaient de part et d'autre de la ligne de crêtes jusqu'à 15 m. Pour des pentes plus raides, cette composante horizontale du développement aurait été plus limitée.

D'après Montagne et al. (1968) (Figure 19), le type le plus commun de croissance de corniches conduit à la formation d'un coin (« wedge accretion type») sous le vent de l'arrêt sous l'effet du vent. Ce coin forme initialement une pente de 50 à 70° par rapport à la verticale (« accretion face »). Montana et al (1968) font également mention de deux autres types de croissance nommés respectivement « feuillets » (« sheet accretion type ») ou vertical (« vertical accretion type») sans être très précis sur les conditions météorologiques qui y conduisent. Le feuillet, épais de quelques centimètres, peut s'étendre en surplomb jusqu'à une dizaine de centimètres. Dans le cas de la croissance verticale, la corniche se développe simplement en hauteur sans l'extension verticale. Seule la formation de la corniche avec apparition du coin, caractéristique d'un épisode de transport, est reprise dans l'ouvrage « Avalanche Handbook » de McClung et Schaerer (1993). Ces coins (Clichés 13 et 14) et ces feuillets (Cliché 15) peuvent se densifier et durcir et former ainsi la base de nouvelles couches successives. Mais ils peuvent également s'effondrer sous l'effet de leur propre poids ou se recourber vers le bas toujours sous l'effet de la gravité (Cliché 16) jusqu'à éventuellement emprisonner des poches d'air. Cette déformation est accélérée pour des températures proches de 0°C en raison de la plasticité accrue de la neige (la déformation plastique est la déformation irréversible d'un objet avec réarrangement des éléments constitutifs du matériau sans qu'il y ait rupture). Elle peut être simultanée avec la croissance de la corniche.

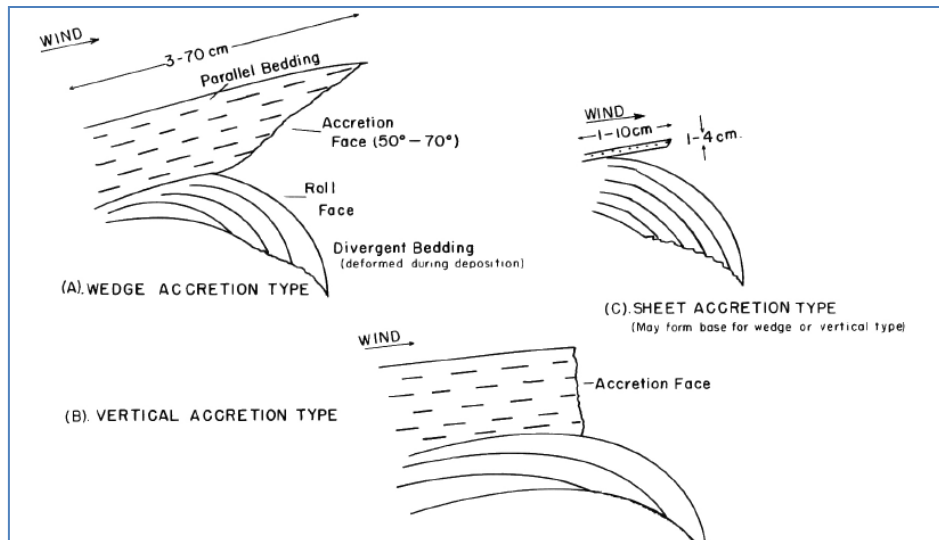


Figure 19. Les différents types de croissance de corniches selon Montana et al. (1968)



Cliché 13. Corniche présentant une forme en coin (Meteo-France)



Cliché 14. Corniche présentant une forme en coin (Irstea)



Cliché 15. Formation de la plaque horizontale sous le vent (F. Valla/Irstea)



Cliché 16. Coin s'affaissant sous l'effet de son poids (les différentes couches de formation sont très visibles) (F. Naaim-Bouvet/Irstea)

Le processus de formation des corniches est bien souvent déduit des coupes en travers faite une fois que la corniche s'est affaissée et non pendant la formation, ce qui peut conduire à des erreurs d'interprétation. Ainsi il a souvent été fait l'hypothèse que la corniche se forme parce que la neige tournoie dans les tourbillons créés sous le vent de la crête en étant plaquée au niveau de la paroi et ce essentiellement à cause de la forme arrondie de la corniche (Seligman, 1962 ; Verge et Williams, 1981). Des japonais (Kobayashi et al., 1988) ont eu l'idée d'étudier la formation des corniches en aspergeant d'un spray coloré la surface des corniches pendant leur formation (au niveau d'un trou creusé artificiellement puis au niveau d'une crête). Il apparaît ainsi clairement qu'initialement la corniche croit en se prolongeant sous le vent comme une plaque horizontale (Cliché 15) (donc on est finalement proche de la description de Montagne avec l'accrétion en feuillets). Puis le spray montre que c'est la face supérieure de la corniche, et non la face inférieure de la corniche qui se charge en neige (pendant l'épisode de transport, la face supérieure colorée est immédiatement recouverte de neige alors que la face inférieure garde la couleur du spray). Le chargement de la plaque est d'ailleurs renforcé parce que la plaque s'incline progressivement sous l'effet de son propre poids, créant ainsi une zone de sillage favorable au dépôt de neige. La surface supérieure de la corniche est toujours horizontale pendant l'épisode de transport, le sillage étant immédiatement comblé par le dépôt de neige. Après l'arrêt du transport de neige par le vent, le coin pourra perdre son horizontalité et s'affaisser par déformation plastique. Ses différentes couches successives sont d'ailleurs bien souvent visibles sur les corniches (Cliché 17).

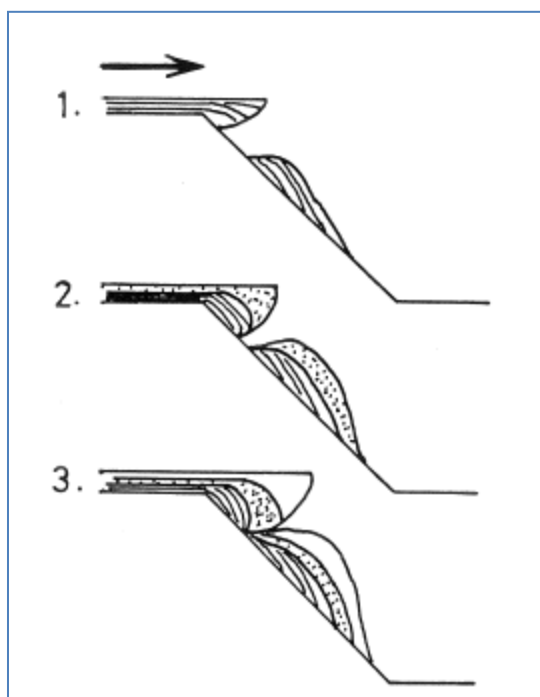


Figure 20. Diagramme schématisant le processus de formation d'une corniche et expériences associées avec marqueur de couleur (Kobayashi et al., 1988)



Cliché 17. Corniche résultant du processus de formation décrite sur la Figure 20 (F. Naaim-Bouvet/Irstea)

Une des grandes questions est de savoir à partir de quel angle de pente une corniche peut se former. Föhn et Meister (1983) ont mesuré la position et la taille de zones d'érosion et d'accumulation produites sur des versants proches des arêtes, perpendiculaires aux vents dominants, avec une pente comprise entre 10° et 35° . Les versants sous le vent avec un angle de pente supérieur à 25° développent une corniche qui s'agrandit pendant l'hiver. La vitesse de vent seuil de formation d'une corniche est la même que celle de l'érosion du manteau neigeux (généralement de 5 à 10 m/s). La croissance de la corniche se produit entre 5 et 25 m/s. Pour un vent supérieur à 25 m/s, d'une part la base est érodée, ce qui limite la croissance et d'autre part, l'essentiel de la neige transportée, l'est par diffusion turbulente et dans ce cas les particules de neige ne se déposent plus.

La densité au sein d'une corniche peut atteindre 500 kg/m^3

Les corniches se forment généralement au niveau des crêtes mais peuvent être observées à tout endroit présentant une forte rupture de pente (Cliché 18 et Cliché 19). Plus la face sous la corniche est raide, plus le surplomb du sommet est grand et plus la corniche est instable. Les avalanches peuvent être déclenchées par des ruptures de corniches mais peuvent également endommager les structures de protection (type râteliers) en aval (McClung et Schaerer, 1993).



Cliché 18. Corniche sous le vent d'une bande boisée, faisant sans doute suite à la formation d'une congère présentant une face raide (là encore les couches successives sont visibles) (S. Monier)



Cliché 19. Formation de corniches au niveau du bâtiment des douanes de la Porta, liée notamment au raccordement du bâtiment au terrain naturel (Socotram)

4.1.2 L'ÉROSION DES CRÊTES

L'accélération au niveau des crêtes peut conduire à l'ablation totale du manteau neigeux (Cliché 20). Ce n'est pas un facteur de risque mais une gêne pour la gestion des domaines skiables qui peut conduire à l'utilisation de barrières à neige par exemple.



Cliché 20. Ablation du manteau neigeux au niveau d'une crête après un épisode de transport de neige (M. Roussel/Irstea)

4.1.3 LA FORMATION DE PLAQUES A VENT

Le vent est un facteur important à l'origine de la formation des plaques. En effet, le transport de la neige par le vent, pendant ou après la chute, brise les cristaux, réduit sensiblement leur taille et permet à la neige redéposée de prendre rapidement une certaine cohésion, souvent forte, appelée cohésion de frittage. On rappelle ici que la vitesse de formation des ponts de glace, éléments constitutifs de la cohésion de frittage est une fonction décroissante de la taille des grains, c'est-à-dire que plus la taille des grains diminue, plus la

cohésion est rapide. Or le transport de neige par le vent conduit à une diminution de la taille des grains, accélère donc le phénomène de frittage. Il n'est pas nécessaire que le vent soit très violent : avec un vent de seulement 25 km/h, une plaque peut se former en quelques heures.

Si, d'une manière générale, les plaques se forment sur le versant abrité du vent au voisinage des crêtes, ce n'est pas systématiquement le cas : des plaques peuvent se former bien plus bas que sous les crêtes principales, mais également sur les versants exposés au vent, à la faveur d'une rupture de pente.

Une plaque de neige, formée à la suite d'une métamorphose de faible gradient, ou bien sous l'action du vent, est constituée de neige relativement compacte (grains fins et éventuellement particules reconnaissables) de masse volumique comprise entre 150 et 400 kg/m³. Le phénomène de plaque peut apparaître très tôt, dès qu'un début de cohésion de frittage existe (plaque friable). Elle a une cohésion généralement bonne, mais peut avoir une consistance poudreuse dans le cas de plaques friables.

4.1.4 LA REPARTITION DE LA NEIGE A L'ECHELLE DU MASSIF

M. Mases (1997) a proposé un modèle de répartition spatiale de la neige à base de connaissances empiriques. Pour cela, elle a utilisé les données issues du site du Stillberg, Ce versant exposé nord-est situé à proximité de Davos (Suisse) est constitué d'une alternance d'arêtes et de talwegs avec de nombreux couloirs d'avalanches. Les hauteurs de neige sont relevées par l'IFENA depuis 1958 grâce à un réseau de perches à neige (entre 370 et 433) et les données météorologiques sont disponibles depuis 1963 (Figure 21).

Ses conclusions sont les suivantes :

- Pour une direction du vent donnée, les zones d'accumulation et d'érosion sont toujours, à peu près, localisées aux mêmes endroits. Cette caractéristique indique que la topographie joue un rôle déterminant sur la répartition de la neige.
- La plupart des arêtes au vent, dans la partie la plus haute du site, ont une zone très balayée, sans neige.
- L'accumulation de neige s'étend au delà de cette zone, et atteint un maximum dans le versant aval.
- Sur les versants au vent une rupture de pente d'angle faible (environ 10 degrés) est suffisante pour engendrer une accumulation de neige.
- La pente du versant dans l'axe la direction du vent influence le plus la répartition de la neige transportée par le vent et doit être pris en compte.

Au début de la saison :

- Les versants qui sont en premier remplis de neige, sont aussi les versants les moins raides (attention la pente du versant est calculée ici par rapport à la direction du vent dominant, il ne s'agit pas de la pente perpendiculaire à l'arête). Ce sont les premiers à s'approcher du profil d'équilibre.
- Les versants les plus raides (>30°) sont remplis plus tard et par des vents très forts.

Les zones qui présentent un profil apparent, parallèle au vent, peu raide et une pente réelle (prise dans la plus grande pente) très importante, sont potentiellement des zones très instables donc favorables aux déclenchements d'avalanches.

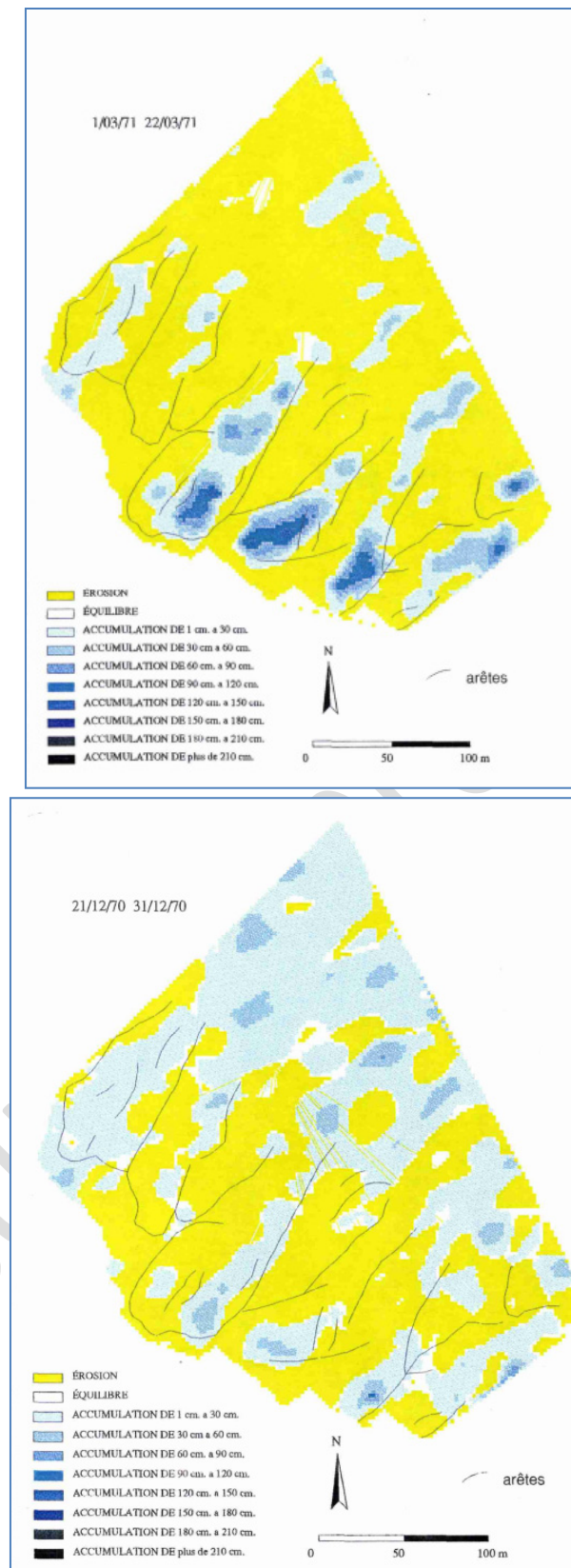


Figure 21. Carte de dépôt et d'érosion sur le site du Stillberg par vent de sud-est (vent fort sur le graphique de gauche et vent faible sur le graphique de droite) d'après Mases (1997)

Des zones de dépôt par vent faible peuvent devenir des zones d'érosion par vent fort (Figure 21). En effet pour un écoulement turbulent développé et pour une direction de vent donné, on peut faire l'hypothèse que le

rapport U_A/U_B est constant, U_A étant la vitesse en un point A et U_B en un point B. Autrement dit, si la vitesse en un point B augmente alors la vitesse en un point A augmentera dans les mêmes proportions et pourra alors dépasser la vitesse seuil d'arrachement des particules.

Ce type de mesures n'est toutefois pas suffisamment précis spatialement pour représenter les formes des dépôts à petites échelles. Par ailleurs, dans des zones accidentées, une perche à neige est difficilement représentative de la hauteur de neige environnante.

Actuellement le laser scan permet d'accéder à des représentations à haute résolution spatiale. Les relevés laser-scanner sont comparables à des photographies en 3D de l'objet mesuré. Chaque point scanné sur le terrain est immédiatement connu en coordonnées X, Y, Z. Dans l'étude à laquelle nous faisons référence (Figure 22), (Prokop et Pickler, 2011), le laser scan est un laser scan terrestre Riegl LPM-321. Ce système permet de calculer la distance avec la surface de l'objet étudié en calculant le temps nécessaire au trajet aller-retour de l'impulsion du faisceau laser réfléchi. La longueur d'onde est ici de $0,9\mu\text{m}$ (proche infra-rouge) et est adaptée à la mesure de surface neigeuse (tous les laser-scans ne permettent pas mesurer la surface neigeuse). La précision est de 3 cm à une distance de 100 m. Une zone de départ d'avalanche située à proximité de Lach dans la province du Vorarlberg en Autriche a ainsi été suivie par relevés laser-scan pendant 4 ans. Les données de 2 stations météorologiques situées à proximité de la zone d'étude ont également été utilisées.

Dans le couloir la hauteur de neige de période de retour 150 ans, calculée à partir des données météorologiques et de méthodes statistiques adaptées au calcul de valeurs extrêmes, est de 6,8 m. Sur les 4 années de mesures, la hauteur moyenne annuelle de neige dans le couloir varie de 2,3 m à 3,8 m et chaque année plus de 10% du couloir d'avalanche présentait une hauteur de neige supérieure à 6,8 m, qui est donc la hauteur de neige de période de retour 150 ans calculée sans tenir compte du transport de neige par le vent. Ces chiffres à eux seuls sont parlants et montrent la nécessité de mieux connaître les accumulations liées au vent sur un site donné que ce soit pour dimensionner les ouvrages paravalanches actifs (type râteliers) ou pour déterminer les volumes de zone de départ à prendre en considération dans les modèles dynamiques d'avalanches.

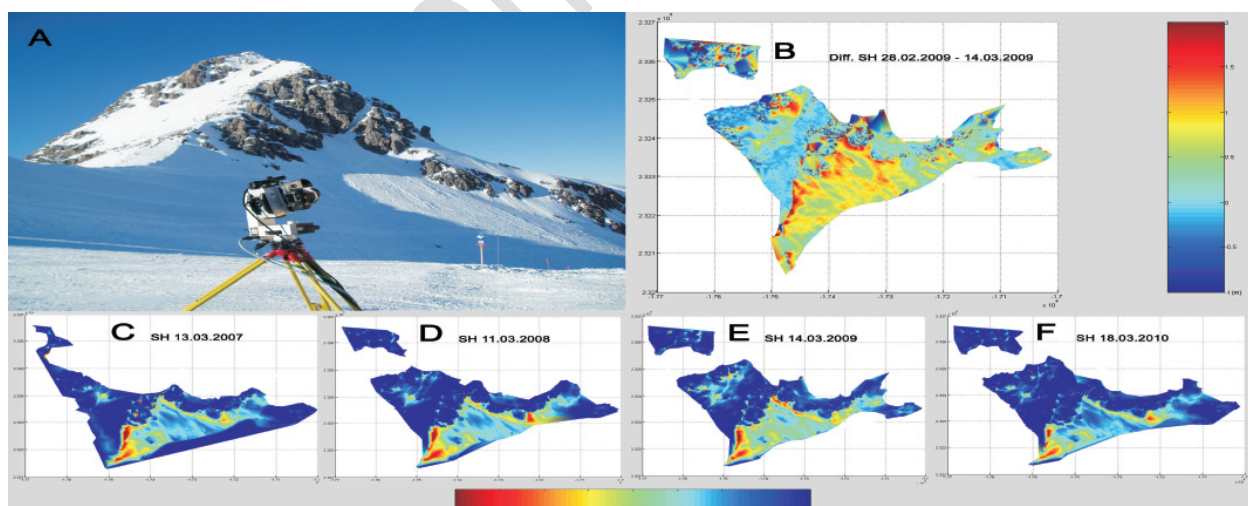


Figure 22. A. Zone d'étude avec en arrière plan le laser scan terrestre et distribution spatiale de la neige à différentes époques (B,C,D,E,F) (Prokop et Pichler, 2011)

4.2 TRANSPORT DE NEIGE PAR LE VENT ET RISQUE D'AVALANCHE

Lorsque l'on s'intéresse à la protection paravalanche, on classe généralement les différents types d'avalanches en fonction de leur dynamique propre : avalanche de neige dense, avalanche de neige poudreuse et avalanche mixte. Mais les prévisionnistes, qui s'intéressent donc à l'occurrence du phénomène, proposent une classification faisant appel au mécanisme même du déclenchement à l'origine du départ de l'avalanche. On distingue ainsi dans ce cas :

- les avalanches de neige récente
- les avalanches de plaques (dont la plaque à vent est un cas particulier)
- les avalanches de fonte.

Cette dernière classification présente l'avantage de pouvoir présenter clairement l'influence du transport de neige par le vent sur le déclenchement des avalanches. Néanmoins dans ce cas, la plaque friable constituée de neige récente ayant pris un peu de cohésion par l'effet du vent se trouve classée avec les avalanches de neige récente alors que son comportement mécanique s'apparente plus aux avalanches de plaques.

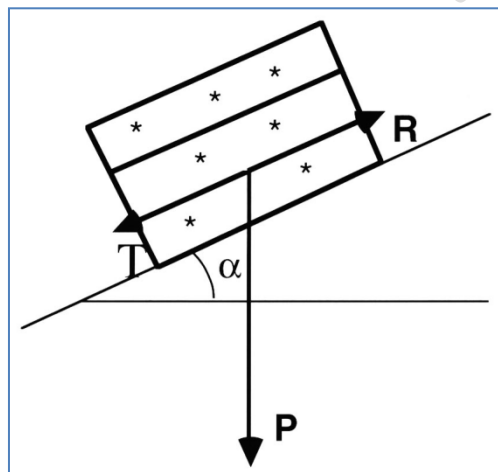


Figure 23. Schéma simplifié des forces en présence au sein du manteau neigeux (P : poids de la neige, T : traction exercée sur le manteau neigeux, R : ensemble des forces de résistance, α : inclinaison de la pente) (CEN, CAF, ANENA, 2008)

Ce schéma (Figure 23) représente les différentes forces présentes au sein du manteau neigeux. Parallèlement à la pente on trouve ainsi :

- la force de traction T, composante du poids parallèle à la pente et qui s'exprime par : $T = P \cdot \sin \alpha$
- l'ensemble des forces de résistance (ou de réaction) R qui dépendent, d'une part de la cohésion de la neige et des différentes strates entre elles, et d'autre part du frottement de la neige au sol et des ancrages du manteau neigeux.

La compréhension des phénomènes mécaniques qui expliquent le déclenchement des avalanches est relativement complexe car les différentes couches de neige ont des propriétés mécaniques différentes et qui évoluent avec le temps.

Tant que la force de traction n'excède pas la force de résistance, l'équilibre des forces est stable. Cet équilibre est susceptible d'être rompu dès que la résistance diminue ou que la traction augmente.

L'augmentation de la traction peut être due à (i) une chute de neige ou de pluie, (ii) au passage d'un skieur, (iii) à la chute d'une corniche ou (iv) à l'onde de choc créée par une explosion.

La diminution de la résistance peut être causé par (i) une perte de cohésion de feutrage, de frittage ou capillaire consécutive à une métamorphose, (ii) par la perte d'ancrages (latéraux, amont ou aval), (iii) par la diminution du frottement inter-strates ou au sol (présence d'un film d'eau liquide) ou encore (iv) par l'effet d'une explosion.

Le transport de neige par le vent accentue donc le risque d'avalanche du fait de la rupture possible de la corniche et de la formation de plaques à vent.

Mais il faut retenir que toutes les avalanches avec départ en plaques ne sont pas dues à du transport de neige par le vent. Les plaques de neige peuvent également se former à la suite d'une métamorphose de faible gradient. Par ailleurs, la formation d'une plaque de neige, que ce soit sous l'action du vent ou par métamorphose de faible gradient, n'est pas une condition suffisante pour l'apparition d'une avalanche avec départ en plaques. Il y a danger de rupture chaque fois que cette plaque de neige, peu plastique, est mal solidarisée avec la sous-couche, car celle-ci est fragile. Une couche fragile peut être constituée de gobelets, faces planes, givre de surface enfoui, neige roulée, neige fraîche, particules reconnaissables peu denses.

Dans le cas d'une avalanche avec départ en plaques, la cassure est toujours linéaire (Cliché 21), très nette et peut se propager très vite, grâce à la cohésion de la neige et ceci sur une grande distance. Le danger de déclenchement de plaques est plus fréquent sur des pentes comprises entre 30 et 45 degrés. Au-dessous de 30°, la plaque s'effondre généralement sans glisser, tandis qu'au-dessus de 45°, si le danger ne disparaît pas complètement, il sera le plus souvent limité car les versants se purgent habituellement pendant ou juste après les chutes de neige.



Cliché 21. Zone de cassure d'une plaque et avalanche de plaque (FX. Cierco)

R. Bolognesi (2003) a effectué une analyse statistique reliant la mesure quotidienne d'un index de transport de neige par le vent issu d'un driftomètre et de l'activité avalancheuse sur la station de l'Alpe d'Huez. 12 années d'observations systématiques de l'activité avalancheuse et de relevés nivo-météorologiques quotidiens à 2300 m ont pu être documentées, ce qui correspond à 500 cas bien documentés sans donnée manquante : cet échantillon comporte 5219 avalanches observées pour 6614 tentatives de déclenchement effectuées entre 1990 et 2002.

L'activité avalancheuse est décrite par :

- le nombre d'avalanches observées chaque jour, considérant que, le domaine étant sous surveillance permanente, un petit nombre d'avalanches rapportées signifie une bonne stabilité du manteau neigeux et non un éventuel manque d'observation
- le rapport du nombre d'avalanches observées au nombre de tentatives de déclenchement, ce qui traduit le niveau d'instabilité en indiquant les cas où l'activité avalancheuse a été en partie spontanée (rapport supérieur à 1).

On montre certes qu'il y a bien entendu des avalanches en l'absence de transport de neige par le vent mais surtout qu'un index de transport supérieur à 0 est presque systématiquement associé à une activité avalancheuse provoquée importante (Figure 24 et Figure 25).

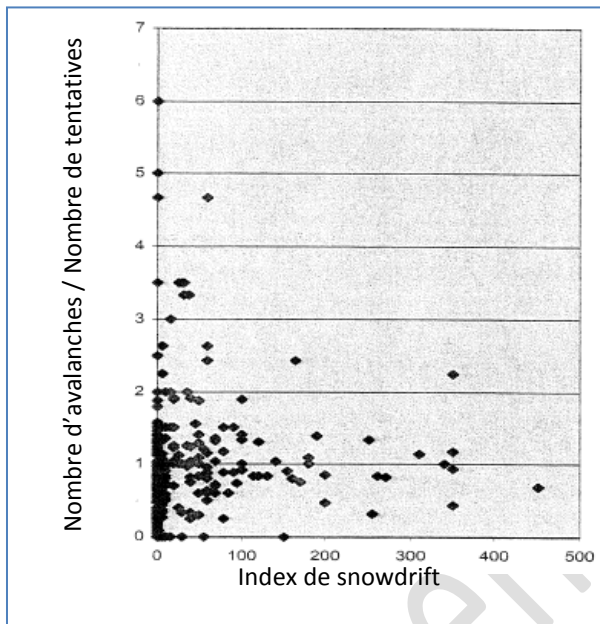


Figure 24. Nombre d'avalanches observées en fonction de l'index de snowdrift (R. Bolognesi (2003))

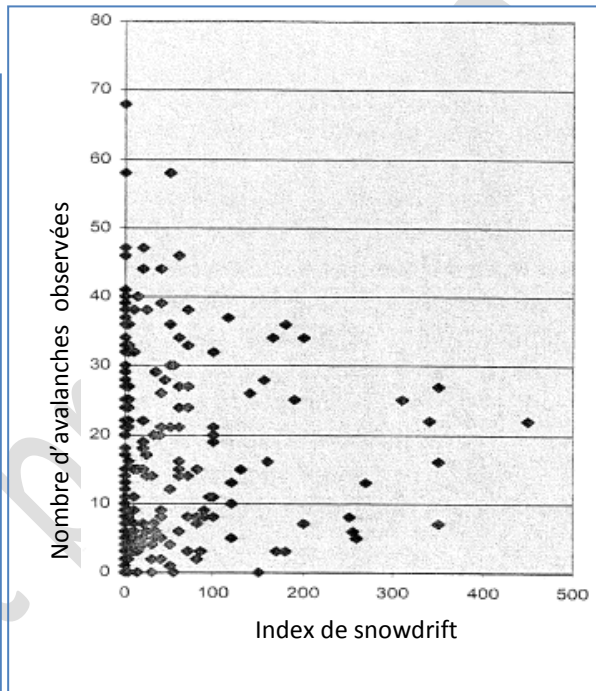


Figure 25. Rapport du nombre d'avalanches au nombre de tentatives de déclenchement en fonction de l'index de snowdrift (R. Bolognesi (2003))

5 LA MODELISATION DU TRANSPORT DE NEIGE PAR LE VENT

Utilisée dès les années trente pour reproduire sur des maquettes la formation de congères, les souffleries, qui reproduisent des tempêtes de neige en modèles réduits ont montré leur limite en tant qu'outil de modélisation. Néanmoins, elles restent indispensables pour étudier de façon fine les processus d'érosion, de transport et de dépôt, qui seront modélisés sous forme d'équations mathématiques. Elles permettent également de valider les modélisations numériques du transport de neige par le vent actuellement en cours de développement.

5.1 LA MODELISATION PHYSIQUE

L'un des outils de modélisation du transport de neige par le vent le plus ancien est la modélisation physique : elle consiste à reproduire sur une maquette (Cliché 22 et Cliché 23) un épisode de transport de neige par le vent par l'intermédiaire de critères de similitude déterminés à partir de l'examen des équations de bilan écrites

sous forme adimensionnelle (Naaïm-Bouvet, 2003). Ces critères permettent de passer de la maquette à la réalité. Cependant tous les critères ne peuvent être respectés simultanément.

Les particules ne peuvent par exemple pas être mises à l'échelle géométrique car la vitesse d'arrachement seuil serait alors trop élevée (Figure 7) et les particules seraient alors transportées essentiellement par diffusion turbulente alors que les accumulations sont générées par du transport par saltation. Les particules n'étant pas à l'échelle géométrique, les trajectoires ne le seront pas non plus : la longueur de la trajectoire de saltation de la particule dans la soufflerie ne devra pas dépasser la dimension caractéristique de l'objet que l'on cherche à étudier : ceci conduit généralement à ne pas descendre à une échelle inférieure à 1/100.

Le critère que l'on respectera sera :

$$\left(\frac{u_{*t}}{u_*}\right)_{maquette} = \left(\frac{u_{*t}}{u_*}\right)_{in situ} \quad \text{Equation 15}$$

Avec u_{*t} la vitesse de frottement seuil des particules (m/s),
 u_* la vitesse de frottement du vent (m/s),

Auquel viendra s'adjoindre :

$$\left(\frac{u_*}{u_F}\right)_{maquette} = \left(\frac{u_*}{u_F}\right)_{in situ} \quad \text{Equation 16}$$

Avec u_F la vitesse de chute des particules de neige (m/s).

si l'on cherche à modéliser de la chute de neige simultanément à du transport de neige.

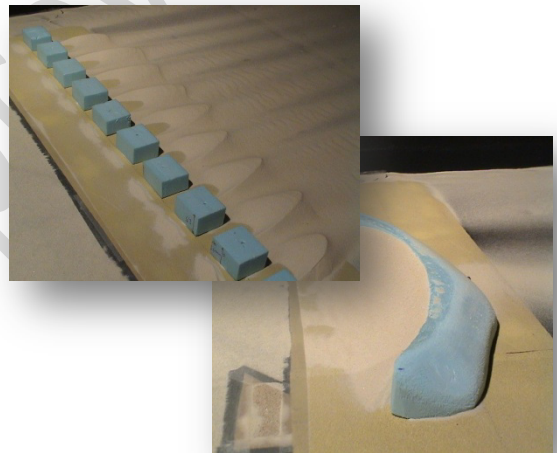
On rappelle que :

Si certains auteurs proposent également des critères de similitude pour estimer les durées de tempêtes, Irstea (Naaïm-Bouvet, 2003) n'y adhère pas et limite l'utilisation de la soufflerie à la comparaison de dispositifs entre eux pour des conditions initiales semblables ou à l'étude des formes des accumulations à saturation (« à saturation » signifie ici que l'on a atteint un profil d'équilibre et qu'aucun dépôt supplémentaire n'est envisageable)

Il n'est pas possible d'étudier la formation de corniches et de congères sur des pentes raides (à Irstea la soufflerie n'est pas climatique, c'est-à-dire que les particules utilisées pour reproduire de la neige sont des particules sèches). Même dans le cas de souffleries climatiques (Cliché 24, Cliché 25 et Cliché 26), la reproduction de corniches n'est guère possible car les particules de neige lorsqu'elles sont issues de canons à neige sont trop grosses pour permettre un frittage rapide.



Cliché 22. Modélisation en soufflerie (Irstea) de la formation d'accumulation au droit du refuge du Goûter – Hubert Raguet



Cliché 23. Modélisation en soufflerie (Irstea) de la formation de congères au sein d'un dispositif de protection paravalanche – F. Naaim-Bouvet/Irstea



Cliché 24. Expérimentations communes Cemagref/CEN/SLF/IMO dans la soufflerie climatique du CSTB de Nantes

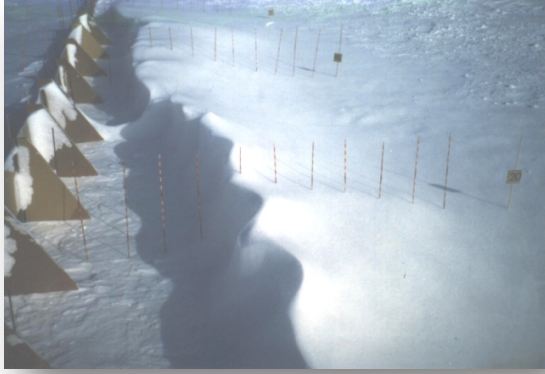


Cliché 25. Optimisation de l'agencement des convoies pour la construction de Concordia dans la soufflerie climatique du CSTB de Nantes

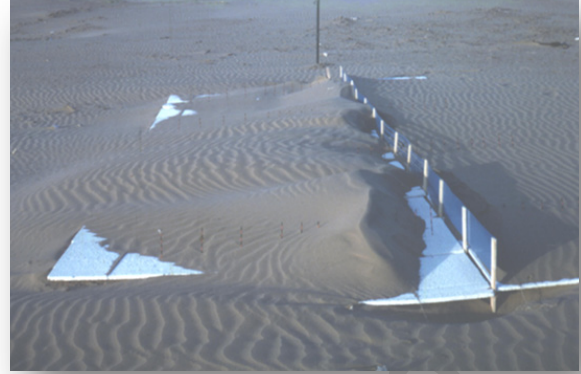


Cliché 26. Expérimentations Irstea au Cryospheric Environment Simulator

Il est à noter que si vous disposez une maquette à l'extérieur (Cliché 27 et Cliché 28) pendant un épisode de transport de neige, vous respectez également ces critères. C'est plus rudimentaire et moins pratique qu'une soufflerie (on ne décide pas quand le vent souffle et dans quelle direction et on ne peut reproduire deux expériences identiques) mais tout aussi efficace. Il faut également ne pas descendre à une échelle inférieure à 1/100.



Cliché 27. Modélisation in situ du fonctionnement d'une barrière à neige (Chicoutimi, Québec) – F. Sarret/Irstea



Cliché 28. Modélisation in situ du fonctionnement d'une barrière à neige (Agadir, Maroc) - A. Boudhour/Irstea

Mais la soufflerie diphasique n'est pas qu'un simple outil de modélisation physique : elle permet d'étudier tous les processus physiques en lien avec le transport éolien de particules (avancée des dunes, de ripples, profils de concentrations, instabilités), de tester différentes méthodes de mesures (anémomètres et capteurs acoustiques de transport éolien) mises en œuvre sur le terrain et de valider les premières étapes de la modélisation numérique de transport éolien.

Concernant la modélisation du transport éolien de la neige, les contraintes induites par la soufflerie (échelle limitée, impossibilité de reproduire la thermodynamique, les durées de tempêtes, coût et durée des expériences) en limite son utilisation. Ces dernières années ont donc vu le développement de modèles numériques.

5.2 LA MODELISATION NUMERIQUE

5.2.1 APPROCHE A L'ECHELLE DU COULOIR – NEMO (Irstea)

Le modèle numérique développé à Irstea sous le nom de NEMO (Naaim et al., 1998) (Michaux et al., 2001) est un modèle eulérien multiphasique basé sur la mécanique des milieux continus incluant une description des processus physiques de la couche de saltation et de diffusion. Sa maille est de l'ordre du mètre (ou moins) et son domaine d'application de quelques centaines de mètres (typiquement le couloir d'avalanche ou l'environnement au vent d'une voie de communication ou autour de bâtiments). Le but n'est pas ici de présenter en détail le modèle numérique NEMO mais d'en préciser les principales caractéristiques afin d'introduire les paramètres d'entrée du modèle nécessaires à une simulation. Ce modèle (Figure 26) prend en compte l'inertie de l'érosion et du dépôt de la neige.

La couche de saltation est décrite par sa hauteur et sa concentration, son équation de conservation de la masse ainsi que par deux vitesses de frottement, l'une pour la phase solide et l'autre pour la phase gazeuse. L'expression de ces deux vitesses prend en compte la concentration en particules. La couche de saltation est considérée comme la limite inférieure de la couche de diffusion turbulente.

La couche de diffusion turbulente est décrite par les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement formulées pour la phase solide et la phase gazeuse. L'interaction entre les deux phases est prise en compte par l'intermédiaire de la force de frottement entre les particules et le fluide porteur. La turbulence est modélisée par un modèle de type k- ϵ dans lequel une réduction de la turbulence avec la concentration en particules est considérée. La diffusion de la phase solide est supérieure à la diffusion de la phase gazeuse ce qui est pris en compte par l'intermédiaire d'un nombre de Schmidt inférieur à 1. L'échange entre la couche de

salutation et le manteau neigeux est pris en compte par un modèle de dépôt et d'érosion. Le maillage est adapté à l'évolution temporelle du dépôt.

Le modèle nécessite un jeu de paramètres incluant la vitesse de chute des particules, le nombre de Schmidt, la vitesse seuil d'arrachement des particules, la vitesse de frottement et la rugosité aérodynamique. NEMO a été testé avec succès en comparant des congères obtenues en soufflerie et à saturation pour des particules sèches (sable, sciure,...) au droit d'une barrière à neige en modèle réduit (Figure 27). Dans ce cas, tous les paramètres d'entrée pouvaient être déterminés et restaient constants au cours du temps. Mais lorsque nous avons comparé les résultats avec des observations sur site au col du Lac Blanc, les résultats ont été moins concluants. Dans ce cas les entrées du modèle provenaient de données issues des centrales de mesures (vitesse du vent variant toutes les dix minutes et durée effective de l'épisode de transport) et de formulations semi-empiriques (débit maximal dans la couche de saltation, hauteur de saltation, rugosité aérodynamique modifiée par la présence de particules, produit de la vitesse de chute par le nombre de Schmidt) qui n'avaient pas été obtenues dans les Alpes. Certes, le modèle initial n'avait pas été utilisé tel quel du fait du temps de calcul et des hypothèses supplémentaires avaient été faites. Cependant il est vraisemblable qu'une source importante d'incertitudes provenait du manque d'évaluation précise des paramètres d'entrée. A terme les entrées de NEMO devraient être les sorties des modèles développés par Météo France.

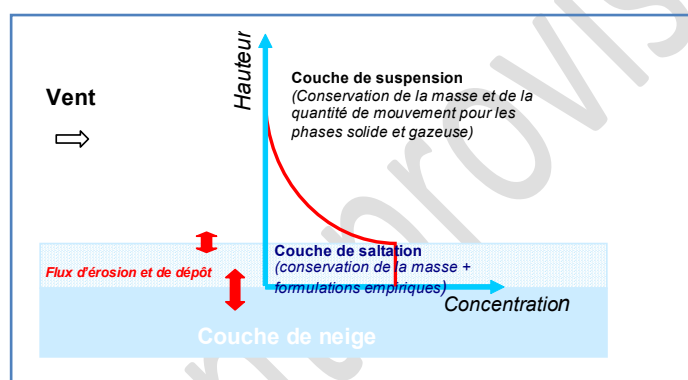


Figure 26. Principe de la modélisation dans NEMO

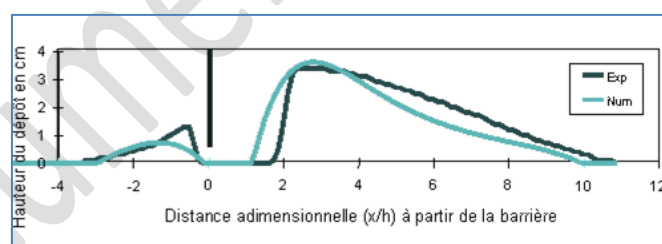


Figure 27. Comparaison des congères obtenues en soufflerie et numériquement

5.2.2 APPROCHE A L'ECHELLE DU MASSIF – SYTRON (METEO FRANCE)

La chaîne numérique SCM développée au Centre d'Etudes de la neige (Météo France) est constituée des modules Safran, Crocus et Mepra. Il s'agit d'un ensemble automatique de simulation du couvert neigeux, de sa stratigraphie et de ses risques potentiels à l'échelle du massif (environ 400 km²) mais à diverse altitudes, expositions et pentes. L'indice d'occurrence de transport calculé automatiquement, est utilisé à la fois opérationnellement par les prévisionnistes de Météo-France mais est aussi intégré dans des modélisations de plus haut niveau afin d'initier des calculs plus complexes de flux de neige transportée. Sytron1 est une paramétrisation, en test pré-opérationnel, intégrée à la chaîne SCM qui, à l'échelle du massif, vise à simuler les effets du transport de neige sans réellement modéliser les phénomènes sous-jacents à échelle fine. Pratiquement, Sytron 1 enlève une partie du manteau neigeux simulé sur le versant au vent et la redépose sur

le versant sous le vent pour toutes les altitudes représentées par SCM (pas de 300m) pour un même massif. Les différentes étapes de l'estimation sont :

- Estimation de la vitesse et de la direction du vent de transport en utilisant Safran et détermination de l'occurrence de transport en utilisant l'indice d'occurrence de transport.
- Détermination de la quantité de neige transportable sur deux versants opposés (reptation + saltation + diffusion turbulente) et perte par sublimation.
- Modification de Crocus pour prendre en compte dynamiquement les perturbations induites par le transport de neige (modification des grains, densification, agrégation)

L'objectif final est d'introduire un schéma de transport éolien de la neige et de proposer des diagnostics dans la modélisation numérique du risque d'avalanches en France (PRA). Des premiers tests ont été menés pendant l'hiver 2012-2013 au centre météorologique de Grenoble qui est responsable des bulletins quotidiens de prévision du risque d'avalanches sur l'Isère (Guyomarc'h et al., 2013).

6 INGENIERIE DES OUVRAGES PARAVALANCHES

On entend par ouvrage à vent tout ouvrage modifiant localement le comportement du vent. Schématiquement, ils peuvent localement :

- créer une accumulation de neige (barrières à neige),
- accélérer le flux d'air et de neige (toit-buse),
- modifier la structure du manteau neigeux (panneaux vire-vent),
- modifier la topographie locale (pupitres).

Ces quatre types d'ouvrages sont utilisés en génie paravalanche. Nous reviendrons dans les paragraphes suivants sur le fonctionnement précis de ces différents types d'ouvrages mais il faut retenir dès à présent que pour une efficacité optimale les ouvrages doivent être implantés perpendiculairement à la direction des vents dominants. Il est donc nécessaire en tout premier lieu de bien connaître l'aérodynamique du site étudié.

6.1 LES BARRIERES A NEIGE

6.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET HISTORIQUE

Le principe de fonctionnement d'une barrière à neige est le suivant : lorsque le vent arrive au niveau de l'ouvrage, son écoulement est modifié ; il y a formation de zones tourbillonnaires accompagnées d'une réduction de la vitesse moyenne (Figure 28). La neige transportée par le vent se dépose donc dans ces zones de réduction de vitesse situées avant la barrière (**on parlera alors de congères au vent**) mais surtout après (**on parlera alors de congères sous le vent**).

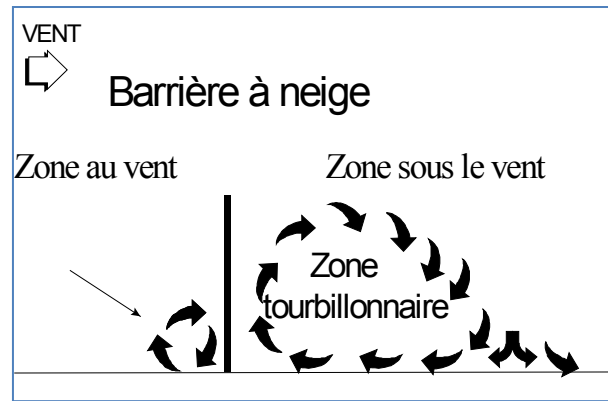


Figure 28. Zone de sillage au droit d'une barrière

Les barrières à neige sont destinées à stocker la neige à un endroit jugé réputé sans danger par rapport aux avalanches (ou aux voies de communication si l'on s'intéresse à la viabilité hivernale). La neige déposée présente une grande cohésion du fait du frittage. Elle est donc très difficilement remise en mouvement par le vent notamment s'il change de direction.

La technologie des protections par congères, notamment les barrières à neige, est ancienne (Figure 29). Dans la littérature française, l'article le plus ancien dont nous ayons connaissance a été rédigé en 1864 par M^r Nordling, ingénieur en chef du réseau central de la compagnie du chemin de fer d'Orléans et publié dans les « Annales des Ponts et Chaussées » sous le titre « Sur les modes de prévention des amoncellements de neige sur les chemins de fer ». Cet article, correspondant à une note présentée à l'appui du tracé définitif de la section de chemin de fer de Murat à Aurillac, relate une mission en Allemagne (Cliché 29) où la question du transport de neige s'est imposée avec force dès l'origine des chemins de fer. Ses observations de terrain lui ont permis de tirer des règles d'ingénierie, qui seront notamment repris par M^r Morard en 1896 pour la protection du chemin de fer de Lus-la-Croix-Haute (Figure 29).

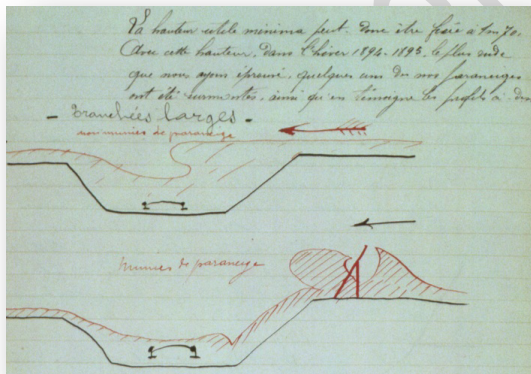


Figure 29. Extraits du rapport de M. Morard (source archive gare de Lus-la-Croix Haute)



Cliché 29. Barrières à neige protégeant l'aérodrome du Col de La Quillane (2nd guerre mondiale - installation allemande)

Pour ce qui est du génie paravalanche proprement dit, les premières « barrières » installées dans des zones de départ d'avalanches datent de 1912 (Faldum, 2600 m dans le Valais). Il s'agit en fait d'un mur en pierre de 370 m (Cliché 31) de long et 4 m de haut situé à 15 m de la zone de rupture de la pente dominant la zone avalancheuse. Les murs sont très épais à la base (1,7 m) et se rétrécissent au sommet (50 à 60 cm). On trouve d'autres exemples de ce type en Suisse (Cliché 30).



Cliché 30. Suisse, Jaunpass, Gastlosen, vallée d'Ablandschen (JM Taillandier).



Cliché 31. Vue générale du mur de pierre de 4 m de haut situé au vent de la zone de départ d'avalanche (altitude 2600m) _ Faldum (F. Sivardière, T. Castelle).

Afin de reproduire le fonctionnement d'un mur, les palissades pleines constituées de planches jointives ont été historiquement les premières barrières à neige ; mais elles sont rapidement enfouies dans le dépôt qu'elles provoquent et le tassement de la neige les détériore (Cliché 32).



Cliché 32. Congère générée par une barrière pleine sans garde au sol (F.Naaim-Bouvet/Irstea)

Ce type d'ouvrage est à prescrire. L'augmentation de la porosité de ces barrières rudimentaires et la mise en place d'une garde au sol a constitué une amélioration notable.

Les barrières à neige ont tout d'abord été étudiées in situ lors d'essais comparatifs, puis par modélisation physique et enfin par modélisation numérique. Les essais comparatifs ont été menés entre 1982 et 1988 conjointement par Irstea, le CETE de Lyon et la subdivision de Besse-en-Chandesse ; il s'agissait de tester et comparer différents types de barrières à neige disponibles sur le marché en suivant au cours de l'hiver les congères résultantes (Cliché 33, Figure 30). A partir des années 1990, Irstea a réalisé des essais en soufflerie par modélisation physique (Figure 30). Puis à la fin des années quatre-vingt dix le

comportement des barrières à neige a également été simulé numériquement. L'ensemble de ces études, couplé à une recherche bibliographique internationale, a permis d'élaborer la norme française NF P95-305.

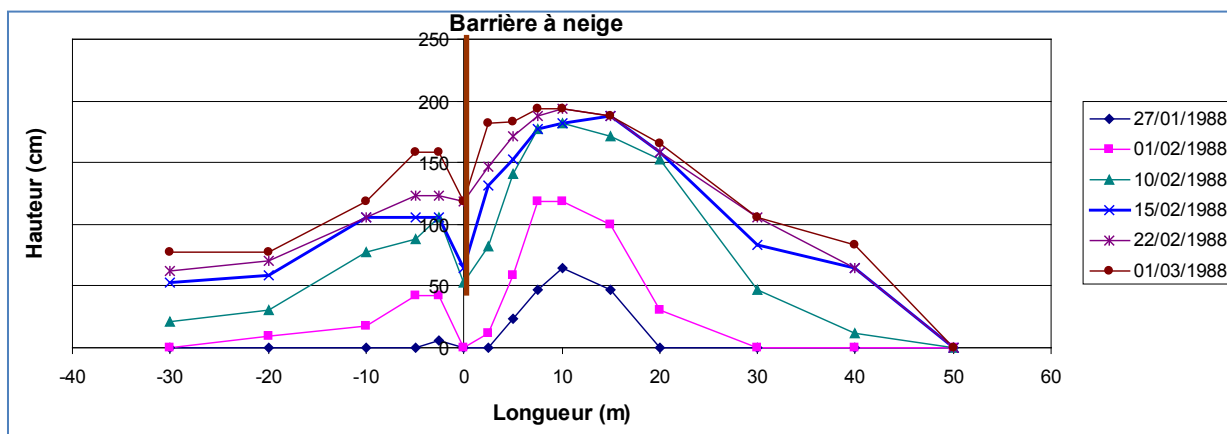
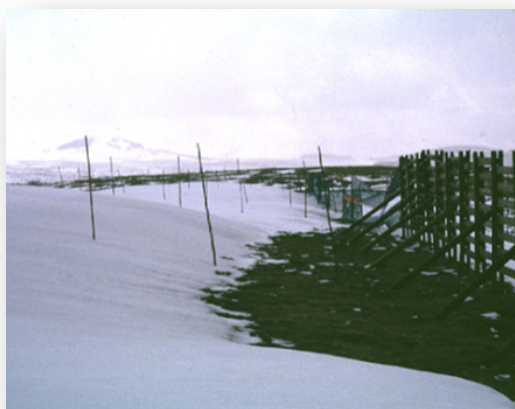
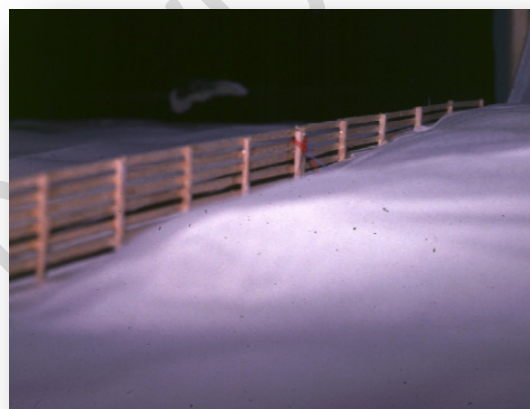


Figure 30. Evolution d'une congère au droit d'une barrière à neige à Besse-en-Chandesse



Cliché 33. Essais comparatifs à Besse-en-Chandesse (A. Sappey/Irstea)



Cliché 34. Modélisation physique du comportement d'une barrière à neige poreuse avec garde au sol sur terrain plat avec du sable dans la soufflerie d'Irstea (F. Naaim/Irstea)

La norme française NF P95-305 de décembre 1992 « Équipements de protection contre les avalanches - Barrière à neige - Spécifications de conception » prescrit les spécifications de conception de tous les équipements de type barrières à neige.

Ces spécifications de conception, qui seront complétées par des conseils d'implantation, vont maintenant être présentées.

6.1.2 POROSITE ET GARDE AU SOL

Le tablier d'une barrière à neige (nappe ajourée traversée par le vent dont elle perturbe l'écoulement) se définit principalement par sa hauteur, sa garde au sol et sa porosité.

La porosité et la garde au sol sont dites optimales, lorsque, pour une hauteur donnée, la barrière à neige permet d'obtenir un dépôt de neige de volume maximal par mètre linéaire.

6.1.2.1 POROSITE

La **porosité ou indice des vides** est le rapport en pourcentage de la surface des vides sur la surface totale. Un mur opaque aura donc une porosité de 0%. L'indice des vides a une influence directe sur la forme des congères générées par les barrières à neige. Pour une vitesse de vent donnée, lorsque la porosité augmente, les congères deviennent plus longues et moins épaisses. La **porosité optimale est comprise entre 40 et 60%** (Figure 31). Une **maille de l'ordre de 10 à 20 cm** est recommandée sous nos climats. Cette dernière prescription est liée à l'apparition du givre qui en obturant rapidement les mailles de petite taille ramène la porosité à 0% (Cliché 37).

C'est l'écoulement du vent qui permet d'expliquer ces résultats. En effet, lorsqu'un flux d'air rencontre une barrière imperméable, il est dévié vers le haut. La section de passage de l'air étant réduite, la vitesse s'accroît dans cette zone et la pression statique diminue. Cette diminution de pression crée un appel d'air qui se traduit par un mouvement ascendant dans la zone située immédiatement derrière l'obstacle. Il y a au niveau du sol et sous le vent de la barrière un courant de retour de sens opposé à l'écoulement général. La veine défléchie, qui est en état de dépression, a tendance à se rabattre très rapidement et la zone perturbée par l'obstacle n'a qu'une extension relativement faible. On peut visualiser cet écoulement (Cliché 35) en soufflerie en ensemençant l'air avec des particules et en éclairant l'écoulement avec une nappe laser parallèle à l'écoulement. Des traits longs sont représentatifs d'une forte vitesse alors que les points et traits de faible longueur sont représentatifs d'une faible vitesse.

Dans le cas d'une barrière à neige perméable, une partie seulement du flux incident contourne la barrière par le haut. L'accroissement de vitesse dans le flux défléchi est donc plus faible et la dépression moins importante. Par ailleurs, comme un certain débit d'air passe à travers l'obstacle, le mouvement tourbillonnaire est moindre. Le rabattement de la veine défléchie est également beaucoup plus progressif, aussi, la zone protégée s'étend sur une distance beaucoup plus grande (Cliché 36).

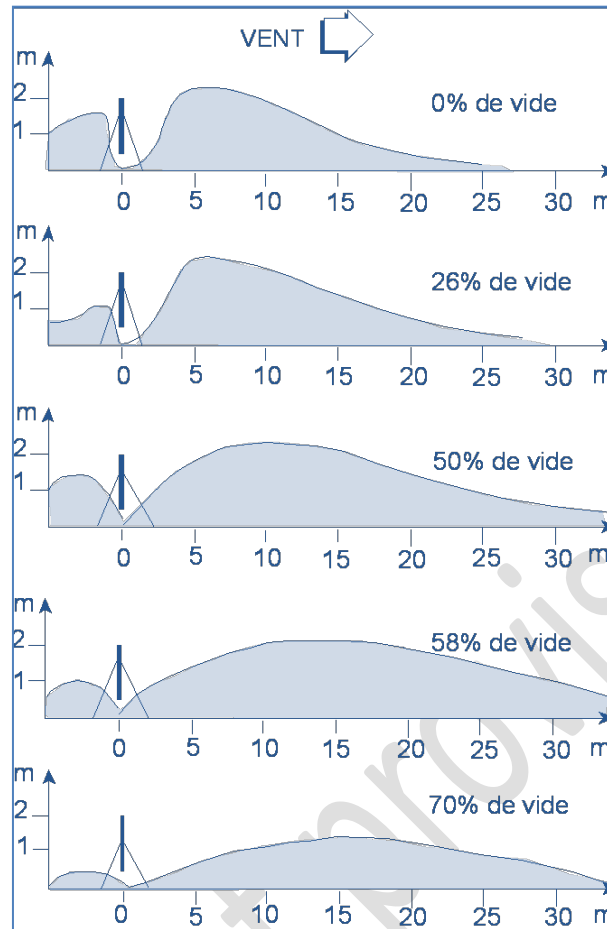
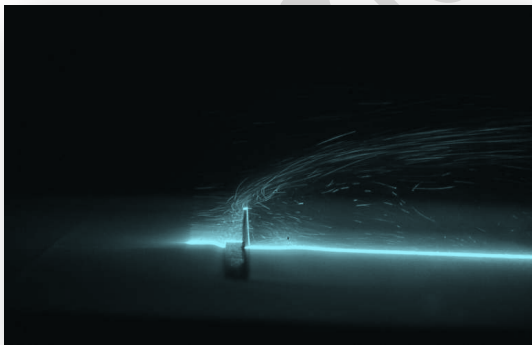
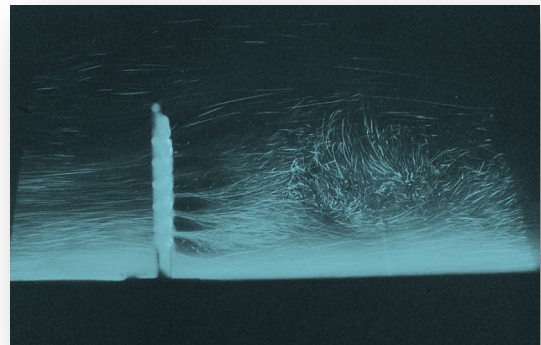


Figure 31. Forme de la congère en fonction de la porosité



Cliché 35. Visualisation par tranche laser de l'écoulement au droit d'une barrière à neige pleine sans garde au sol



Cliché 36. Visualisation par tranche laser de l'écoulement au droit d'une barrière à neige poreuse avec garde au sol



Cliché 37. Formation de givre obstruant les interstices d'une barrière à neige à Pierre/Haute (Bruno Janet/Irstea)

6.1.2.2 LA GARDE AU SOL

La **garde au sol** est l'espace laissé libre entre le bas du panneau constituant la barrière et le niveau du sol. Son rôle est double :

- accélérer le vent sous la barrière pour obtenir des congères plus longues et moins épaisses (ce qui rejoint l'effet produit par la porosité),
- limiter le tassement de la neige sur la barrière (Cliché 38 et Figure 32).

La hauteur optimale de la garde au sol est la hauteur moyenne d'une chute de neige sans vent ; en effet, il ne faut pas que la garde au sol soit enfouie sous la neige sans quoi son effet serait annulé. Ce principe de construction a surtout pour but de protéger l'ouvrage contre sa propre destruction par la congère qu'il aura formée. Sans cette garde au sol, la neige déposée va finir par submerger l'ouvrage (Cliché 32) et, sous l'effet du tassement, il peut être endommagé, voire détruit. Ce phénomène est encore accru si la barrière est implantée dans une pente puisque la reptation (Cliché 3) va s'ajouter au tassement.

Une **garde au sol de l'ordre de 20 cm en moyenne montagne à 40 ou 50 cm maximum** est adoptée sous nos latitudes car au-delà, la perte d'efficacité de l'écran diminue



Cliché 38. Congère générée par une barrière poreuse avec garde au sol (J.M. Taillandier/Irstea)

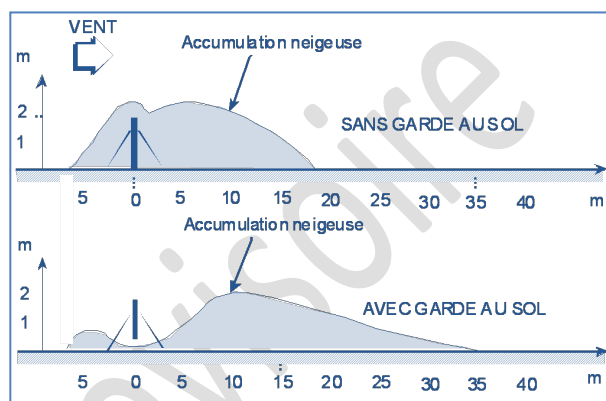


Figure 32. Forme de la congère en fonction de la garde au sol

6.1.3 CARACTERISTIQUES DES DEPOTS GENERES

6.1.3.1 LONGUEUR DU DEPOT, LONGUEUR DE LA BARRIERE

Une barrière à neige doit posséder une longueur (distance séparant les deux extrémités de l'ouvrage) suffisante, généralement supérieure à 20 fois la hauteur de la barrière.

Cette disposition a pour but de limiter l'influence du rabattement de l'air de chaque côté de la barrière (effets de bord) qui donne à la congère sa forme semi-elliptique. Lorsque la longueur de la barrière est supérieure à 20 H, l'ellipse est "aplatie" (Figure 33) et la quantité de neige accumulée rapportée au linéaire de barrière est plus importante que dans le cas d'un faible linéaire de barrière (inférieur à 20 H) (Figure 34). H est la hauteur de la barrière.

Pour une barrière poreuse (40 à 60%) munie d'une garde au sol, implantée en terrain plat perpendiculairement à la direction du vent dominant, la longueur de la congère à saturation est de 25 H et le volume de neige accumulé à saturation est de $20 H^2$ par mètre linéaire de barrière. Ainsi par mètre linéaire, une barrière de 2 m de haut permet de créer une congère de 50 m de long et stocker un volume de neige de 80 m^3 . Attention, ces résultats ne sont valables que pour des terrains plats et des vents moyens. Lorsque que les vents sont violents, la longueur et la hauteur de la congère à saturation sont plus faibles, et la congère sera plus éloignée de la garde au sol. Une distance de 15 à 20 H est suffisante.

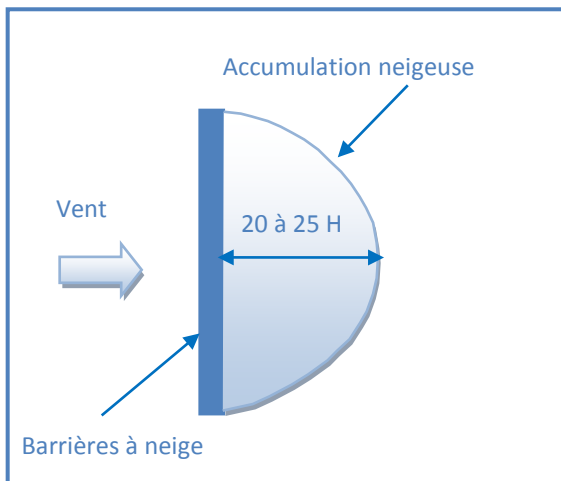


Figure 33. Forme de la congère (vue de dessus) générée par une barrière de longueur inférieure à 20 H

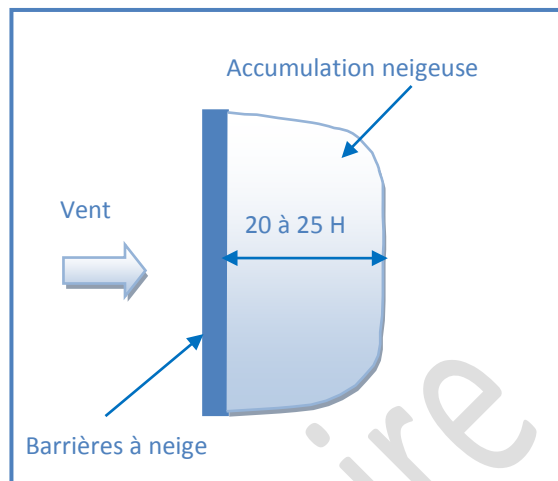


Figure 34. Forme de la congère (vue de dessus) générée par une barrière de longueur supérieure à 20 H

6.1.3.2 EFFET DE LA PENTE SUR LE DEPOT DE NEIGE

Les expériences en terrain pentu sont rares et aucune prescription précise n'a été établie. Une pente montante (dans le sens du vent) est défavorable (Cliché 39 et Figure 35) alors qu'une pente descendante est favorable (Naaim-Bouvet et al., 2002) :



Cliché 39. Modélisation physique du comportement d'une barrière à neige pleine avec garde au sol et de hauteur H sur terrain pentu avec de la neige de canon dans la soufflerie du CSTB

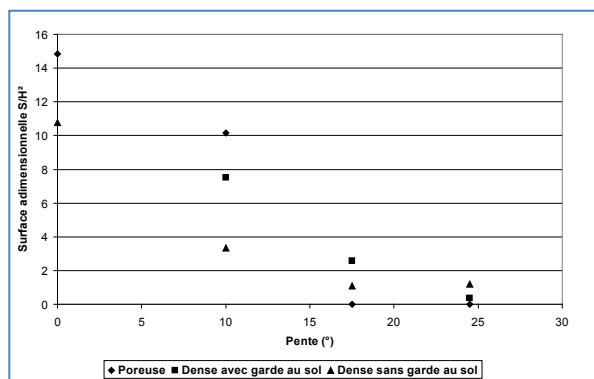


Figure 35. Visualisation de la perte d'efficacité des barrières à neige de 9 cm de hauteur sur terrain en pente montante obtenue après 10 minutes d'expérimentation

Pour obtenir un maximum d'efficacité, une barrière à neige de hauteur H doit avoir :

- Une porosité de 40 à 60%,
- Des mailles de l'ordre de 10 à 20 cm,
- Une garde au sol d'une hauteur égale à la chute moyenne de neige sans vent (de l'ordre de 20 cm en moyenne montagne à 40 ou 50 cm maximum),
- Une longueur supérieure à 20 fois sa hauteur.

Dans ces conditions, et pour une barrière à neige implantée en terrain plat et perpendiculairement à la direction du vent dominant :

- la longueur de la congère à saturation L_s est de $25 H$,
- le volume de neige accumulé à saturation V_s est de $20 H^2$ par mètre linéaire de barrière.

Par ailleurs, la base de l'ouvrage doit impérativement suivre la ligne de pente afin que la garde au sol puisse jouer son rôle.

6.1.4 ORIENTATION D'UNE BARRIÈRE A NEIGE PAR RAPPORT A LA DIRECTION DU VENT DOMINANT

La barrière à neige doit être placée perpendiculairement à la direction du vent responsable du transport. En effet :

- lorsque l'angle d'attaque du vent est perpendiculaire à l'axe de la barrière, la congère s'inscrit dans une demi ellipse (Figure 34),
- lorsque cet angle s'écarte de la perpendiculaire, la congère s'inscrit progressivement dans un triangle pour quasiment disparaître lorsque θ , l'angle entre la direction du vent et la perpendiculaire à la barrière est de l'ordre de 45° (Figure 36).

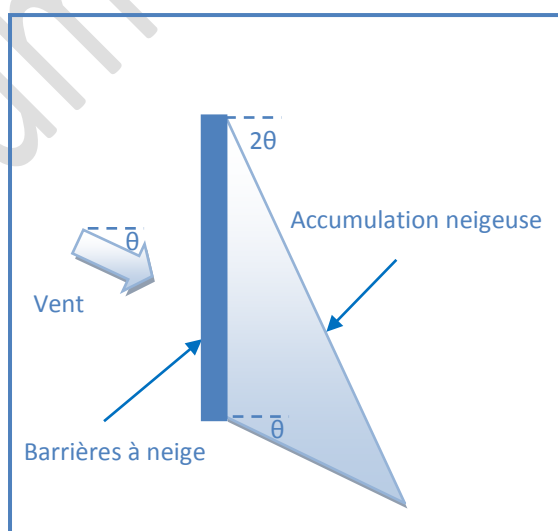


Figure 36. Influence de l'incidence du vent sur la forme de la congère

D'un point de vue pratique, il peut être retenu que :

- plus un écran est poreux, moins il est sensible à l'incidence du vent, tant que l'on n'atteint pas la valeur de 45° ,
- pour des longueurs de barrières jusqu'à 10 mètres, l'influence de l'incidence réduit très rapidement l'efficacité de la barrière,
- sous forte incidence, à partir de 45° , quel que soit le soin apporté à la géométrie de l'écran, on estime qu'il n'a plus de fonction de protection.

Tant que α , l'angle entre la direction du vent et la perpendiculaire à la zone à protéger, reste inférieur à 20° , la barrière sera implantée parallèlement à la zone à protéger (Figure 37). Pour des valeurs supérieures à 20° , les barrières devront être disposées en arrête de poisson (Figure 38) de telle sorte qu'elles restent perpendiculaires à la direction du vent dominant avec une zone de recouvrement suffisamment importante entre elles. Ceci conduit à des ratios « longueur de barrières sur longueur de zone à protéger » importants et cette solution est rarement adoptée par les gestionnaires, soit par méconnaissance, soit par les contraintes supplémentaires qu'elle induit. C'est pourtant la seule qui soit efficace. Il apparaît donc nécessaire de bien étudier la direction des vents dominants avant d'implanter une barrière à neige.

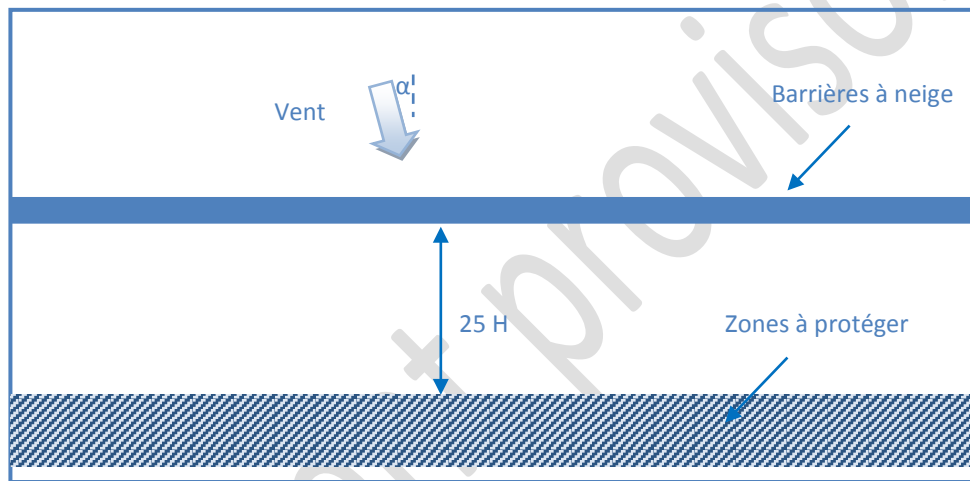


Figure 37. Implantation d'une barrière à neige pour un angle $\alpha < 20^\circ$

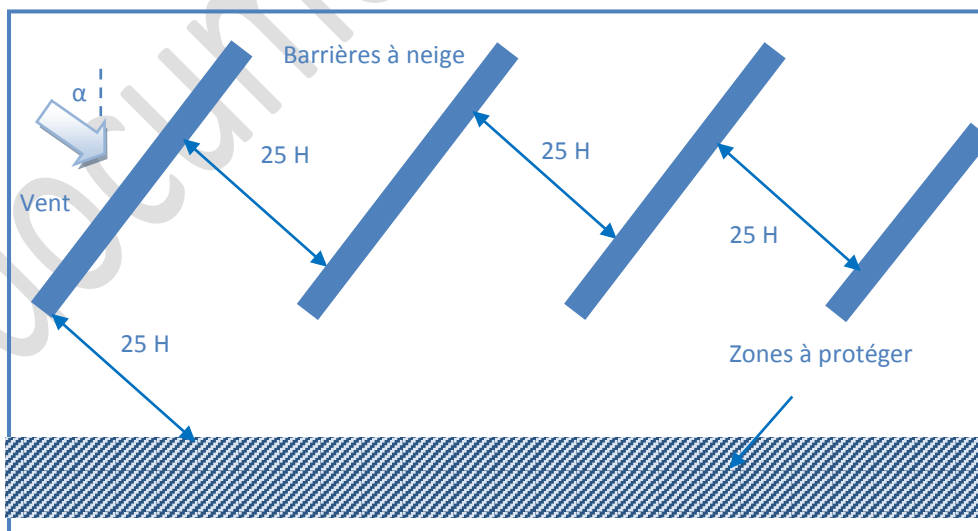


Figure 38. Implantation d'une barrière à neige pour un angle $\alpha > 20^\circ$

Par ailleurs, la barrière à neige doit être placée suffisamment loin de la zone à protéger, afin que la congère n'aille pas mourir sur la zone à protéger augmentant ainsi les difficultés. La distance minimale préconisée est de $25 H$. Cette distance minimale correspond à la longueur maximale de la congère générée par la barrière. Elle

doit donc être augmentée si la barrière est mise sur une pente descendante et diminuée dans le cas d'une pente montante. Si les vents sont violents, elle doit également être diminuée (15 à 20H).

6.1.5 POSITIONNEMENT D'UNE BARRIÈRE A NEIGE PAR RAPPORT AUX ZONES DE DEPART D'AVALANCHE

Les barrières à neige sont utilisées au vent des zones de départ d'avalanches avec deux configurations type :

- Le vent charge le couloir par le haut, les barrières sont installées perpendiculairement à la pente (Cliché 40),
- Le vent charge le couloir latéralement, les barrières sont installées parallèlement à la pente (Cliché 41).

En limitant l'accumulation de neige dans la zone sous le vent, les barrières diminuent le risque d'avalanche. Elles peuvent également contribuer à limiter l'enfouissement des ouvrages paravalanches installés dans la zone de départ (Cliché 41 et Figure 40).



Cliché 40. Barrières à neige installées perpendiculairement à la pente (J-M Taillandier/Irstea)



Cliché 41. Barrières à neige installées parallèlement à la pente (A. Prokop/BOKU)

Pour qu'une barrière à neige soit efficace, elle doit être positionnée plutôt dans une zone d'érosion. Les barrières à neige ne doivent pas être placées dans des zones d'accumulation naturelle de la neige (combe, petite dépression, sillage sous le vent d'un relief ou obstacle) ; dans le cas contraire, elles seront rapidement recouvertes et inefficaces (Cliché 42). Le positionnement idéal est donc à la limite entre zone d'érosion et zone d'accumulation.

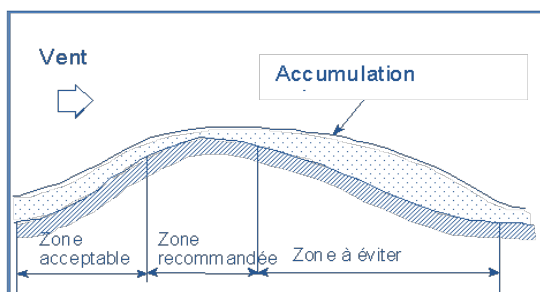


Figure 39. Recommandations pour l'implantation d'une barrière à neige.



Cliché 42. Barrières auto-orientables enfouies sous la neige (J-M. Taillandier/Irstea)

Une barrière à neige doit être placée suffisamment loin de la zone de départ d'avalanche, afin que la congère n'aille pas mourir sur sa marge. Mais il ne doit pas exister de zone de reprise entre le dépôt en arrière de la barrière et la zone de départ d'avalanche. **La distance minimale préconisée est de 25 H** (Figure 40).

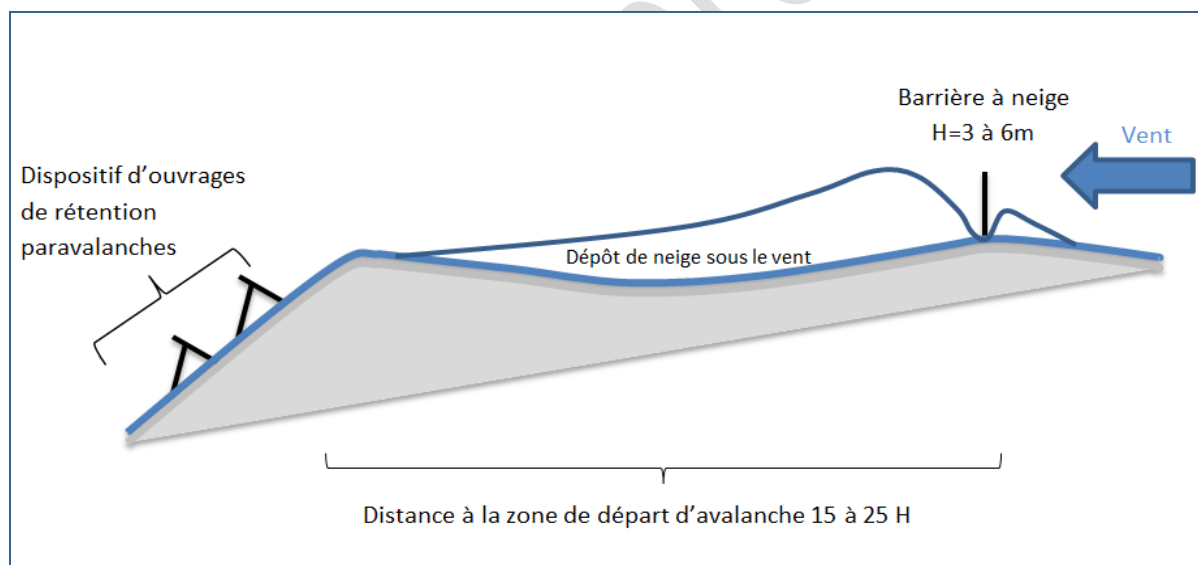


Figure 40. Recommandations pour l'implantation d'une barrière à neige par rapport à une zone de départ d'avalanche d'après S. Margreth et A. Burkard (2010).

On rappelle (paragraphe précédent) que cette distance minimale correspond à la longueur maximale de la congère générée par la barrière. Elle doit donc être augmentée si la barrière est mise sur une pente descendante et diminuée dans le cas d'une pente montante. Si les vents sont violents, elle doit également être diminuée (15 à 20 H). En cas de non possibilité de déplacement du fait du manque de place, l'optimisation se fera en jouant sur la porosité du tablier ou la hauteur de la barrière.

L'avantage des barrières à neige est leur efficacité immédiate du point de vue de la formation des dépôts. Mais utiliser des barrières à neige dans de bonnes conditions n'est pas toujours possible : les vents responsables du

transport peuvent avoir des directions variables (cas de topographies accidentées) et les barrières fixes auront alors une efficacité réduite.

6.1.6 AUTRES CAS D'IMPLANTATION

Les barrières à neige sont très largement utilisées dans le cadre de la viabilité hivernale, où l'on cherche plus particulièrement à empêcher la formation de congères sur les voies de communication. C'est d'ailleurs pour cette application qu'elles ont été initialement développées (voir 6.1.1). Leur utilisation sur les domaines skiables afin de gérer la neige sur les pistes est également possible, soit pour maintenir par exemple la neige au niveau des crêtes (Cliché 43), soit pour créer un stock de neige qui sera retravaillé ultérieurement (Cliché 44).



Cliché 43. Barrières à neige implantées sur une piste de ski (Irstea)



Cliché 44. Barrières à neige « de fortune » implantée pour créer un stock de neige à retravailler (G. Brugnot/Irstea).

6.1.7 LES DIFFERENTS TYPES DE BARRIERES A NEIGE

En France, différents types de barrières à neige sont disponibles. Les spécifications de conception de ces équipements doivent répondre à la norme NF-P95-305 (Figure 41). Elles portent sur l'implantation, les efforts à reprendre, le dimensionnement.

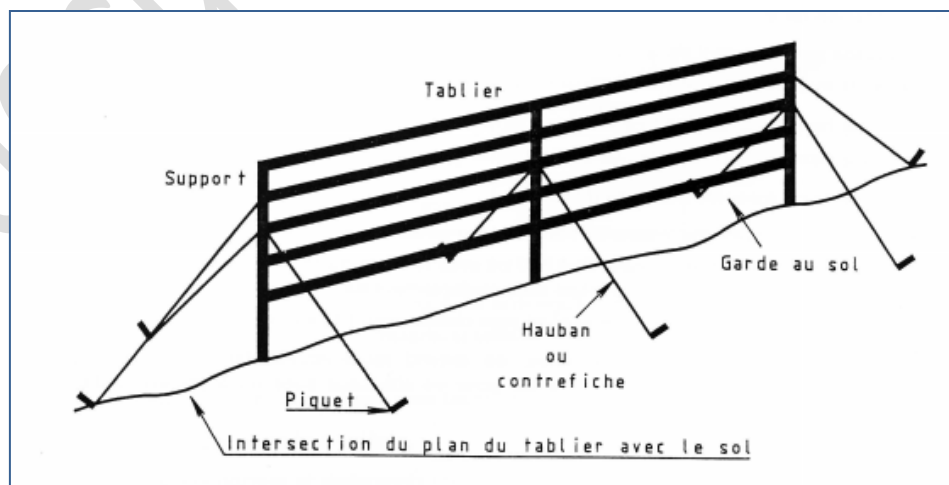


Figure 41. Eléments d'une barrière à neige ; d'après NF P 95 305.

Parmi celles utilisées comme ouvrages à vent paravalanches, on distingue :

6.1.7.1 LES BARRIÈRES BOIS A LATTES HORIZONTALES (BARRIÈRES TYPE CEMAGREF, BARRIÈRES GAILLARD- RONDINO,...)



Cliché 45. Barrière à neige bois "Rondino" avec tablier à lattes parallèles au sol et contrefiches sous le vent.



Cliché 46. Barrière à neige bois avec tablier à lattes horizontales en escalier et haubanage par câbles d'acier.

La disposition des lattes du tablier ajouré est le plus souvent parallèle au sol (Cliché 45). Une disposition en escalier (Cliché 46) qui constitue plutôt une facilité de montage existe aussi. Mais son efficacité est moindre car elle génère un sillage dû au contact du bas du tablier avec le sol côté amont de la pente et à une garde au sol surélevée côté aval.

Le bois possède de bonnes caractéristiques mécaniques par rapport aux efforts générés par le vent. Il possède de plus un aspect esthétique qui permet de satisfaire à la fois les impératifs techniques et environnementaux qui peuvent devenir déterminants dans la conduite de certains projets en sites sensibles. Autre avantage non négligeable, outre son recyclage, le bois possède une bonne tenue dans le temps, cependant ces ouvrages possèdent une durabilité (pour les barrières à neige permanentes) de 25 ans au sens de la norme X 50-500).



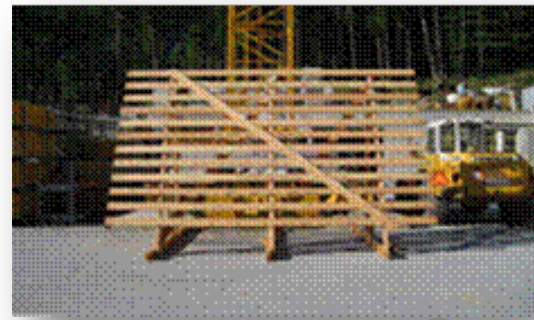
Cliché 47. Barrière à neige du Combal- Pichalp à Larche 04 (JM Taillandier/Irstea).



Cliché 48. Barrière à neige en escalier type Labouly du Grand Lognan, Mâcot La Plagne 73 (ONF DT RTM).



Cliché 49. Barrière à neige bois avec contreventements (F. Naaim/Irstea)



Cliché 50. Barrière à neige à tablier incliné et patins de type Wyoming (A. Burkard).

Une attention particulière doit être portée à la sensibilité au feu de la zone d'implantation des ouvrages ce qui nécessite de connaître les pratiques locales d'écobuage des estives et de se reporter aux dossiers et cartographies de feux de forêt disponibles. Concernant la sensibilité du bois au pourrissement, bien que ce dernier ne soit pas très actif en altitude dans les zones d'emploi, si l'essence est convenablement choisie, il est inutile de prévoir un traitement spécifique.

6.1.7.2 BARRIÈRES A NEIGE MIXTES BOIS-MÉTAL ET ENTIÈREMENT MÉTALLIQUES

Leur conception a été envisagée pour les secteurs particulièrement ventés comme les zones de crête, les cols élevés. Pour les barrières mixtes bois-métal, les supports verticaux métalliques sont de type IPN ou HEB qui, à section égale supportent des efforts dus au vent plus importants (Cliché 51). Les lattes du tablier espacées par cales en bois, sous réserve de bien choisir l'espacement entre poteaux, sont en bois. Pour les barrières entièrement métalliques, tous les éléments, supports, contreventements et tablier (Cliché 52) sont métalliques.



Cliché 51. Barrières à neige mixte, métal pour les supports et bois pour les lattes du tablier et les cales Col du Brenner, Italie (JM Taillandier/Irstea).



Cliché 52. Barrière à neige métallique à contrefiches sous le vent, haubanage de tête et raidissement des modules d'extrémité par câbles d'acier Col du Brenner, Italie (JM Taillandier/Irstea).

En France, on trouve également de très anciennes barrières à neige en béton armé destinées à protéger les voies de chemin de fer contre la formation de congères (Cliché 53).



Cliché 53. Barrières à neige béton armée à lattes horizontales (F. Naaim/Irstea)

6.1.7.3 BARRIERES AUTO-ORIENTABLES ENTIEREMENT METALLIQUES ET MIXTES, ACIER-BOIS

Elles ont été conçues pour tenter de remédier au délicat problème de l'incidence du vent et de l'orientation changeante de la direction du vent par rapport à la barrière. Chaque élément, limité à 2 mètres de largeur de par la géométrie du système, est articulé sur un axe vertical afin de pouvoir se positionner automatiquement perpendiculairement au vent sous la seule action de ce dernier (cliché 49). La garde au sol est réglable, théoriquement en permanence, mais elle ne l'est dans les faits que seulement à la mise en place.



Cliché 54. Barrière auto orientable entièrement métallique (Cémagref).



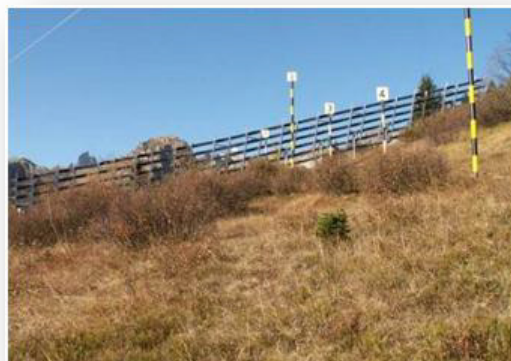
Cliché 55. Essais comparatifs entre barrière fixe et barrières orientables réalisés en soufflerie, avec de la sciure 0,1 mm.

Dans une rangée de barrières auto-orientables, la discontinuité entre les éléments du dispositif crée un vide tous les deux mètres.

A Celliers (73) les barrières auto-orientables mises en place initialement dans un secteur soumis à des vents changeants en direction ont dû être transformées en une barrière à tablier d'un seul tenant (cliché 51 et 52) pour cause de dysfonctionnement.



Cliché 56. Rangée de barrières auto-orientables et perches de suivi du transport de neige par le vent, Celliers, 73 (JM Taillandier)



Cliché 57. La même rangée de barrières, transformée en barrière à neige fixe par mise en place de lattes parallèles au sol, Celliers, 73. (ONF DT RTM)

D'autres sites ont connu les mêmes dysfonctionnements, l'installation de ce type d'ouvrage n'est donc pas recommandée.

6.1.7.4 LES BARRIERES SYNTHETIQUES A MAILLES

A la fin des années 1980, les industriels du textile et des plastiques ont proposé leurs produits dans le domaine des brise-vent (Cliché 58, Cliché 59 et Cliché 60). Des essais effectués au Col du Vent à Monétier-les-Bains (73), à 2 700 mètres d'altitude, ont montré que ces ouvrages non rigides résistent très mal à la fatigue provoquée par des sollicitations répétées du vent. Par ailleurs sensibles au froid et au rayonnement ultra-violet, elles sont à réserver à des usages routiers dans des zones où le vent dépasse rarement 100 km/h.



Cliché 58. Barrière synthétique "Trottet".



Cliché 59. Barrière synthétique "Nortène".



Cliché 60. Dolomites, Italie, Passo Sella à gauche & à droite Valdrôme, 26 (JM Taillandier).

6.1.7.5 BARRIERES RABATTABLES

Leur conception devait répondre à un problème spécifique dans le Massif Central. Une importante rangée de barrières à neige devait être implantée sur une longue arête du Puy de Sancy, visible de très loin et de presque toutes les directions. Des barrières articulées à leur base, afin de pouvoir être couchées au sol sans être démontées l'été venu, ont été installées. Mais du fait des manipulations saisonnières nécessaires, des ouvrages légers ont été choisis. La contrepartie est leur fragilité.

Ces barrières à neiges ne sont donc pas recommandées pour usage dans un dispositif permanent paravalanche.

6.1.8 ENTRETIEN ET COÛT

En préalable à leur entretien, les ouvrages à vent doivent bénéficier de visites techniques de contrôle périodique à minima en fin de saison hivernale. Ces visites doivent permettre de déclencher et de quantifier les interventions d'entretien nécessaires. Les différents éléments constitutifs de l'ouvrage doivent être vérifiés sans omettre de porter attention à la liaison ouvrages- sol ou ouvrage-massif de fondation.

Les dommages signalés ou observés sur les barrières en bois, ouvrages à vent à vocation paravalanches principalement utilisés en France, sont essentiellement :

- des bris de lattes pour celles à tablier muni de planches d'épaisseur 20 - 25 mm,
- des desserrages de la visserie, conséquence de vibrations sous l'effet du vent pour celles faisant appel à ce type de liaison entre éléments notamment celles lattes-poteaux,
- des ruptures ou arrachage de clous pour celles faisant appel à ce mode d'assemblage notamment pour le contreventement par étais bois,
- des ruptures de haubans pour celles dotées d'un contreventement des poteaux par câble d'acier et d'extrémités de la barrière ; elles sont souvent le résultat d'une non reprise de tension après une saison hivernale.

Cette dernière avarie peut être la cause, si elle est non traitée rapidement, de la désarticulation de la barrière et de sa ruine surtout lorsque la rupture porte sur le hauban d'extrémité de barrière et si l'ouvrage est implanté obliquement à la pente ou en pleine pente.

A signaler également, pour des barrières à neige métalliques, le flambage de jambe de contreventement métallique soumis à la poussée de la neige par reptation du manteau neigeux.

Concernant les coûts de barrière bois uniquement, avec fourniture et montage d'un ouvrage de hauteur $H=3\text{m}$, le prix moyen posé est actuellement entre 180 € et 210 € HT/ml. Le volume de neige accumulé à saturation V_s est de $20 H^2$ par mètre linéaire de barrière.

6.2 LES PANNEAUX VIRE-VENT

6.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET HISTORIQUE

L'ingénieur forestier Autrichien Handl avait remarqué que les vieux arolles et les vieux pins isolés en montagne, avec leurs branches s'étalant vers le haut, dégageaient un assez vaste entonnoir libre de neige entre les basses branches et leur pied et provoquait un dépôt allongé sous le vent de l'arbre. A contrario, les épicéas branchus jusqu'à leur base ne produisaient pas ce mécanisme. Les vire-vent étaient nés, avec des dimensions originelles proches de celles d'un arolle, 3-4 mètres de haut, large de 2 mètres à la base et de 3 mètres au sommet. Les premiers ouvrages étaient constitués d'un panneau trapézoïdal plan non ajouré porté par deux poteaux supports.

L'action de ces ouvrages sur la neige est de deux types (Figure 42) :

- la création d'une dépression, dénommée aussi cratère (Cliché 61), déneigée en pied d'ouvrage, qui conduit à créer une discontinuité dans le manteau neigeux en même temps qu'une consolidation de la neige de surface dans cet entonnoir,
- la formation d'un dépôt de neige de forme très allongée, en forme de cigare (Cliché 62), permettant dans certaines circonstances de cumuler la fonction rupture du manteau et dépôt de neige ; à l'expérience cela est surtout valable pour les vire-vent en croix (Cliché 62), moins sensibles aux changements de direction du vent.

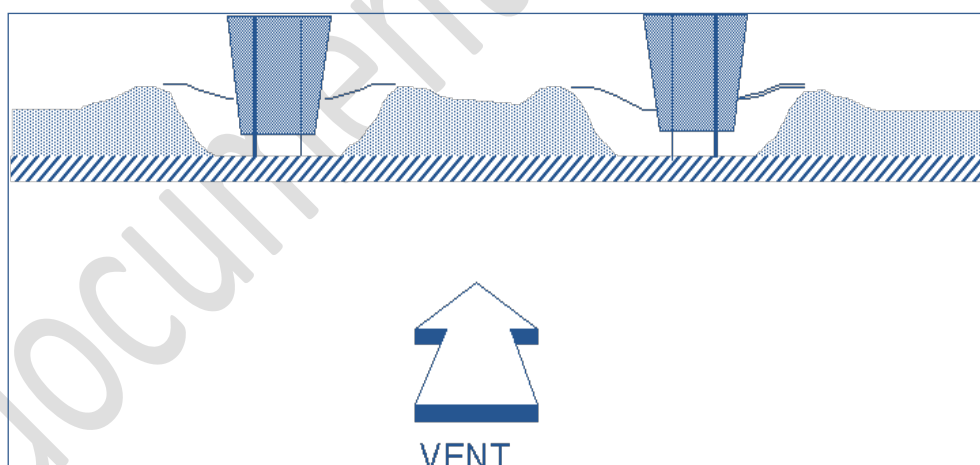


Figure 42. Principe de fonctionnement du vire-vent

6.2.2 LES DIFFERENTS TYPES DE VIRE-VENT

On distingue en effet deux types de vire-vent, les panneaux vire-vent à un panneau (Cliché 61 et Cliché 63) et les panneaux vire-vent en croix (Cliché 62). Les panneaux vire-vent à un panneau, le plus souvent trapézoïdal, peuvent être portés par un ou deux poteaux. Pour être efficaces, ils doivent être placés perpendiculairement à la direction du vent. L'avantage du panneau vire-vent en croix est qu'il est peu sensible à la direction. Il existe aussi des vire-vent auto orientables, de construction identique aux barrières de même nom, mais avec seulement le platelage trapézoïdal qui diffère. Le problème de l'homme de terrain reste le positionnement

judicieux de ces ouvrages, qui reste subordonné à une parfaite connaissance des vents au sol dans la zone à traiter.



Cliché 61. Panneaux vire-vent à 1 panneau et deux poteaux avec sur la droite les dépôts de neige en forme de cigare (J-M Taillandier/Irstea)



Cliché 62. Panneaux vire-vent en croix laissant apparaître la forme très visible du cratère (Gian Cla Feuerstein, AfW Zuoz, Switzerland)



Cliché 63. FD RTM du Capet, pose d'un panneau vire-vent à tablier tenu et porté par un poteau unique (ONF RTM 64-65).

6.2.3 POROSITE, GARDE AU SOL ET ESPACEMENT

Un des vire-vent les plus utilisés en Suisse (ou du moins dans le Valais) est le vire vent en croix d'une hauteur de 3 m, d'une largeur à sa base de 1.5 m et d'une largeur en son sommet de 3 m. Sa porosité est de 23% et il est généralement installé avec une garde au sol de 50 cm. Il peut dans cette configuration générer un cratère de 8 m de large et 30 m de long. Mais les vire-vent avec une plus faible porosité (10%) et une garde au sol plus petite (20 cm) fonctionnent également très bien. La zone dépourvue de neige est plus petite mais plus marquée. L'avantage du panneau vire-vent en croix est qu'il est peu sensible à la direction du vent. Si le vire-vent est constitué d'un seul panneau, il doit être positionné perpendiculairement à la zone à protéger. Dans le cas contraire son efficacité est nulle.

En ce qui concerne la porosité et la garde au sol, il n'existe pas vraiment d'études comparatives. Cependant comme pour les barrières à neige, une augmentation de ces deux critères jusqu'à une certaine limite augmente la zone d'influence du vire-vent. On trouve néanmoins une étude réalisée en Inde par Chaudary et Mathur (2004) à ce propos (Cliché 64).

Les auteurs considèrent que les vire-vent avec garde au sol (Figure 43) sont adaptés à la lutte contre la formation des corniches alors que les ouvrages sans garde au sol (Figure 44) sont recommandés pour la prévention d'avalanches de plaques (stabilisation du versant) – voir 6.2.4



Cliché 64. Vire-vent (1 panneau, hauteur : 4 m, largeur supérieure : 4,5 m, largeur inférieure : 3 m, porosité : 0%) utilisé dans les études de Chaudary et Mathur (2004)

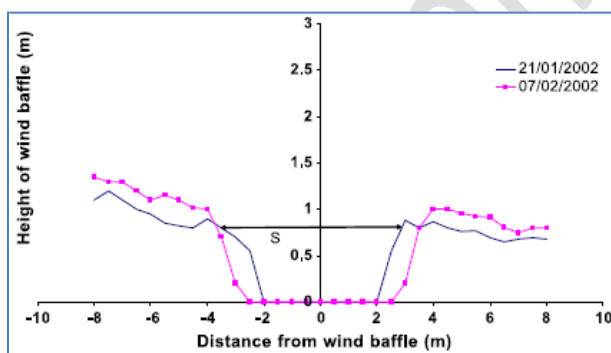


Figure 43. Evolution de l'accumulation neigeuse au niveau d'un vire-vent dense avec garde au sol (Chaudary et Mathur (2004))

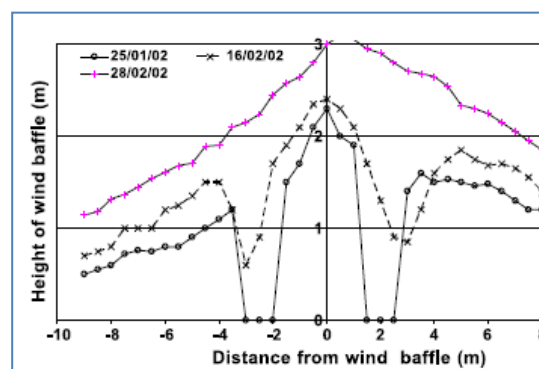


Figure 44. Evolution de l'accumulation neigeuse au niveau d'un vire-vent dense sans garde au sol (Chaudary et Mathur (2004))

On trouve très peu de recommandations concernant l'espacement optimal entre les vire-vent. (Chaudary et Mathur (2004)) propose un espacement de 1 à 2 L, L étant la largeur du panneau dans sa partie supérieure.

6.2.4 POSITIONNEMENT DES VIRE-VENT DANS UNE ZONE DE DEPART D'AVALANCHE

Les vire-vent sont utilisés dans 3 configurations particulières :

- la stabilisation de versant. On « cloue » en quelque sorte le manteau neigeux par la création de cratères à la base du manteau neigeux. Il s'agit ici de limiter la formation de grandes avalanches de plaques (Cliché 65). Dans ce cas les vire-vent sont situés sous le vent de l'arrêt (à 20 m dans le cas de Grimselboden et à 60 m dans le cas de Illhorn). C'est une utilisation qui reste cependant peu courante et qui n'est pas utilisée seule. Dans le cas de Grimselboden par exemple, une digue a été construite dans la zone d'arrêt de l'avalanche.
- dans le même esprit, ce type de dispositif peut être utilisé pour séparer 2 couloirs contigus, séparés par de petites crêtes transversales. Les vire-vent sont alors positionnés sur ces crêtes. C'est le cas du Col de Larche en France (Cliché 66). On crée une ligne de moindre résistance dans le manteau neigeux. Le déclenchement dans un couloir, s'il se propage jusqu'à l'arête, suivra cette ligne de faiblesse sans entraîner le couloir voisin.
- mais les vire-vent sont plus généralement utilisés pour éviter la formation de corniches et pour limiter les accumulations de neige sur les structures paravalanches actives. Dans ce cas, les vire-vent sont positionnés au niveau de la rupture de pente (Cliché 67).



Cliché 65. Fonctionnement des vire-vent en stabilisation de versant (Grimselboden) (F. Sivardière et T. Castelle (1992))



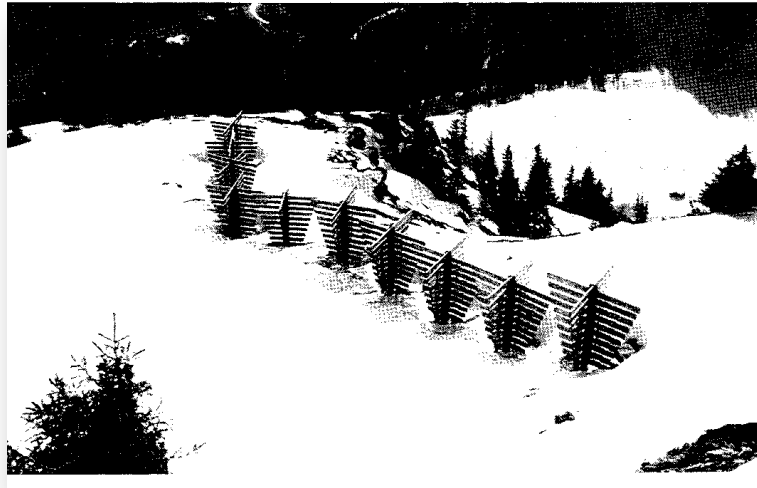
Cliché 66. Larche 04 : Vire-vent implantés en marge d'un panneau déclencheur d'avalanche (ONF RTM 04)



Cliché 67. Suppression de corniches par implantation de vire-vent (Bernina pass) - Gian Cla Feuerstein

L'objectif premier du vire-vent est de dégager de neige une zone donnée. Il est donc nécessaire de positionner le vire-vent au plus près de cette zone. Cependant il est bien évidemment nécessaire de tenir compte de la

topographie locale. Le vire-vent ne doit pas être positionné à un endroit protégé du vent car il pourrait être couvert de neige et perdre ainsi son efficacité. Il est préférable dans ce cas de déplacer le vire-vent et le positionner dans un endroit plus exposé au vent en augmentant ses dimensions pour contrecarrer son éloignement de la zone à protéger. Parfois, les vire-vent sont mal utilisés : ils sont placés côte à côte de façon à accumuler de la neige mais dans cette configuration, ils sont moins efficaces qu'une barrière à neige (Cliché 68)



Cliché 68. Pointe de la Rionde : les vire-vent en croix avaient pour objectif de stocker la neige sur le replat. Une barrière à neige aurait été plus efficace. (F. Sivardière et T. Castelle (1992))

6.2.5 ENTRETIEN ET COÛT

En préalable à leur entretien, les ouvrages à vent doivent bénéficier de visite technique de contrôle périodique à minima en fin de saison hivernale. Ces visites doivent permettre de déclencher et de quantifier les interventions d'entretien nécessaires. Les différents éléments constitutifs de l'ouvrage doivent être vérifiés sans omettre de porter attention à la liaison ouvrages- sol ou ouvrage-massif de fondation.

Les dommages signalés ou observés sur les vire-vent du parc d'ouvrage en France, concernent essentiellement :

- des affaiblissements du bois des poteaux par l'action de l'eau,
- des ruptures de haubans pour ceux dotés d'un contreventement des poteaux par câble d'acier ; elles sont souvent le résultat d'une non reprise de tension après une saison hivernale.

Cette dernière avarie peut être la cause, si elle est non traitée, de la désarticulation ou du basculement du vire-vent et de sa ruine.

Il est à signaler que ces ouvrages ont une forte prise au vent. Aussi pour faciliter les manœuvres de mise en place, il convient de prévoir un portage avec 2 points d'accrochage en partie supérieure de l'ouvrage et de prévoir un cordage pour guider la mise en place de la platine de base du mas sur ses 4 ancrages.

La fourniture d'un vire vent revient à :

- 1110 € HT, l'ouvrage tablier sorti d'usine,
- 1310 € HT, l'ouvrage croix sorti d'usine,

La pose, héliportage compris, avec massifs de fondation béton et ancrages :

- 2330 € HT.

6.3 LES TOITS-BUSES

6.3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET HISTORIQUE

Le principe est de provoquer au passage de la crête une accélération du vent telle que la neige va être soufflée plus loin dans la pente dans une zone où son dépôt sera moins dangereux, la corniche ne pouvant ainsi se former. En général, il est associé aux toits-buses une rangée d'ouvrages de retenue à l'aval, pour fixer la suraccumulation de neige.

L'ouvrage est constitué d'un tablier (le plus souvent en bois) incliné de quelques mètres carrés et supporté par des pieds, poteaux bois ou métalliques, fondés dans le sol (Cliché 69, Cliché 70, Cliché 71 et Cliché 72) Cet ouvrage fonctionne suivant le principe de Venturi (Figure 45): le vent, s'engouffrant dans l'ouverture la plus grande, est accéléré vers l'ouverture la plus petite. Le débit ($Se.Ve$) étant constant, on obtient :

$$Vs = Ve \cdot \frac{Se}{Ss}$$

Equation 17

Avec Ve , vitesse en entrée, Vs vitesse en sortie, Se section d'entrée, Ss section de sortie.

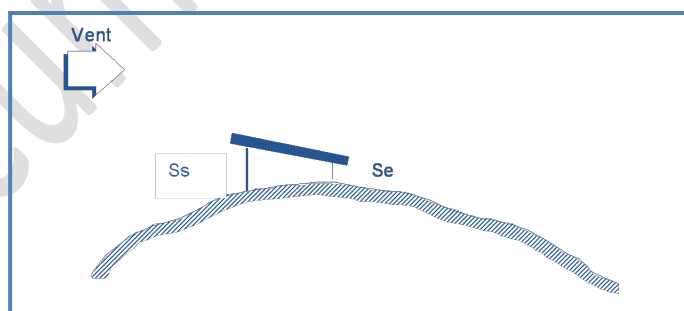


Figure 45. Principe de fonctionnement d'un toit buse



Cliché 69. Toits buses à 7 modules alignés en crête de versant, Le Chazelet - La Grave 05 (JM Taillandier/Irstea).



Cliché 70. Toits buses alignés en marge du couloir du Combal, Larche (04) (JM Taillandier/Irstea).



Cliché 71. Toits buses en crête du couloir du Theil _ FD RTM de Barèges (ONF RTM 64-65).



Cliché 72. Toits buses en crête du couloir du Theil _ FD RTM de Barèges (ONF RTM 64-65).

Lors de l'hiver 1950-51, une crue avalancheuse (1500 avalanches) couta la vie à 98 personnes en Suisse. Cet hiver catastrophique développa l'ingéniosité des ingénieurs en charge de la protection paravalanche et d'après Montagne et al. (1968) c'est André Roch (communication personnelle 1967) qui a été le premier à proposer des toits-buse ayant une fonction paravalanche. Le dispositif était pourtant connu depuis près d'un siècle comme en témoignent les documents extraits du rapport de Mr Morard (hiver 1898-1899). Le toit-buse connu sous le nom de para-neige anglais ne semblait pas avoir donné satisfaction (Figure 46) ! Il est vrai que les toits-buse doivent être orientés et placés avec précaution car ils deviennent complètement inefficaces si le vent souffle dans une autre direction que celle pour laquelle ils ont été installés.

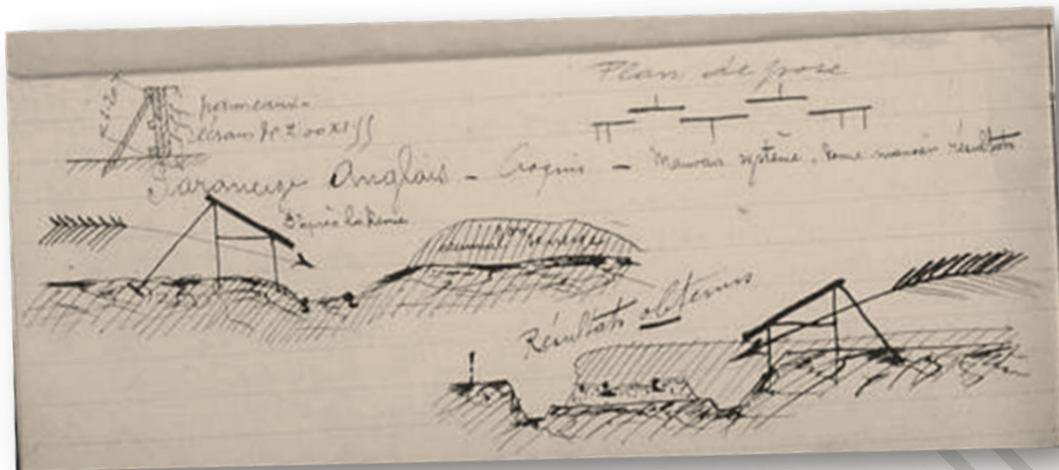


Figure 46. Extrait du rapport de Mr. Morard

6.3.2 POROSITÉ, INCLINAISON, ESPACEMENT ET POSITIONNEMENT PAR RAPPORT À LA CRÈTE

En 1967, 10 toits buses de diverses conceptions, inclinaisons et matériaux furent testés dans le Montana et démontrèrent l'efficacité du dispositif (Figure 47).

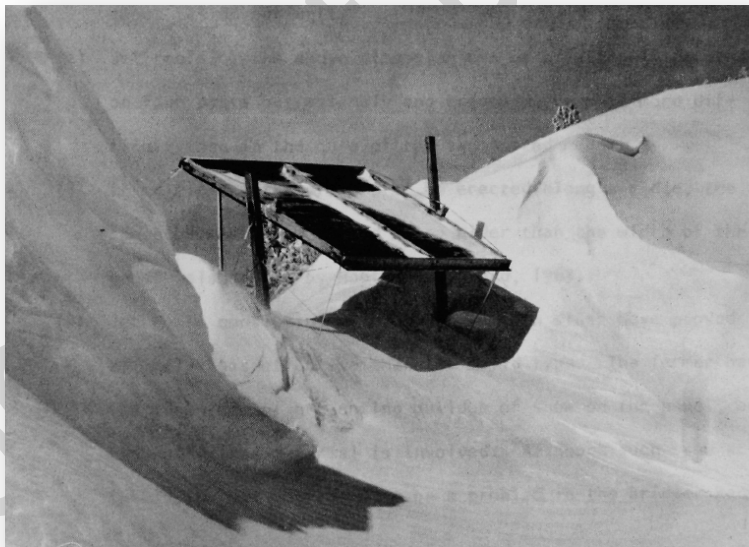


Figure 47. Toit-buse au niveau du Bridger Range (Montana) - Montagne et al. (1968)

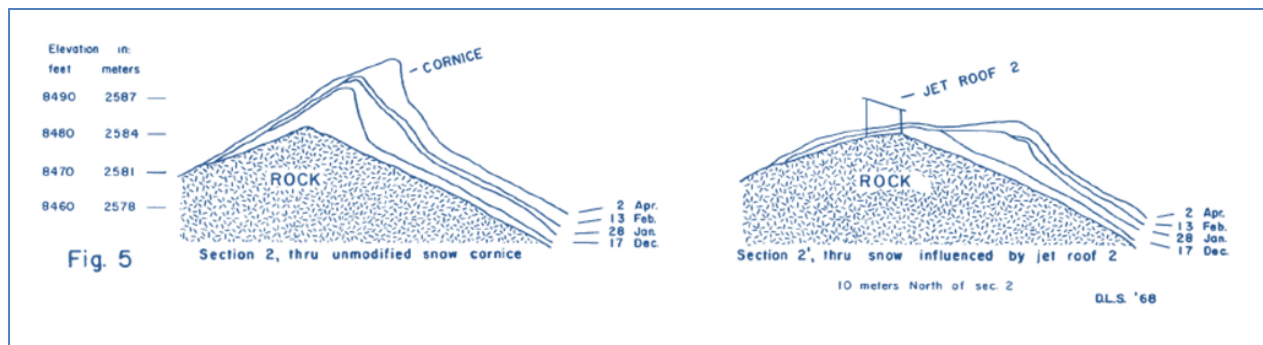


Figure 48. Visualisation de l'effet des toits-buses grâce à des mesures réalisées dans le Montana (Montagne et al., 1968)

Les conclusions de cet hiver de mesures furent les suivantes :

- pour réaliser un toit-buse, il est possible de monter un panneau de 2,4*3 m sur 2 poteaux verticaux et de haubaner les panneaux (le montage et l'assemblage sont plus rapides (2 hommes en 4 heures) et le dispositif moins coûteux (25 dollars pièces en 1968 !)) (NDLR : aucune estimation de la durée de vie du dispositif n'est donnée). Il est possible bien évidemment de monter ces panneaux sur 4 poteaux,
- **les toits-buses poreux sont moins efficaces que les toits-buses sans ouverture,**
- **l'inclinaison la plus efficace est celle qui se rapproche de l'angle de la pente sous le vent,** ce qui est conforme aux conclusions de Hopf et Bernard (1963),
- Si les toits-buses sont érigés le long d'une crête, **l'espace laissé libre entre deux toits-buses ne doit pas être supérieur à la largeur d'un panneau,** recommandation également proposée par Hopf et Bernard (1963),
- les toits-buses doivent être implantés dans des zones où le vent est suffisant, sinon ils peuvent se remplir de neige et être endommagés par cette dernière.

Plus récemment, des indiens (Chaudhary et Mathur, 2004) ont testé en Himalaya différents ouvrages à vent dans le cadre d'un vaste dispositif paravalanche. Pour les toits-buses qui équipent plus de 400 m de crêtes, les panneaux sont ici plus larges : la section d'entrée du fluide est de 4,5m *15 m et celle de sortie de 1,5m*15m. De chaque côté du toit-buse, et sur 4 mètres de long dans l'axe de la crête, il y a absence de corniches. Aussi les concepteurs proposent-ils d'espacer 2 toits-buses consécutifs de 20 à 30 m pour des raisons d'économie, les corniches de faible extension latérale n'entraînant pas, d'après les auteurs, la formation d'avalanches. L'effet du jet, outre la suppression de la corniche, contribue à stabiliser la neige dans la pente et permet d'éloigner la première rangée de filets paravalanches installés en contrebas de la pente (dans ce cas 20 m à la place de 7,5 m en suivant les recommandations suisses). Les auteurs confirment que **l'inclinaison la plus efficace est celle qui se rapproche de l'angle de la pente sous le vent.** Certains toits-buses ont été mis à cheval sur la crête alors que d'autres ont été placés légèrement en contrebas (Cliché 73, Figure 49 et Figure 50). Dans ce dernier cas, la corniche se forme et réduit la section d'entrée du toit-buse, et donc son efficacité. **Il est ainsi préférable de placer le toit buse exactement au niveau de la crête.**



Cliché 73. En premier plan, toit-buse placé à cheval sur l'arrête, en arrière plan toit buse placé légèrement en contrebas (Chaudhary et Mathur, 2004)

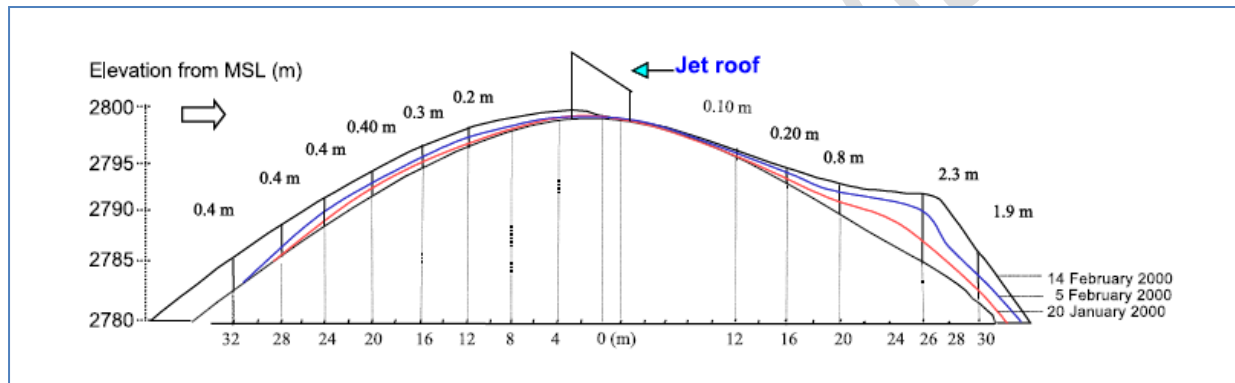


Figure 49. Evolution de la hauteur de neige au niveau du toit-buse placé à cheval sur l'arrête (Chaudhary et Mathur, 2004)

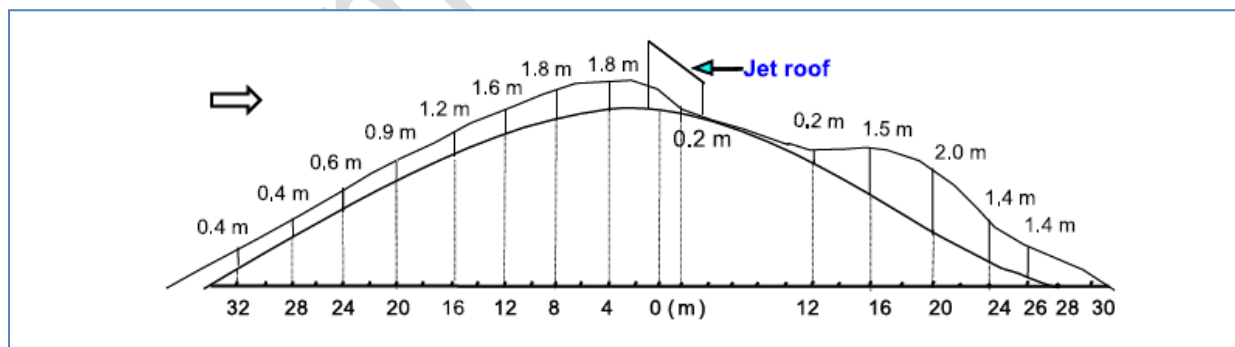
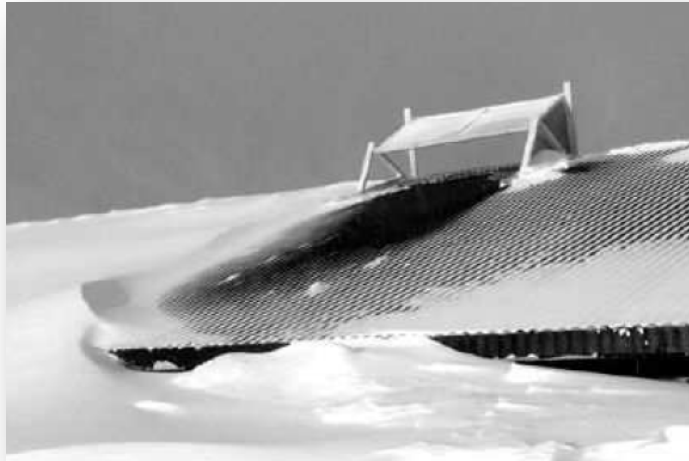


Figure 50. Evolution de la hauteur de neige au niveau du toit-buse placé légèrement en contrebas (Chaudhary et Mathur, 2004)

Le toit-buse est l'ouvrage typique pour supprimer une corniche ; mais son domaine d'application n'est pas uniquement le génie paravalanche et il peut être envisagé pour protéger des routes ou des bâtiments (Cliché 74).

Les toits-buses doivent être **orientés et placés avec précaution** car ils deviennent complètement **inefficaces si le vent souffle dans une autre direction** que celle pour laquelle ils ont été installés.



Cliché 74. Exemple de déflecteur utilisé pour les bâtiments (Thiis, delpech, De Virel, 2004)

La suppression des corniches par des techniques traditionnelles de minage (charges explosives disposées dans des trous creusés à l'intérieur de la corniche) ou par des pelles (Margreth, 2010, Cliché 75) est possible. Mais ces techniques s'avèrent souvent difficiles à mettre en œuvre et exposent le personnel (accès difficile et rupture inopinée de la corniche). Actuellement (Farizi, 2013), un système issu du Daisybell©, et permettant d'augmenter l'onde de surpression, est en cours de test afin de purger les crêtes depuis un hélicoptère.



Cliché 75. Pelle mécanique sur la crête Aibga (Russie) (Margreth, 2010)

6.3.3 ENTRETIEN ET COUT

Ces ouvrages nécessitent dès leur conception de prévoir des ancrages résistant bien à l'arrachement, les efforts résultants dus au vent étant dirigés vers le haut.

Le tablier en planche d'épaisseur 25 mm le plus souvent est la partie la plus sollicitée par fusion de la neige sur sa face externe et par abrasion de sa face interne au passage de la neige.

L'évaluation du coût d'un ouvrage neuf de $2,5 \times 3\text{m}^2$ de surface est de 1000€ HT pour les fournitures et de 1900€ HT pour la pose y compris la réalisation des massifs de fondation en béton (profondeur 1,20m).

6.4 LES PUPITRES

Ce type d'ouvrage vise à supprimer des corniches. Edifié en surplomb d'une crête, il crée une crête artificielle, presque fictive, afin que la neige transportée, ne trouvant aucun appui au sol sous le vent de cette crête, ne puisse se déposer et former une corniche.

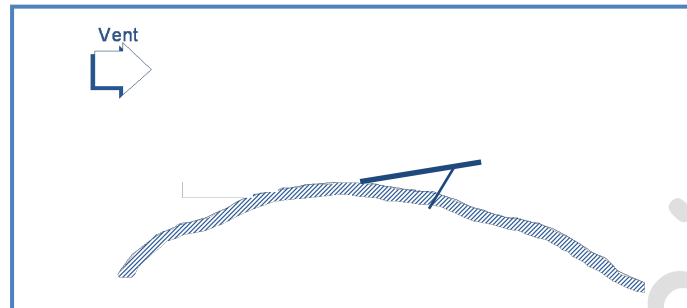


Figure 51. Principe de fonctionnement d'un pupitre

En France on ne recense qu'un seul ouvrage de ce type à Larche (04) et on ne trouve dans la bibliographie internationale aucun article traitant de l'efficacité de ce type d'ouvrage. Sachant par ailleurs que la formation de corniches ne nécessite pas l'existence d'un appui en aval (Paragraphe 4.1.1 et Cliché 19), on peut légitimement douter de l'efficacité d'un tel dispositif. Ces ouvrages ont peu été utilisés jusqu'à nos jours et ne semblent pas trouver une exploitation à l'avenir ne serait-ce que par leur disposition en surplomb de la pente sous le vent.



Cliché 76. Alignement d'ouvrage à vent (pupitres P à droite et toits-buses à gauche) en crête orientale du couloir du Combal _ FD RTM Larche (cliché RTM 04).

Que ce soit pour les barrières, les toits-buses ou les vire-vent, les systèmes d'ancrage sont décrits dans "Protection contre les risques naturels. Ancrages passifs en montagne : conception, réalisation, contrôle. Guide technique". MEDD-DPPR / CEBTP Lyon / Cemagref Grenoble. 2004.

6.5 INVENTAIRES ET CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES A VENT PARAVALANCHES

En 1992, un recensement des ouvrages à vent ponctuels a été réalisé dans le Valais (Sivardière et Castelle, 1992). Le Tableau 3 ci-après donne les différentes caractéristiques des ouvrages implantés dans ce canton

suisse ainsi qu'une appréciation portée sur leur efficacité fonctionnelle basée sur une observation pendant plusieurs hivers et ne résultant pas d'études spécifiques.

Il se dégage de cet inventaire que les 39 barrières auto-orientables en place sont jugées inefficaces ou de faible efficacité.

Lieu	Altitude	Suppression de corniches	Diminution d'accumulation sur	Stabilisation de versant	Année	Nb	Type	Hauteur (m)	Base (m)	Sommet (m)	Garde au sol (m)	Porosité (%)	Espacement entre vire-	Efficacité
Mont Cauille	2300	■	■		1985	2	En croix	3.2	1.5	3	0.3	23	10	oui
Le Lavantier	2400	■	■		1983	2	1 panneau	3.5 à 4	2	3.5	0.5 à 1	31	15	oui
Mont Gond	2500	■			1983	2	1 panneau	3.2 à 3.4	1 à 1.5	2 à 3	0.6 à 1	36	25 à 30	non
Loutse	1930			■	1981	3	Auto-orientable	2	1.3	2	0.4 à 1 m	33	2,4 et 5	non
La Creusaz	2100	■			1981	5	1 panneau	3	2.7	3.5	0	0	8 à 15	oui
La Creusaz	2100	■			1980	5	Auto-orientable	2	1.2	2	0.4 à 1	33	3 à 4	non
Les Lues	2400	■			1972	2		3 à 4	2	3 à 4	0 à 1.1	10		non
Pointe de La Rionde	2050	■			1986-1988	10	En croix	3.1	1.5	3	0.25	25	3 à 5	non

Lieu	Altitude	Supression de corniches	Diminution d'accumulation sur	Stabilisation de versant	Année	Nb	Type	Hauteur (m)	Base (m)	Sommet (m)	Garde au sol (m)	Porosité (%)	Espacement entre vire-	Efficacité
Pointe de La Rionde	2050	■			1970	4	1 panneau	3.1	2	3	0.2 (0 à 0.9)	10	5/ 8 et 10	moyen
Six jeur	1988	■	■		1988	10	En croix	3.4	1.5	3	0.5	23		faible
Mont de l'Arpille	2000		■		1984	10	En croix	3.4	1.5	3	0.5	23	3 à 4	faible
Mont de l'Arpille	2000		■		1981	12	Auto-orientable	3	2	2	1	35	2 à 5	faible
Grimselboden	2000-2200	■	■	■	1984	14	En croix	3.4	1.5	3	0.5 à 0.65	23	10	moyen à bon
Grimselboden	2000-2200	■	■	■	1958	13	1 panneau	2.7 à 3	1.7	2.5	0.2 à 0.4	10	10	moyen à bon
Grimselboden	2000-2200	■	■	■		5	1 panneau	2.8 à 3	1.8	2.4	0.25 à 0.6	7	10	moyen à bon
Obergestler galen	2100	■	■		1986	5	1 panneau	3.1	1.5	3	0.3	35	9 à 10	faible
Obergestler galen	2100	■	■		1986	5	En croix	3.3	1.5	3	0.5	23	9 à 10	faible
Altstafel	2400	■	■		1990	8	En croix	3.4	1.5	3	0.5 à 0.7	23	10 à 15	pas de retour

Lieu	Altitude	Suppression de corniches	Diminution d'accumulation sur	Stabilisation de versant	Année	Nb	Type	Hauteur (m)	Base (m)	Sommet (m)	Garde au sol (m)	Porosité (%)	Espacement entre vire-	Efficacité
Galfera	2150	■	■		1982	4	En croix	3.4	1.5	3	0.5	26	3 à 5	moyen (trop près)
Galfera	2150	■	■		1982	2	1 panneau	3	2	3	0.15 à 0.4	30	3 à 5	moyen (trop près)
Taelwald	1750		■		1985	10	Auto-orientable	2.4	2.2	2.2	0.1 à 1.5	60	2 à 4.5	faible
Schiltorn	2840	■	■		1988	6	Auto-orientable	3	2.2	2.2	0.6	50	2.5 à 4	non
Schiltorn	2840	■	■		1988	3	Auto-orientable	3	2.2	2.2	0.6	60	2.5 à 4	non
Varneralp	2100 à 2500	■	■		1991	14	En croix	3.2	1.5	3	0.3	25	8 à 14	moyen à bon
Illhorn			■	■	1979	3	1 panneau	3 à 4.2	4 à 5.1	4 à 5.1	0	0	15 à 25	moyen

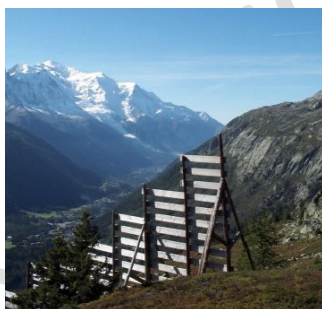
Tableau 3. Principales caractéristiques des 159 vire-vent installés dans le canton du Valais dans le cadre de la protection paravalanche (données tirées de Sivardièrre et Castelle (1992).

NB : Dans le cas de Grimselboden, soit les vire-vent sont destinés à supprimer les corniches et limiter les accumulations, soit ils sont destinés à stabiliser les pentes (ils sont placés différemment pour jouer ces deux rôles)

Dans le cadre de la rédaction de ce guide, un recensement non exhaustif des ouvrages à vent paravalanches a été réalisé pendant l'été 2012 sur les massifs français, alpin et pyrénéen, à l'occasion de visites de site avec enjeux à l'aval. Il a été noté qu'une grande majorité des ouvrages visités est ancienne. Les implantations réalisées ont une trentaine d'année, seule la FD RTM du Capet à Barèges en Hautes-Pyrénées bénéficie à l'automne 2012 d'un complément d'équipement de lutte contre le transport éolien de la neige par mise en place de quatre vire-vent.

La plupart des ouvrages visités (Cliché 77 à Cliché 102) constitue avec des ouvrages de rétention (râteliers, filets, claies) un dispositif de protection paravalanches en zone de départ d'avalanche. Certains, soit du fait des sollicitations éoliennes, soit par défaut d'entretien, sont partiellement ou totalement endommagés. Dans la plupart des cas leur fonctionnalité hivernale a été constatée et les objectifs alloués lors de leur conception atteints. Cette analyse qui sera à compléter est présentée dans le tableau ci-dessous.

Dispositifs de lutte contre le transport éolien de la neige recensés dans les Alpes du Nord									
Localisation	Ouvrages	Nb	Implantation	Matériaux	Dimension L(m)x H(m)	Liaison ouvrage-sol	Objectif	Haubannage	Ouvrages paravalanches
Haute- Savoie _ 74									
Chamonix Site CLPA n°15, Couloir des Nantays au Tour	- Barrière à neige	1	- Alignement en versant, à l'aval d'une rupture de pente	- Acier de structure - Bois pour lattes et contreforts	- 30 x 3 - Garde au sol variable de 0 à 0,50m - Porosité : 50%	- Poteaux avec fiche dans massif béton	- Déposer la neige sur marge du couloir	Non	- Râteliers - Filets - Digue déflectrice



Cliché 77. Barrière à neige du couloir des Nantays_ Chamonix_ Le Tour_(74).

Savoie _ 73									
La Léchère Celliers site CLPA n°4, Plan du Lit	- Barrière à neige	1	- Alignement en crête du couloir	- Acier de structure et bois pour tablier	- 46 x3 - 17 modules fixes ancien- nement auto orientables	- Poteaux avec fiche dans massif béton	- Déposer la neige sur replat	Non	- Râteliers
Macot-La Plagne Site CLPA n°35 Grand Lognan	- Barrière à neige Type Labouly	1	- Alignement en versant de part et d'autre rupture de pente	- Bois pour poteaux et lattes du tablier	- 72 x 3 - Garde au sol variable de 0 à 0,50 m - Porosité : 50%	- Poteaux avec fiche dans sol	- Fixer le dépôt de neige avant la goulotte en marge du couloir	- Câbles de part et d'autre des poteaux et en bout de ligne	- Râteliers, filets, digue déflectrice, implantés a posteriori
	- Barrières à neige auto- orientables sans dérive	12	- Alignement en crête et en arrière de crête Nord	- Acier de structure et bois pour lattes du tablier	- Garde au sol : 0,50m - Porosité : 50%	Poteaux avec fiche dans sol	- Modifier le dépôt de la neige sur l'épaulement Nord du couloir	- Câbles de part et d'autre des poteaux et en bout de ligne	- Râteliers, filets, digue déflectrice implantés a posteriori



Cliché 78. Macot-La-Plagne (73)_Grand -Lognan : site équipé de barrières à neige (LVB) en pleine pente et de barrières auto-orientables (LV Ba) en marge Nord du couloir. (ONF- RTM 73).



Cliché 79. Macot-La-Plagne_Grand –Lognan : le dispositif d'ouvrages à vent paravalanches (vire-vent auto –orientables (LV BA) et barrières à neige) associé au dispositif de rétention par lignes de râteliers et de filets paravalanches.(ONF-RTM 73).

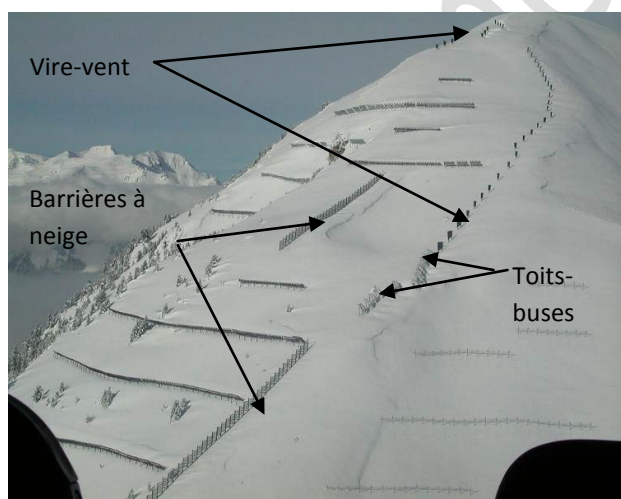


Cliché 80. Macot-La-Plagne _Grand-Lognan : barrière à neige (LVB) intercalée entre des rangées de râteliers et barrières auto-orientables (LV Ba) sur l'épaulement du couloir (ONF-DT RTM).



Cliché 81. Macot-La-Plagne_Grand Lognan, ensemble du dispositif paravalanche composé d'ouvrages à vent et de rétention (ONF-RTM 73).

Dispositifs de lutte contre le transport éolien de la neige recensés dans les Alpes du Nord									
Localisation	Ouvrages	Nb	Implantation	Matériaux	Dimension L(m)x H(m)	Liaison ouvrage-sol	Objectif	Haubannage	Ouvrages paravalanches
Savoie _ 73									
Macot-La Plagne :	- Barrière à neige	2	- Alignement en versant	- Bois pour poteaux et lattes du tablier	- 72 x 3 - Garde au sol variable de 0 à 0,50m - Porosité : 50%	- Poteaux avec fiche dans le sol	- Segmenter la zone de départ et déposer sur marge du couloir	- Câbles de part et d'autre des poteaux et en bout de ligne, ancrés sur micropieux	- Râteliers - Filets
site CLPA n°7	- Toits buses	13	- Alignement en marge Est du versant dominant le couloir n° 12	- Acier pour poteaux (4) et bois pour tablier	- Pente tablier 100%	- Poteaux avec fiche dans le sol	- Empêcher la formation de corniches en tête du couloir n°12		- Râteliers - Filets
St Jacques	- Vire- vent	28	- Alignement en crête des couloirs n°11 et 12	- Acier pour poteaux (2) et bois pour tablier	- 2,8 x 4 garde au sol 1m	- Poteaux avec fiche dans le sol	- Empêcher la formation de corniches en tête des couloirs n°11 et 12	- Câbles de part et d'autre des poteaux, ancrés sur micropieux	- Râteliers - Filets
	- Vire- vent	10	- Alignement en crête du couloir n°7	- Acier pour poteaux et bois pour tablier	- 2,8 x 4 garde au sol 1m	- Poteaux avec fiche dans le sol	- Empêcher la formation de corniches en tête du couloir n°7	- Câbles de part et d'autre des poteaux, ancrés sur micropieux	- Râteliers - Filets



Cliché 82. Macot-La-Plagne _St Jacques : dispositif paravalanche en versant et crête avec barrières à neige, panneaux vire-vent et toits buses et lignes de râteliers et de filets (ONF_ RTM 73).



Cliché 83. Macot- La Plagne_ St Jacques : toits buses (lumières d'entrée 1,90mx2m et de sortie 0,20mx2m) du couloir n°12 ; au 1er plan. haubannage d'extrémité de ligne d'une barrière à neige avec tendeurs à vis et ancrage par piquets métalliques (ONF_DT RTM ; août 2012)



Cliché 84. Macot-La Plagne_ St Jacques : vire-vent à tablier bois trapézoïdal, portés par 2 poteaux métalliques et installés en rebord du couloir CLPA n°11 (ONF_DT RTM ; août 2012).

Dispositifs de lutte contre le transport éolien de la neige recensés dans les Alpes du Nord

Localisation	Ouvrages	Nb	Implantation	Matériaux	Dimension L(m)x H(m)	Liaison ouvrage-sol	Objectif	Haubannage	Ouvrages paravalanches
Isère_ 38									
- St Hilaire du Touvet/	- Toits buses		- Alignement en marge Ouest du couloir	- Acier de structure/ bois		- Ancrage par câble d'acier	- Lutter contre la formation de corniches	Non	- Râteliers

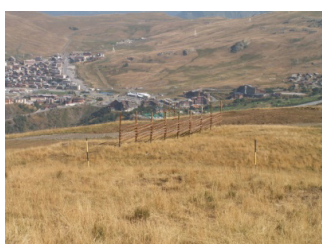


Cliché 85. Saint-Hilaire du Touvet_ 38, toits-buses ancrés et tablier bois faiblement ajouré.

- Huez_ site CLPA n°7 Combe de Bras/ commune	- Barrière à neige	1	- Alignement en marge de la crête ouest de la zone de départ	- Bois pour poteaux, contreforts et lattes parallèles au sol	- 30 x 4 - Garde au sol : 0,50m - Porosité : 50%	- Poteaux avec fiche dans sol	- Déposer la neige sur la croupe en marge Ouest du couloir	non	Non
- Huez_ Signal de l'Homme	- Barrière à neige	1	- Alignement Est-Ouest	- Bois Liaison poteau – lattes par boulons	- 25x2,5 - Garde au sol : 0,50m - Porosité : 50%	- Poteaux avec fiche dans fourreaux de réservation	- Déposer la neige sur le replat	- Câbles de part et d'autre avec tenseur à vis, ancrés sur micropieux	Non
- Auris_ Signal de l'Homme	- Barrière à neige	2	- Alignement en recul de la crête du couloir soumis à vent d'Est	- Bois ; poteaux, contre-forts et lattes clouées parallèles au sol	- 2,8 x 4 - Garde au sol : 0,50m	-Poteaux avec fiche de 1m	- Déposer la neige t sur replat en tête de couloir	- Câbles de part et d'autre avec tenseur à vis	-Digue déflectrice
	- Vire-vent	5 dont 1 au sol	- Alignement en marge Nord de la zone de départ	- Bois		- Poteaux avec fiche de 1m	- Modeler la corniche se formant sous vent de Nord, Nord- Ouest	- Câblesde part et d'autre avec tenseur à vis, ancrés sur micropieux	- Digue déflectrice
	- Barrière à neige	1	- Alignement en recul de la crête du couloir	- Bois pour poteaux, contre-forts et lattes parallèles au sol	- 32X2,5 - Garde au sol :0,25 m - Porosité : 50% 1380€ le ml	- Poteaux avec fiche > 1m	- Déposer la neige par vent d'Est sur replat en tête de couloir	- Câbles de part et d'autre avec tenseur à vis	- Digue déflectrice

Dispositifs de lutte contre le transport éolien de la neige recensés dans les Alpes du Nord

Localisation	Ouvrages	Nb	Implantation	Matériaux	Dimension L(m)x H(m)	Liaison ouvrage-sol	Objectif	Haubannage	Ouvrages paravalanches
Isère_38									
- Oz en Oisans	- Barrière à neige	6	- Alignement sur épaulement	-Acier en structure et lattes	- 25X3 - Garde au sol :0,50m - Porosité : 50%	- Poteaux avec fiche de 1m	- Déposer la neige sur le replat en tête de couloir	- Non	- Râteliers



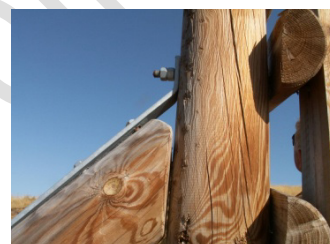
Cliché 86. Alpe d'Huez _ Signal de l'Homme : Barrières à neige implantées en bordure de piste de ski mises en place dans des tubes de réservation de pied de poteaux _ (ONF_DT RTM, août 2012).



Cliché 87. Auris-en-Oisans _ Signal de l'Homme : Barrières à neige à contreforts et haubans métalliques (ONF_DT RTM, août 2012).



Cliché 88. Auris-en-Oisans _ Signal de l'Homme : Barrières à neige avec contreforts boulonnés (ONF_DT RTM, août 2012).



Cliché 89. Auris-en-Oisans _ Signal de l'Homme : Fixation du contrefort sur poteau-support et maintien des lattes en 1/2 rondin (ONF_DT RTM, août 2012).



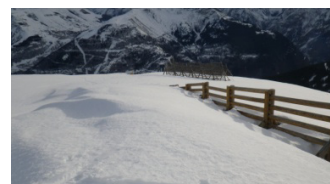
Cliché 90. Oz en Oisans : Barrières à neige métalliques (ONF_DT RTM, août 2012)



Cliché 91. Vire vent auto-orientable avec son sillage (ONF-RTM 38)

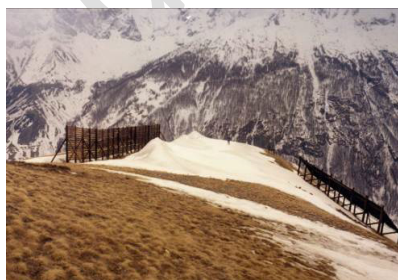


Cliché 92. Auris-en-Oisans Barrière à neige avec son dépôt de neige par vent de Nord-Ouest (ONF-RTM 38, déc 2012)



Cliché 93. Auris-en-Oisans _ Barrière à neige partiellement enfouie par son dépôt (ONF-RTM 38, déc 2012)

Dispositifs de lutte contre le transport éolien de la neige recensés dans les Alpes du Nord									
Localisation	Ouvrages	Nb	Implantation	Matériaux	Dimension L(m)x H(m)	Liaison ouvrage-sol	Objectif	Haubannage	Ouvrages paravalanches
Hautes-Alpes_05									
- La Grave _Le Chazelet_ FD RTM Site CLPA n°22	- Barrière à neige	1	- Alignement N-S sur crête avec replat pour dépôt	- Bois pour poteaux, contreforts de part et d'autre et lattes parallèles au sol	- 52 x 4 - Garde au sol : 0,50m - Porosité : 10%	- Poteaux avec fiche >1m	- Déposer la neige sur replat avant versant	Non	- Râteliers - Filets
- La Grave _Le Chazelet_ FD RTM Site CLPA n°22 avalanche de référence du 20/3/1971	- Vire-vent	1	- En versant Sud sous crête orientée SW-NE	- Bois	- 2,8 x 4 - Garde au sol : 0,50m	- 2 poteaux avec fiche de 0,80m +2 contreforts	- Empêcher la formation corniches	Non	- Râteliers - Filets
	- Toit buse	1	- Disposé en crête avant convexité sur versant Sud	- Bois - Boulons de liaison	- 27 x 4 - Pente 120%	- Poteaux avec fiche de 1m	- Empêcher la formation d'accumula tion par vent d'Est en rupture de pente	Non	- Râteliers - Filets
- La Grave Le Chazelet FD RTM Site CLPA n°22	- Barrière à neige auto- orientable avec dérives	13	- Alignement sur crête avec replat	- Cadre et pivot métallique - Platelage bois	- 2,2 x 5	- Poteaux avec fiche dans massif ciment	- Créer une hétérogéné ité dans le manteau neigeux sous sillage de l'ouvrage	Non	- Râteliers - Filets
	- Vire-vent	4	- Alignement sur crête latérale (85m)	- Bois	- 2,8 x 4	- Poteaux avec fiche de 1m	- Empêcher la formation de corniches		- Râteliers - Filets



Cliché 94. La Grave _ Le Chazelet -05 -avec dépôt de neige par vent d'Est en pied de barrière à neige et érosion du manteau neigeux au droit des toits-buses (ONF_ RTM 05-mars 1974).



Cliché 95. La Grave _ Le Chazelet _ 05 – toits-buses et vire vent à tablier et contreventement (ONF_ RTM 05-mars 1974).



Cliché 96. La Grave _ Le Chazelet _ 05_ toits-buses et boisements paravalanches vigoureux, (ONF_ DT RTM juin 2012).

Dispositifs de lutte contre le transport éolien de la neige recensés dans les Alpes du Nord									
Localisation	Ouvrages	Nb	Implantation	Matériaux	Dimension L(m)x H(m)	Liaison ouvrage-sol	Objectif	Haubannage	Ouvrages paravalanches
Alpes-de-Haute-Provence_04									
- Larche Site CLPA n°19 et 20_Le Combal/FD RTM	- Barrière à neige	7	- Alignement en extrémité Ouest du versant de Pichalp	- Bois - Poteaux, contreforts de part et d'autre et tablier à lattes parallèles au sol	- 25 x 4 - Garde au sol 0,50m - - Porosité 50%	- Poteaux avec fiche dans sol >1m	- Déposer la neige en marge Est de la zone de départ	- Non, contre-fiches de part et d'autre des poteaux	- Digue déflectrice en amont du village de Larche
- Larche	- Vire-vent Ligne c	6	- Alignement en crête (32m) de zone de départ	- Bois	- 1,7 x -2,6	- Poteaux avec fiche de 0,80m	- Empêcher la formation de corniches. - Créer une hétérogénéi té dans le manteau neigeux sous sillage de l'ouvrage	- Câble	- Non
Site CLPA n°19_Le Combal/FD RTM	- Vire-vent Ligne d	30	- Alignement en crête (173m) de zone de départ	- Bois	- 1,6 x 1,5	- Poteaux avec fiche de 0,80m		- Câble	- Non
Avalanche de référence du 20/2/1972	- Vire-vent Ligne e	17	- Alignement en crête (25m) de zone de départ	- Bois	- 1,5 x 1,5	- Poteaux avec fiche de 0,80m		- Câble	- Non
- Larche Site CLPA couloir d'avalanche avec zones de départ comparti- mentées Vent dominant d' Est du col de Larche	- Vire-vent Ligne g	6	- Alignement en crête latérale (33m) de zone de départ	- Bois	- 1,4 x 1,9	- Poteaux avec fiche de 0,80m		- Câble	- Non
	- Vire-vent Ligne h	12	- Alignement en crête sur 107ml en zone de départ	- Bois	- 1,4 x 1,9	- Poteaux avec fiche de 0,80m		- Câble	- Non
	- Vire-vent Ligne i	16	- Alignement en crête sur 85m en zone de départ	- Bois	- 1,4 x 1,9	- Poteaux avec fiche de 0,80m		- Câble	- Non
- Larche Site CLPA n°19_Le Combal FD RTM	- Pupitre	1	- En crête latérale du couloir	- Bois	- 5x3	- Poteaux avec fiche de 0,80m	- Empêcher la formation de corniches	- Non	- Non
	- Toits buses	15	- En crête latérale du couloir	- Bois	- 3x5 (10) - 5x4,9 (5)	- Poteaux avec fiche de 0,80m		- Non	- Non



Clichés 97a et b. Larche 04 _ couloir n°19 et 20 de Combal : Barrières à vent avec sa zone de dépôt (à droite) et en hiver l'accumulation de neige sous le vent (ONF_RTM 04).



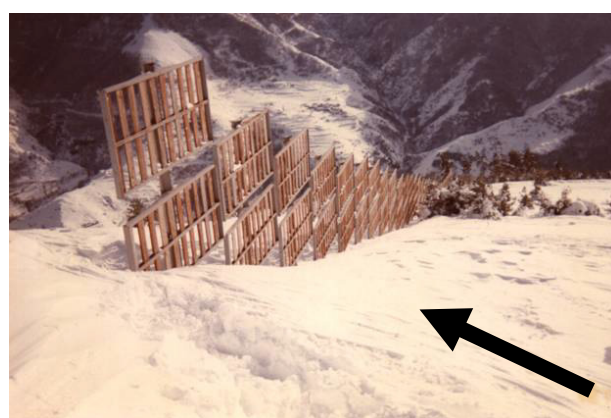
VENT

Cliché 98. Larche 04 _ couloir n°19 du Combal : Vire-vent, 1,7m x 2,6m, implantés en marge d'un panneau déclencheur d'avalanche (ONF_RTM 04).



Cliché 99. Larche 04 _ couloir n°19 du Combal : Vire-vent haubannés par câbles, alignés en marge Est du couloir (ONF_RTM 04).

Dispositifs de lutte contre le transport éolien de la neige recensés dans les Pyrénées									
Localisation	Ouvrages	Nb	Implantation	Matériaux	Dimension L(m)x H(m)	Liaison ouvrage-sol	Objectif	Haubannage	Ouvrages paravalanches
Pyrénées - Orientales_66									
- Fontpédrouse site de Coume	- Barrière à neige composée de 66 panneaux étagés par 2 sur poteaux	1	- Alignement N-S sur 115m de long en marge du couloir	- Métal et lattes verticales (10 par panneaux)	- 3x4 - Garde au sol : en escalier - Porosité : 50%	- Poteaux noyés dans massif béton	- Déposer la neige sur l' épauleme nt avant le couloir	- Non	- Râteliers - Filets - Claies



Cliché 100. Fontpédrouse _ Barrière à neige avec tablier à double panneau ajouré et à base non parallèle au sol (ONF_ RTM 66).

- L'Hospitalet- près-l'Andorre Site CLPA n°24 Le Ramounichou	- Barrière à neige	2	- Alignement N-S en crête avec replat de dépôt au sud	- Acier de structure et bois pour planches parallèles au sol	- 115x - Garde au sol :0,50m - Porosité : 20%	- Poteaux avec fiche de 1m	- Déposer la neige sur l'épauleme nt avant le couloir	- Poteaux de part et d'autre et extrémité ligne	- Râteliers - Filets - Claies
--	-----------------------	---	---	---	---	-------------------------------	---	---	-------------------------------------

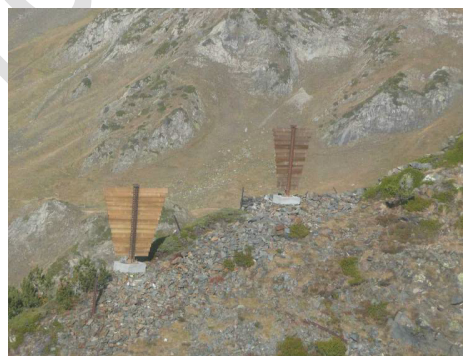


Cliché 100. FD RTM de l'Hospitalet-près-l'Andorre. Barrières à vent à lattes (planches) parallèles au sol (ONF_ RTM 09-31)

Dispositifs de lutte contre le transport éolien de la neige recensés dans les Pyrénées									
Localisation	Ouvrages	Nb	Implantation	Matériaux	Dimension L(m)x H(m)	Liaison ouvrage-sol	Objectif	Haubannage	Ouvrages paravalanches
Hautes - Pyrénées _ 65									
- Barèges et Sers site CLPA n°6 Le Theil Ouest	- Barrière à neige	1	- Alignement en versant nord sous crête	- Acier de structure Bois pour planches parallèles au sol	- 15x 2,5 - Garde au sol - Porosité : 50%	- Poteaux avec fiche >1m	- Déposer la neige sur l'épaule du couloir	- Non	- Râteliers - Filets - Claies
	- Barrière à neige	1			- 10x 2,5 - Garde au sol - Porosité : 50%	- Poteaux avec fiche >1mm	- Déposer la neige sous la crête		- Râteliers - Filets - Claies
	- Toits buses	4	- Alignement en crête	- Acier de structure Bois	- 4,6x 2, 3 entrée: 2,30 m sortie : 0,90m	- Poteaux avec fiche >1m	- Lutter contre la formation de corniches		- Râteliers - Filets - Claies



Cliché 101. Crête du couloir du Theil, toits-buses à tablier bois, portés par 6 poteaux acier ancrés dans un massif béton (ONF_RTM 64-65).



Cliché 102. Couloir du Theil, vire-vent à tablier bois supporté par un poteau acier unique fixé par platine boulonnée au massif béton par 4 barres Gewi (ONF_RTM 64-65).

7 CONDUITE D'UN PROJET ET ETUDES PREALABLES

7.1 MISE EN GARDE DANS LE CAS DES ZONES DE DEPART D'AVALANCHE

«Aussi séduisantes que puissent être les ouvrages à vent, ils ne peuvent être la base de la protection paravalanche dans un couloir. En effet, leur utilisation est délicate, à moins qu'il ne neige toujours avec le même vent dominant- ce qui est rare. Par ailleurs lorsque l'on veut les mettre en place, on a rarement une connaissance suffisante des conditions locales de vent ; les travaux commencent généralement en urgence dans la zone à protéger, après une catastrophe ou une alarme sérieuse et par conséquent les données météorologiques et les observations hivernales sont souvent sérieusement déficientes. Cependant lorsque les conditions locales sont mieux connues, les ouvrages à vent peuvent fournir un excellent complément aux structures de protection classiques paravalanches ».Telle est la conclusion du chapitre dédié aux ouvrages à

vent paru en 1985 dans le guide 5 « Avalanche control » de la FAO (<http://www.fao.org/DOCREP/006/AD075E/AD075e00.htm>).

7.2 ETUDE DE LA TOPOGRAPHIE LOCALE ET DES VENTS AU SOL SUR LA ZONE A PROTEGER

La topographie locale est l'élément primordial du projet. Des levés de terrain (incluant le type de végétation) dans les zones à relief peu tranché et identifiées sur site en été et en hiver sont nécessaires. Il est important de caractériser les zones de dépôt et d'érosion de la neige ainsi que la direction des vents responsables de cette répartition de la neige. Cependant, les zones de départ d'avalanches sont peu fréquentées et ne disposent le plus souvent que de peu d'observations. Il est possible de commander des roses des vents auprès de Météo France (<https://professionnel.meteofrance.com>). Mais, d'une part ces stations sont assez éparpillées et d'autre part, elles ne disposent pas actuellement de capteurs de transport de neige par le vent. Or pour un site donné, la rose de vents (Figure 52) ne correspond pas forcément à la rose des vents responsable des épisodes de transport, car c'est bien celle-là, in fine, qui sera utile.

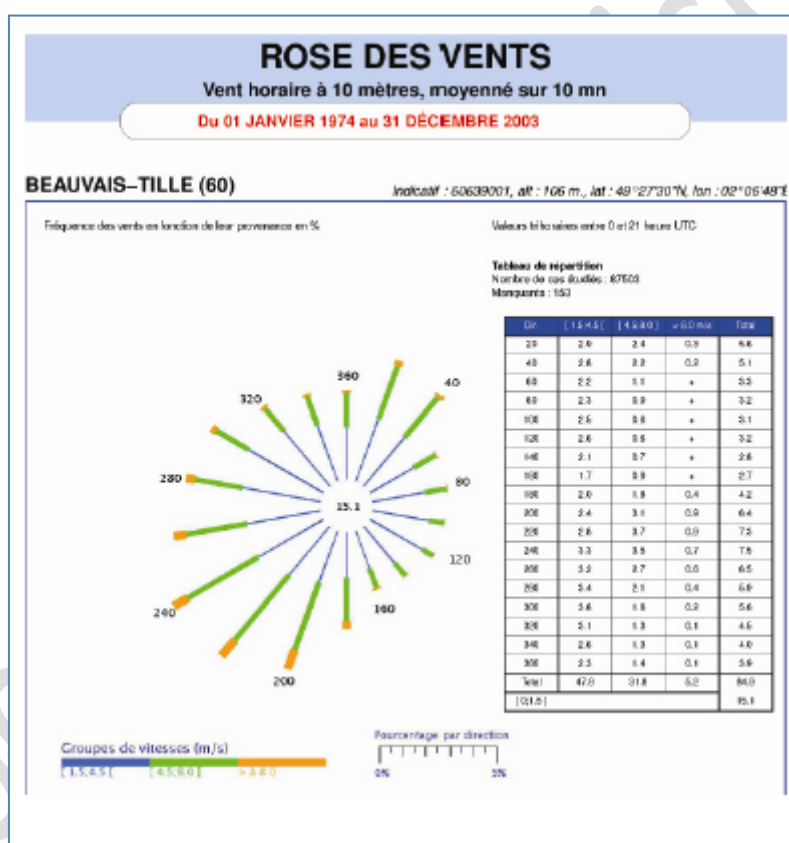


Figure 52. Type de rose des vents type disponible auprès de Météo-France

Seuls, certains Conseils Généraux (notamment celui de la Savoie) disposent de stations météorologiques incluant des mesures de transport de neige à haute altitude (station Flowcapt http://www.isaw.ch/index.php?nav=data_meteo_stations&lang=en).

En l'absence de données à proximité du site d'étude, la solution, en termes de météorologie, consisterait donc à installer une station météorologique munie d'un capteur de transport. Ces données complétées par des mesures au laser scan (Figure 22) en début et fin de saison (ou à défaut un réseau de perches à neige) permettraient de bien comprendre non seulement quels ont été les épisodes météorologiques à l'origine du transport, mais quelles ont été les directions des vents au sol et où sont situées les zones de dépôt et d'érosion.

Mais cette solution est coûteuse et peut nécessiter parfois plusieurs hivers d'enregistrement (un suivi durant 3 à 5 hivers serait l'idéal) souvent peu compatibles avec les délais et surtout montants disponibles pour les études. Par ailleurs, pour un même vent synoptique, les directions des vents au sol peuvent varier spatialement (Figure 53) et une seule centrale peut s'avérer parfois insuffisante !

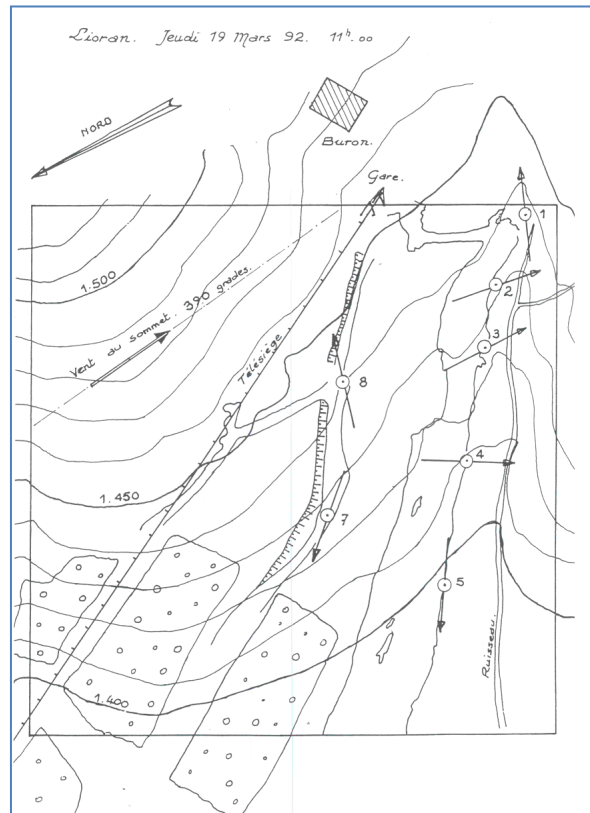


Figure 53. Relevé de directions locales du vent au contact de la topographie du site (JM Taillandier).

Il est donc nécessaire :

- de s'appuyer en priorité sur la connaissance empirique des gens de l'endroit,
- d'interroger le plus possible les personnes détentrice d'un vécu d'événements anciens,

Une solution efficace et astucieuse pour obtenir une carte des vents consiste également à étudier les formes éoliennes après chaque épisode et de remonter ainsi à la carte des vents au sol. Les formes éoliennes résultent de l'interaction entre la surface du manteau neigeux, la topographie locale et le vent. Elles peuvent être utilement repérées. Certaines sont liées à l'accumulation de neige, à la présence d'obstacles, d'autres au contraire sont dues à l'érosion. Les principales structures rencontrées et les directions des vents correspondantes sont illustrées par les figures suivantes (Cliché 103 à Cliché 107) :


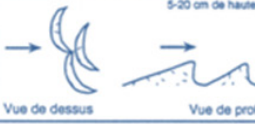


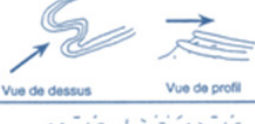




	STRUCTURES	SCHÉMA	CRITÈRES D'IDENTIFICATION DE LA DIRECTION DU VENT
ACCUMULATION	dunes	 Vue de dessus Vue de profil	Transversales à la direction du vent. Pente douce au vent et pente forte sous le vent.
	vagues	 Vue de dessus Vue de profil	Transversales à la direction du vent. Vues de dessus elles ont une morphologie en forme de croissant de lune, la partie concave se forme sous le vent.
	ripples	 Vue de profil	Transversaux à la direction du vent. Pente douce au vent et pente forte sous le vent.
	barkhanes	 Vue de dessus	Longitudinaux dans la direction du vent Pente douce au vent. Angle obtus si le vent est régulier et angle aigu dans le cas contraire.
ÉROSION	sastruguis	 Vue de dessus Vue de profil	Longitudinaux dans la direction du vent. Relief négatif. Pente douce sous le vent et pente forte au vent.
	entailles	 Vue de dessus	Longitudinaux dans la direction du vent. Relief négatif. La partie la plus large de l'entaille correspond à la direction d'où vient le vent.
	pits	 Vue de dessus	Transversales à la direction du vent. La partie plus érodée du pit correspond à la direction d'où vient le vent.
OBSTACLES	accumulation derrière un obstacle	 Vue de profil	Longitudinales dans la direction du vent. L'accumulation est formée sous le vent de l'obstacle.
	givre	 Vue de profil	Longitudinales dans la direction du vent. Le givre est formé au vent de l'obstacle.

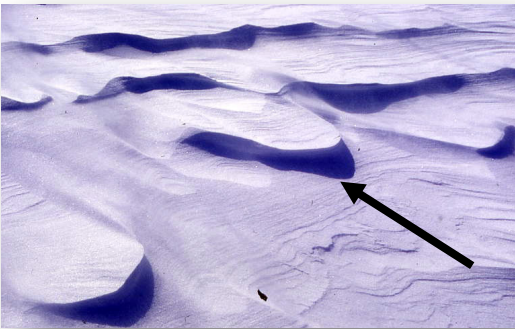
Figure 54. Description des principales structures de la surface de la neige d'après M. Mases (1997)



Cliché 103. Dunes (la flèche indique la direction du vent)



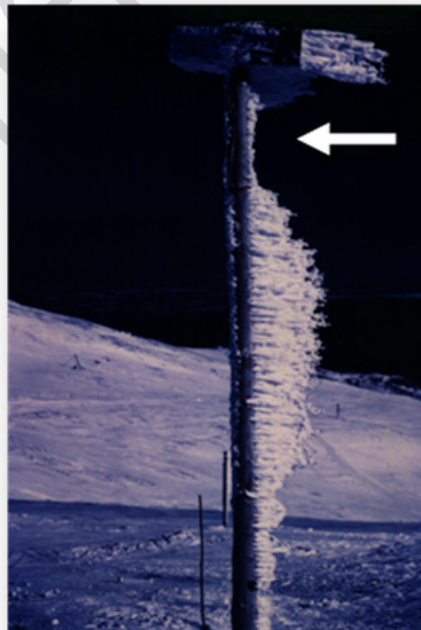
Cliché 104. Ripples (la flèche indique la direction du vent)



Cliché 105. Sastruggis (la flèche indique la direction du vent)



Cliché 106. Accumulation de neige derrière des obstacles (la flèche indique la direction du vent)



Cliché 107. Givre de flamme (la flèche indique la direction du vent)

L'intensité des vents est elle plus difficile à déterminer. On peut pour mémoire citer les correspondances entre effets visibles liés au vent, échelle beaufort et intensité en m/s ou km/h.

Chiffre Beaufort	Vitesse moyenne du vent			Terme descriptif du vent	
	Nœud	km/h	m/s		
0	0-1	0-1	0-0,3	Calme	Les fumées s'élèvent verticalement
1	1-3	1-5	0.3-1,5	Très légère brise	Fumées légèrement déviées
2	4-6	6-11	1,5-3	Légère brise	Fumées déviées, le visage ressent le vent
3	7-10	12-19	3-5,5	Petite brise	Feuilles et petites branches agitées. Cheveux dérangés. Drapeaux déployés par le vent.
4	11-16	20-28	5,5-8	Jolie brise	Poussières et papiers soulevés. Cheveux décoiffés.
5	17-21	29-38	8-11	Bonne brise	Les petits arbres oscillent. Marche à pied légèrement perturbée.
6	22-27	39-49	11-14	Vent frais	Le vent siffle dans les fils. Les grosses branches bougent. Utilisation du parapluie aléatoire.
7	28-33	50-61	14-17	Grand frais	Arbres totalement en mouvement. Difficulté à marcher contre le vent.
8	34-40	62-74	17-21	Coup de vent	Les branches des arbres cassent. Progression à pied très difficile.
9	41-47	75-88	21-25	Fort coup de vent	Risque d'être projeté à terre. Dommages aux maisons, tuiles, cheminées arrachées.
10	48-55	89-102	25-29	Tempête	Rare à l'intérieur des terres. Arbres déracinés, toitures arrachées ; Dommages importants.
11	56-63	103-117	29-32	Violente tempête	Rarement observé. Ravages étendus
12	64-	118-	32	Ouragan	

Tableau 1. Echelle de Beaufort, effets de la vitesse moyenne du vent sur la neige.

7.3 IMPLANTATION DES OUVRAGES : EXEMPLES

L'implantation est le point clé de la réussite de toute conception de projet d'ouvrages à vent paravalanches. Pour qu'un ouvrage à vent soit efficace, il doit être dans une zone ventée et le plus souvent perpendiculaire à la direction du vent dominant (Paragraphe 6). Comme indiqué précédemment, la détermination précise de ces zones sur le terrain peut s'avérer délicate. A quelques mètres près, on passe d'une zone au vent à une zone sans vent. Ceci est accentué par le fait que le projet s'établit souvent en été ou à l'automne, et que l'hiver, des accumulations "naturelles" de neige peuvent modifier localement l'écoulement du vent. On citera deux exemples à titre d'illustration.

7.3.1 LARCHE

En vallée de l'Ubayette à Larche (04), le transport de la neige par la Lombarde, vent d'Est issu d'Italie, génère des accumulations dans les zones de départ des couloirs de Combal n°19 et 20 (Figure 55). Ce transport de neige se fait à partir des estives gazonnées du versant à replat intermédiaire du Pichalp.

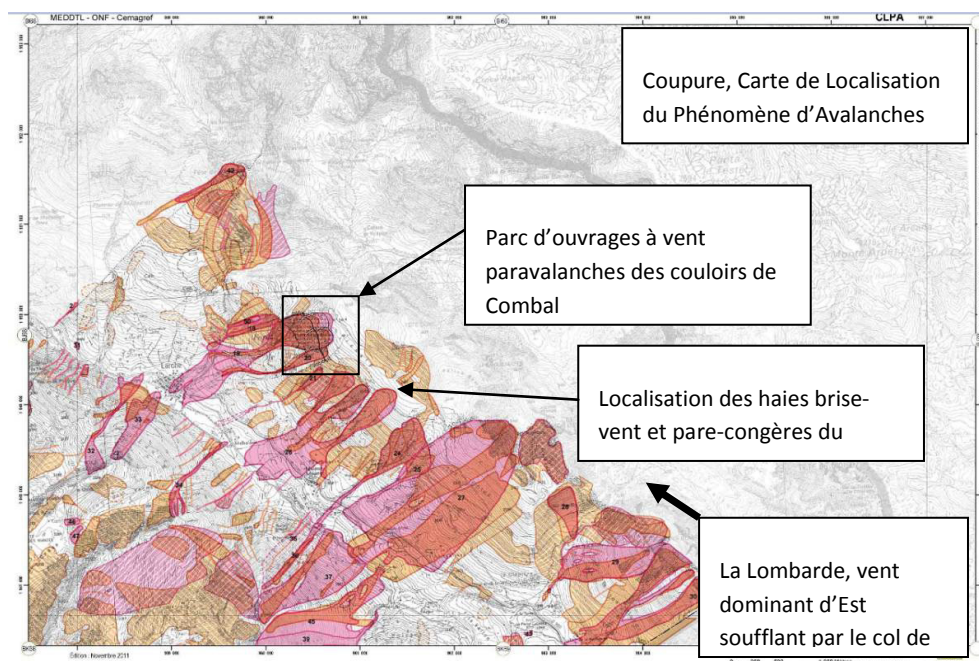
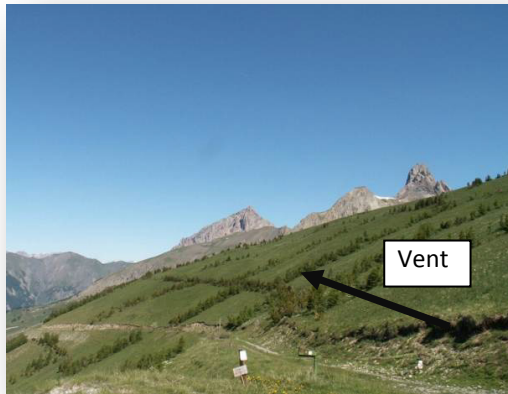


Figure 55. Localisation des ouvrages à vent paravalanches des couloirs de Combal et des haies pare-congères du Pichalp, Larche (04).

Un cloisonnement végétal par plantation de brises-vent végétaux disposés en bandes perpendiculaires et longitudinales par rapport à la direction de la Lombarde pour créer des casiers de stockage de neige a donc été mis en place sur l'estive du Pichalp (alt. 2300m). Ce dispositif limite l'arrivée de la neige aux barrières à neige et aux zones de départ d'avalanche du couloir de Combal (Figure 55). Des panneaux vire-vent (Cliché 108 et Cliché 109), un pupitre et des toits buses complètent le dispositif en introduisant des discontinuités dans le manteau neigeux en marge et en crête de couloir de Combal pour empêcher la formation de corniches.



Cliché 108. Estives du Pichalp à Larche avec cloisonnement par haies pare-congères plantées en bandes denses dans le sens de la pente perpendiculairement à la direction du vent (ONF_DT RTM).



Cliché 109. Marge Est de la zone de départ du couloir du Combal à Larche et zone de dépôt de neige sur banquette en zone sous le vent d'une barrière à neige et d'un brise vent boisé. (ONF_DT RTM).

7.3.2 BARÈGES

A Barèges (Hautes Pyrénées), la crête du couloir du Theil (alt. 2240m) est soumise à des vents d'Ouest, Nord-Ouest qui chargent en neige les dispositifs paravalanches de protection active. Des toits buses (Cliché 110 et Cliché 111) ont été mis en place et permettent d'éviter la formation de corniches en marge Ouest du couloir, de déposer la neige avant le couloir et de modifier le manteau neigeux dans le couloir.



Cliché 110. Toits-buses et leur sillage dans le manteau neigeux en marge du couloir du Theil équipé en lignes de râteliers.

Du fait de l'efficacité de ces ouvrages à vent, mais aussi du fait d'une marge du couloir d'avalanche du Theil devenant étroite en direction de la crête supérieure du bassin d'alimentation, le recours à des vire-vent (Cliché 111) a été arrêté. Pour ce faire après étude d'implantation et dimensionnement (Figure 56), il a été mis en place, espacés de 3,20m deux vire-vent en croix (Cliché 113 et Cliché 114) et deux vire-vent à tablier (Cliché 113 et Cliché 114).

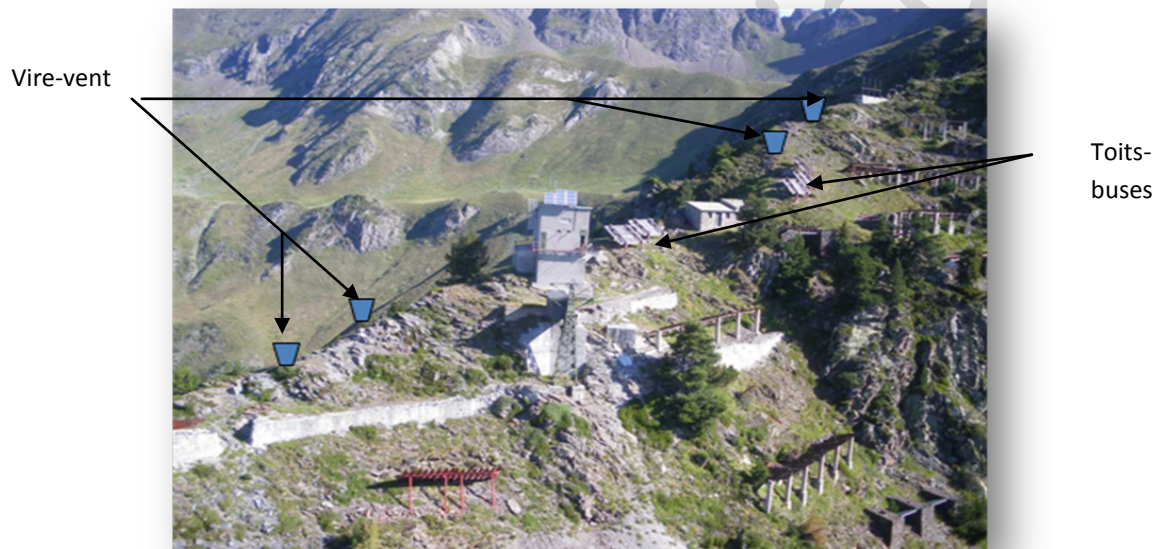
Ces ouvrages fabriqués en atelier sont hélicoptérés et doivent :

- permettre une meilleure répartition de la neige en versant,

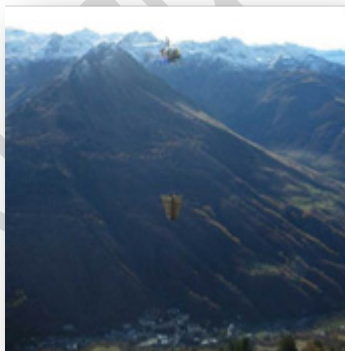
- empêcher la formation de corniches en crête,
- améliorer la répartition de la neige au niveau des rangées d'ouvrages de rétention implantées en pente soutenue.



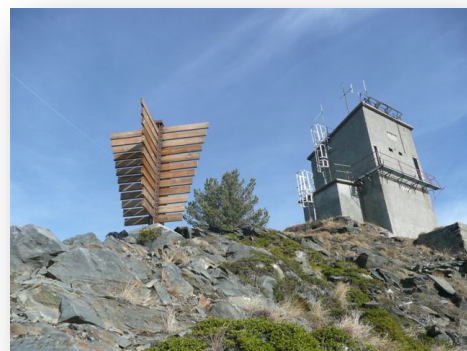
Clichés 111. Toits-buses fonctionnels en marge du couloir (cliché RTM 64-65).



Cliché 112. Projet d'implantation avec localisation des vire-vent en crête du couloir du Theil (ONF_ RTM 64-65).



Cliché 113. Hélicoptage d'un vire vent en croix, Poids 400kg.



Cliché 114. Vire vent en croix (H=3m et L = 3m) en place sur l'arête du couloir du Theil

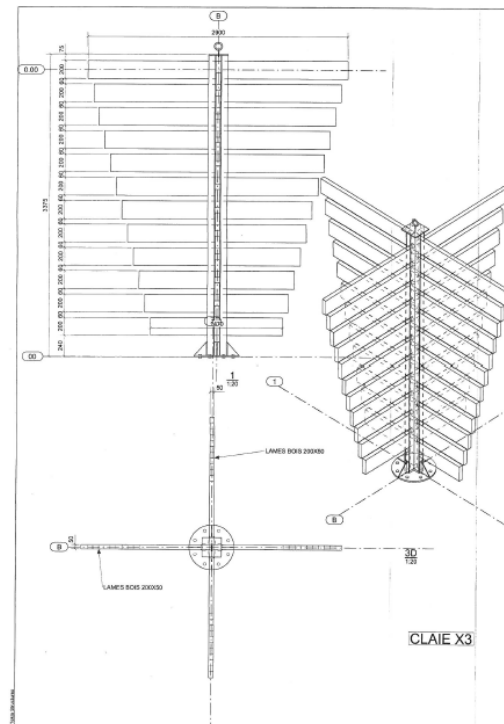
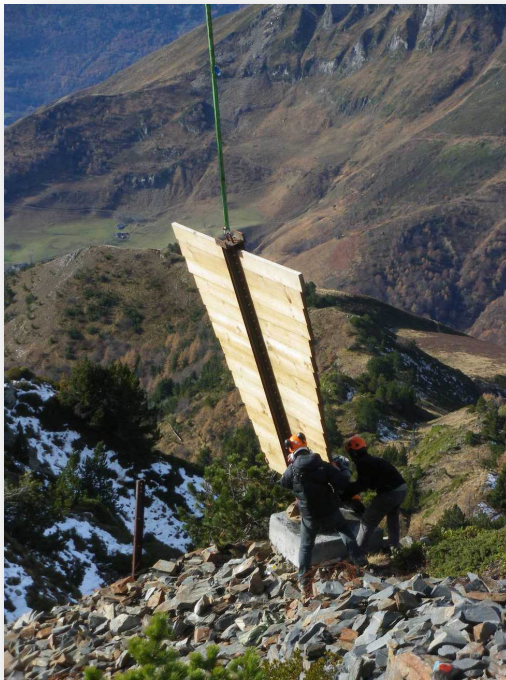
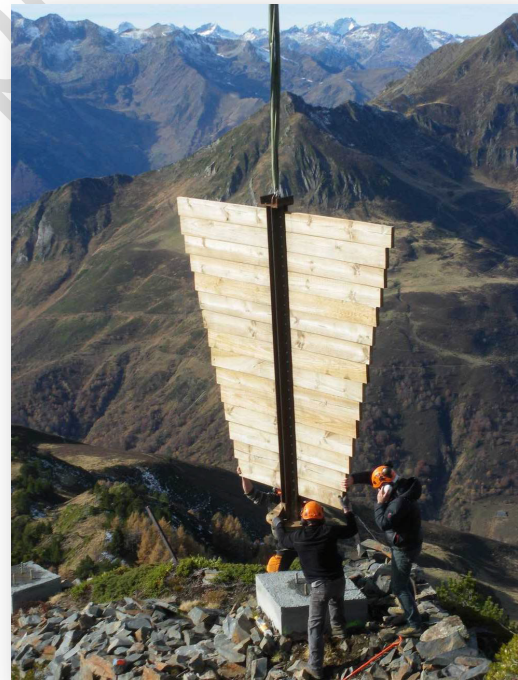


Figure 56. Plan- type d'un vire-vent en croix modèle Nestadour ((Information RTM 64-65) implanté en crête du couloir du Theil à Barèges (FD RTM du Capet).



Cliché 115. Héliportage et pose sur son massif d'un vire vent à tablier de largeur 3m et de hauteur 3m_ FD RTM du Capet (ONF-RTM 64-65).



Cliché 116. Solidarisation de la platine de base du poteau au massif d'ancrage par 4 barres Gewi _ FD RTM du Capet (ONF-RTM 64-65).

7.3.3 EFFORTS LIÉS AU VENT

Les efforts liés au vent à prendre en compte pour le dimensionnement des ouvrages à vent paravalanches, doivent être calculés en application de la norme NF EN 1991-1-4 de novembre 2005 « Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions générales – Actions du vent » qui a transposé dans la collection française la norme européenne EN 1991-1-4:2005. La norme NF EN 1991-1-4/NA de mars 2008 définit les conditions de l'application sur le territoire français de la norme NF EN 1991-1-4:2005

Il ne s'agit pas de reprendre in-extenso ces normes, auquel le chef de projet devra se référer si nécessaire, mais de rappeler quelques principes qui y figurent.

La force exercée par le vent F_w agissant sur une construction ou un élément de construction peut être déterminée directement en utilisant l'expression

$$F_w = C_s C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad \text{Equation 18}$$

avec $C_s C_d$ le coefficient structural destiné à tenir compte de l'effet sur les actions du vent d'une part de l'absence de simultanéité des pointes de pression à la surface de la construction (c_s) et d'autre part des vibrations de la structure engendrées par la turbulence (c_d)
 C_f le coefficient de force applicable à la construction ou à l'élément de construction
 $q_p(z_e)$ la pression Pa (ou en N/m^2) dynamique de pointe à la hauteur de référence z_e
 A_{ref} l'aire de référence de la construction ou de l'élément de construction (m^2)

$$q_p(z) = C_e(z) \cdot q_b \quad \text{Equation 19}$$

avec q_b pression dynamique (Pa ou en N/m^2) de référence du vent
 $C_e(z)$ coefficient d'exposition prenant en compte le terrain et la hauteur au-dessus du sol, z , donné
 C_e coefficient transforme également la pression moyenne en pression de pointe tenant compte de la turbulence ;
 ρ la masse volumique de l'air. La masse volumique de l'air dépendant de l'altitude, de la température et de la pression probable du lieu au cours des tempêtes de vent. En France ρ est prise égale à $1,25 \text{ kg/m}^3$.

$$q_b = 0,5 \rho v_b^2 \quad \text{Equation 20}$$

avec v_b vitesse de référence du vent (m/s)

La vitesse de référence du vent doit être calculée à partir de l'expression :

$$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} \quad \text{Equation 21}$$

avec v_b (m/s) vitesse de référence du vent, définie en fonction de la direction de ce dernier et de la période de l'année à une hauteur de 10 m au-dessus d'un sol.

$v_{b,0}$ (m/s) valeur de base de la vitesse de référence du vent c'est-à-dire la vitesse moyenne sur 10 min caractéristique, indépendamment de la direction du vent et de la période de l'année, à une hauteur de 10 m au-dessus du sol en terrain dégagé, de type « rase campagne », à végétation basse telle que de l'herbe et des obstacles isolés séparés les uns des autres d'au moins 20 fois leur hauteur.

C_{dir} le coefficient de direction;

C_{season} le coefficient de saison.

La vitesse moyenne du vent $v_m(z)$ à une hauteur z au-dessus du sol dépend de la rugosité du terrain et de l'orographie, ainsi que de la vitesse de référence du vent, v_b , et il convient de la déterminer à l'aide de l'expression :

$$v_m(z) = C_r(z) \cdot C_o(z) \cdot v_b$$

Equation 22

avec $C_r(z)$ est le coefficient de rugosité;

$C_o(z)$ est le coefficient orographique.

La valeur de base de la vitesse de référence du vent, $v_{ref,0}$, est donnée sur Figure 57, selon la zone concernée. Cette valeur de base est censée représenter la vitesse moyenne sur 10 min à 10 m au-dessus du sol d'un terrain de catégorie 2 (voir Tableau 4) avec une probabilité annuelle de dépassement de 0,02 (communément désignée comme de période moyenne de retour égale à 50 ans). Des formules sont disponibles pour calculer une autre période de retour.

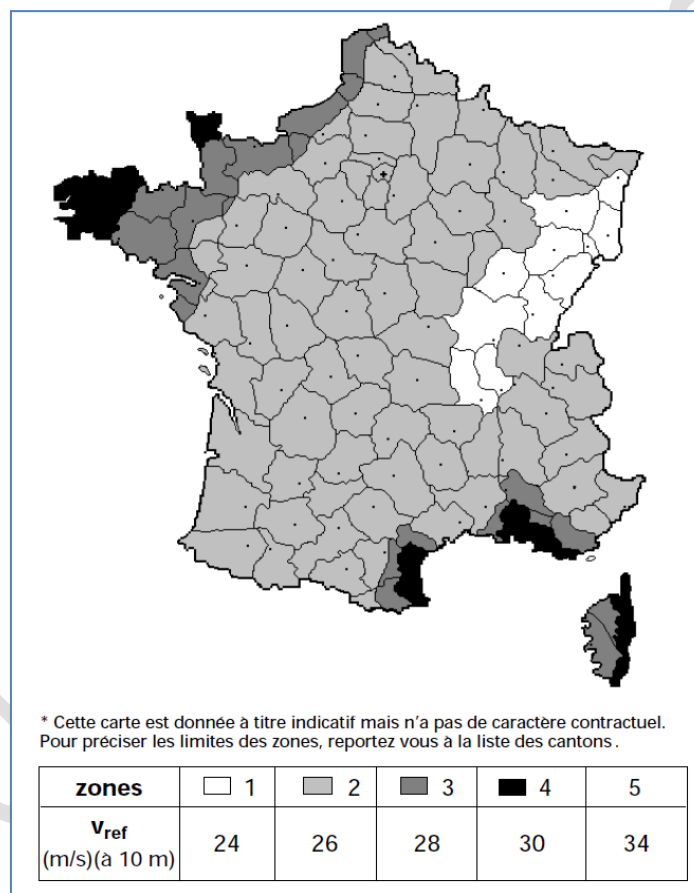


Figure 57. Carte de la valeur de base de la vitesse moyenne du vent de référence en France (Eurocode 1 partie -2-4)

Catégorie de terrain		z_0 [m]	z_{min} [m]
0	Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5 km	0,005	1
II	Rase campagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments, etc.) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur	0,05	2
IIIa	Campagne avec des haies ; vignobles ; bocage ; habitat dispersé	0,20	5
IIIb	Zones urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers	0,5	9
IV	Zones urbaines dont au moins 15% de la surface sont recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m ; forêts	1,0	15

Tableau 4. Valeurs de rugosité du sol selon la catégorie de terrain à l'EC1.

Que ce soit pour les barrières à neige, les toits-buses ou les vire-vent, les systèmes d'ancrage sont décrits dans le guide "Protection contre les risques naturels. Ancrages passifs en montagne : conception, réalisation, contrôle. Guide technique". MEDD-DPPR / CEBTP Lyon / Cemagref Grenoble. 2004. Pour les barrières à neige, on privilégiera le contreventement qui permet de diviser par deux ou trois l'effort d'encastrement en pied de poteau et on préférera les contreventements rigides plutôt que les câbles, car ils ont une action dans les deux directions d'efforts.

Dans la Norme NF P 95-305, relative aux barrières à neige publiée avant la parution de l'Eurocode 1 NF EN 1991-1-4, les efforts sont calculés comme suit :

$$F_w = 0.5 \cdot C_f \cdot V^2 \cdot A_{ref}$$

Equation 23

V correspond à la vitesse bidécennale (pour les barrières fixes) à 2 m du sol sans qu'il soit précisé s'il s'agit d'une vitesse moyenne ou max. On peut supposer qu'il s'agit de la vitesse de pointe sachant qu'à aucun moment dans la formule n'intervient un coefficient de type $C_e(z)$. En l'absence de mesures disponibles sur site, il est proposé de retenir les valeurs suivantes :

- Situation de basse altitude (moins de 1500 m) sans renforcement de topographie : $V = 30$ m/s
- Situation de basse altitude (moins de 1500 m) avec renforcement lié à la topographie ou situation de haute altitude (1500 m et plus) sans renforcement lié à la topographie : $V = 40$ m/s
- Situation de haute altitude (1500 m et plus) avec renforcement lié à la topographie : $V = 50$ m/s

La valeur choisie pour C_f doit être justifiée par des essais effectués en soufflerie. En l'absence de certificat d'essai, C_f est pris égal à 2.

8 REFERENCES

Bagnold R.A., 1941. The physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen, London.

Bellot H. and F. Naaim-Bouvet, 2010. Les capteurs de transport de neige par le vent au banc d'essai», Revue SET, n°2, (<http://www.set-revue.fr/les-capteurs-de-transport-de-neige-par-le-vent-au-banc-dessai>), 66-77.

Bellot, H., Naaim-Bouvet, F., Trouvilliez, A. and C. Genthon, 2011. Present weather sensors tests for measuring drifting snow. Annals of Glaciology, vol 52, n°58, 176-184.

Bolognesi R., Daultier J-M., Naaim F. et F. Ousset, 1995. Une évaluation quantitative du snowdrift pour la prévision locale des avalanches, Revue ANENA, 69.

BOKU, CEMAGREF, CUDAM, NGI, SLF, UP, 2008. – D2.1 – Catalogue of current structural and non-structural (active/passive) countermeasures against debris flows, rock avalanches and snow avalanches, IRASMOS (Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements)

Bourgeois G., Duclos A. et S. Caffo, 2013. Double mesures de hauteurs de neige : une innovation pour mieux gérer le risque d'avalanche en temps réel sur les routes de Savoie (France), Proceedings of the International Snow Science Workshop Grenoble- Chamonix, Oct 2013, 99-103.

Centre d'Études de la Neige (Météo-France), CAF et ANENA, 2008. Éléments de nivologie, Éditeur : ANENA, édition 2008.

Chaudary V. and P. Mathur, 2004. Composite avalanche control scheme developed for the lower Himalayan zone : a case history, Cold Region Science and Technology, 39, 243-255.

Chritin V., Bolognesi, R., and H. Gubler, 1999. Flowcapt: a new acoustic sensor to measure snowdrift and wind velocity for avalanche forecasting, Cold Regions Science and Technology, 30, 125-133.

Cierco, F.-X., Naaim-Bouvet, F. and H. Bellot, 2007, Acoustic sensors for snowdrift measurements: How should they be used for research purposes?, Cold Regions Science and Technology, vol. 49, 74-89.

Colin W., 1987, Facilities design, Proceedings of Snow Control Institute, Kona, 1987.

Colin W., 1987, Arctic snowdrifting manual, Proceedings of Snow Control Institute, Kona, 1987.

Delpech P., Palier P. and J. Gandemer, 1996. Etude de dispositifs de contrôle des accumulations de neige autour de la station antarctique Concordia, Service aérodynamique et Environnement Climatique du CSTB, EN-SC 96-51 C, 1996.

Duynin A.K. and V.M. Kotlyakov, 1980. Redistribution of snow in mountains under the effect of heavy snowstorms, Cold Regions Science and Technology, n° 3, 1980, 287-294.

Durand Y., G. Guyomarc'h & L. Mérindol., 2001. Numerical Experiments of Wind Transport over a Mountainous Instrumented Site : I (Regional scale), Annals of Glaciology, 32, 187-195

Farizi B., 2013. Traitement des corniches par hélicoptère Cornice control by helicopter, Proceedings of the International Snow Science Workshop Grenoble- Chamonix, Oct 2013, 845-847.

Föhn P. and R. Meister, 1983. Distribution of snow drifts on ridge slopes: measurements and theoretical approximations, Annals of Glaciology, 4, 52–57.

Gray D.M., Male D.H., 2004. Handbook of snow : Principles, processes, management and use, 776 p.

Goetz, D., 2010. Rappels de nivologie. Université Européenne d'été Avalanches : du risque à la gestion de crise. <http://www.obs.ujf-grenoble.fr/risknat/pages/universites/UEE2010/modules/UEE2010-Module2.pdf>

Guyomarc'h, G., Merindol, L., 1995, Proteon – vers une prévision locale du transport de la neige par le vent, in : Symposium International ANENA, Cemagref Éditions, 97-102.

Guyomarc'h G. and L. Merindol - 1998. Validation of a forecasting application of blowing snow periods, Annals of Glaciology, 26, 138-143, 23

- Guyomarc'h G., Durand Y., Giraud G. and F. Naaim-Bouvet, 2013. Intégration d'un schéma de transport de neige par le vent dans la chaîne opérationnelle française de prévision du risque d'avalanches. Integration of a drifting snow scheme in the French operational modeling for avalanche risk forecasting: validation over 10 years. Proceedings of the International Snow Science Workshop Grenoble- Chamonix, Oct 2013, 92-98.
- Guyot G., 1986. Brise-vent et rideaux abris avec référence particulière aux zones sèches, Cahier FAO 15.
- Hobbs, P. V .. Mason, B. J. 1964. The sintering and adhesion of ice. Philosophical Magazine. Eighth Ser .. Vol. 9, No.98, 181-97.
- Hopf, J., Bernard, J., 1963. Wind control structures in avalanche defence and prevention. News of the advance federal test centre , Mariabrunn, Vienna No. 60. National Research Council of Canada, Technical translation 1348, 7– 8.
- Jaedicke, C., Naaim-Bouvet, F. and M. Granig, 2004. Wind-tunnel study of snowdrift around avalanche defense structures, Annals of Glaciology, 38, 325-330.
- Kobayashi D., Ishikawa N. and F. Nishio F., 1988. Formation process and direction distribution of snow cornices, Cold Regions Science and technology, 15, 131-136.
- Mac Clung D. and P. Schaerer, 1993. The Avalanche Handbook. The Mountaineers, 272 p.
- Magono, C. and Lee C.W., 1966, Meteorological Classification of Natural Snow Crystals, Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, 1966.
- Margreth, S., Burkard, A., 2010. Paravalanches et barrières à neige. Université Européenne d'été Avalanches : du risque à la gestion de crise.
<http://www.obs.ujf-grenoble.fr/risknat/pages/universites/UEE2010/modules/UEE2010-Module8.pdf>
- Margreth S., 2010, Proposition of avalanche defence measures for the ski resort Rosa Khutor, Ski resort development company « Rosa Khutor »,SLF Expert report. Davos, 76p.
- Mases, M., 1997. Analyse et modélisation de la répartition spatiale de la neige transportée par le vent sur des sites d'avalanches et sur des domaines skiabiles. Application aux sites du Stillberg (Alpes suisses) et de La Molina (Pyrénées catalanes). Doctorat spécialité Géophysique Géochimie Géomécanique, Université Joseph Fourier Grenoble I. 173 p.
- Mason B., iThe Physics of Clouds (Oxford University Press, 1971)
- McClung D. M. and P. A. Schaerer, 1993: The Avalanche Handbook, The Mountaineers. 272 p
- MEDD-DPPR / CEBTP Lyon / Cemagref Grenoble, 2004. Protection contre les risques naturels. Ancrages passifs en montagne : conception, réalisation, contrôle. Guide technique.
- Mellor M. and F. Fellers, 1986. Concentration and flux of wind blown snow, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 86-11.
- Michaux J.L, Naaim-Bouvet F., and M. Naaim, 2001. Drifting-snow studies over an instrumented mountainous site : II. Measurements and numerical model at small scale. Annals of Glaciology, 32, 175-181.
- Montagne J., McPartland J.T., Super A.B. and H.W. Townes H.W., 1968. The nature and control of snow cornices on the bridger range southwestern Montana, US department of Agriculture, Forest Service Wasatch National Forest Alta Avalanche Study Center, Miscellaneous Report No. 14.

Naaim-Bouvet F., Brugnot G., 1992, Transport de neige par le vent : connaissances de base et recommandations, Cemagref, 1992, ISBN 2-85362-312-2.

Naaim-Bouvet F., 1994. Comparison of requirements for modeling snowdrift in the case of outdoor and wind-tunnel experiments, *Surveys in Geophysics*, n°16, 1994, p. 711-727.

Naaim-Bouvet F., 1997. Contribution à la modélisation physique et numérique du transport de neige par le vent, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble.

Naaim M., Naaim-Bouvet F. and H. Martinez, 1998. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models. *Annals of glaciology*, 26, 191-196.

Naaim-Bouvet F., Naaim M., 2000. Transport de la neige par le vent : Connaissances de base et recommandations», dans *La Neige : Recherche et Réglementation*, Presses des Ponts et Chaussées/ Cemagref Editions, 65-151.

Naaim-Bouvet F., Naaim M. and J-L. Michaux, 2002. Snow fences on slopes at high wind speed: physical modelling in the CSTB cold wind tunnel, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3/4, 137–145.

Naaim-Bouvet F., 2003, Approcha macro-structurelle des écoulements bi-phasiques turbulents de neige et de leur interaction avec des obstacles, Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université Joseph Fourier, 152 p.

Naaim-Bouvet F., Monier S. and S. Ougier, 2010. Haies et boisements pare-congères : de la théorie à la pratique, *Revue SET*, 2010, Numéro 02, (<http://www.set-revue.fr/haies-et-boisements-pare-congeres-de-la-theorie-la-pratique>)

Naaim-Bouvet F., Bellot, H. and M. Naaim, 2010. Back analysis of drifting-snow measurements over an instrumented mountainous site. *Annals of Glaciology*, 51(54), 207-217.

Naaim-Bouvet F., Guyomarc'h G., Naaim M., Durand Y., Bellot H. and P. Pugliese, 2011. Transport de la neige sur un site de haute montagne : de la modélisation à l'observation, de l'observation à la modélisation, SHF « Eaux en montagne, Lyon, 16 et 17 mars 2011.

NF P95-305 Décembre 1992, Équipements de protection contre les avalanches – Barrière à neige – Spécifications de conception.

NF EN 1991-1-4 Novembre 2005 Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions générales – Actions du vent (Indice de classement : P06-114-1)

Nordling, M., 1864, Sur les moyens de prévenir les amoncellements de neige sur les chemins de fer, *Annales des Ponts et Chaussées*.

Pomeroy J.W. and D.H. Male, 1992. Steady state suspension of snow, *Journal of Hydrology*, 136, p. 275-301.

Prokop A. , J. Pichler, 2011, A high resolution approach to define extreme spatial snow heights in avalanche release areas, *European Geophysical Union*, Vienna 2011.

Sato T and T. Kimura, 1993, Field test of a new Snow-particles-Counter (SPC) system. *Annals of Glaciology*, n° 18, p. 149-154

Seligman G., 1962. Snow structure and ski field. R.R. Clark, Ltd, Edinburgh (1962), p. 555

Sivardière F. and T. Castelle, 1992. Ouvrages à vent en montagne : inventaire et diagnostic en Valais, EPFL. (sous la forme de deux classeurs)

Schmidt R.A., 1980, Threshold wind-speeds and elastic impact in snow transport, *Journal of Glaciology*, 26, n°94, p. 453-467.

Tabler R., 1979. Visibility in blowing snow and applications in traffic operations". Proceedings of 2nd International Symposium on Snow Removal and Ice Control Research, Hanover, New Hampshire, May 15-19, 1978, National Academy of Science, Washington, D.C, 1979, 208-214.

Takeuchi M., 1980, Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport», *Journal of Glaciology*, 26, n° 94, p. 481-492.

Thiis, T., Delpéch, P., and deVirel Marc, D., 2004. The use of deflectors to remove snowdrifts around buildings, 5th Int. Conf. on Snow Engineering, Davos, Switzerland, 4-7 July 2004, 20 p.

Trouvilliez A., Naaim-Bouvet F., Bellot H., C. Genthon and H.Hubert, 2014. Evaluation of the first and second-generation FlowCaptTM on the aeolian transport of snow submitted to *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*.

Verge R.W. and G.P. Williams, 1981. Drift Control, D.M. Gray, D.H. Male (Eds.), *Handbook of Snow*. Chap. 16 (1981), p. 631–632

ANNEXE : LES PROTECTIONS VEGETALES

Dans le domaine routier (formation des congères sur les axes de communication), on note ces dernières années un infléchissement de la demande qui s'oriente vers une protection pare-congère végétale, notamment dans le cadre de nouveaux tracés où les aspects paysagers sont pris en compte. Dans un contexte haute-montagne et dans le cadre de la protection paravalanche, les arbres sont plus rarement utilisés mais ne sont néanmoins pas complètement absents (Cliché 108 et Cliché 109). Nous avons donc jugé utile de rappeler en annexe un certain nombre de points relatifs aux boisements pare-congères.

On peut différencier trois grandes catégories de boisements pare-congères :

1- La haie pare-congère (Figure 58). Le fonctionnement d'une haie brise vent est analogue à celui d'une barrière à neige et la neige est stockée sous le vent de la haie.

2- La plantation de masse en bord de route ou bande boisée (Cliché 119)

Dans ce cas, la neige est stockée au vent de la bande boisée.

3- La plantation en zone d'ablation (Cliché 120)

La **zone d'ablation** correspond aux surfaces dénudées où le vent se charge en neige. La mise en place de réseaux brise-vent ou de plantations diffuses sur cette zone d'ablation va permettre de limiter l'érosion et donc le transport de la neige par le vent.

LES HAIES PARE-CONGERES

La recherche dans ce domaine est relativement peu active et les résultats obtenus sur les barrières à neige sont bien souvent extrapolés aux haies pare-congères qui fonctionnent de manière analogue. Les effets aérodynamiques des végétaux ne dépendent plus uniquement de la hauteur, de la longueur et de la porosité, mais également de la section transversale, autrement dit de la tortuosité du parcours du vent à travers le végétal (De Parcevaux et Huber, 2007). Et il existe un couplage important entre le vent et les haies ou bandes boisées :

- le vent réoriente la direction des feuilles, changeant ainsi la porosité et la tortuosité ;
- et le mouvement même des plants sous l'effet du vent entraîne en réponse une modification de l'écoulement (De Langre, 2008).

La modélisation de l'interaction entre transport éolien de la neige et végétaux ne permet pas encore d'obtenir des résultats transférables à l'ingénierie. Les approches réalisées en soufflerie restent plus qualitatives que quantitatives (Naaïm-Bouvet et Brugnot, 1996) et la modélisation numérique n'a pas encore été testée sur de telles structures. La démarche reste donc essentiellement basée sur des résultats obtenus sur des sites expérimentaux avec une difficulté supplémentaire liée au temps nécessaire à la croissance des végétaux peu compatible avec les durées actuelles des projets de recherche.

Traditionnellement, des espèces à feuilles persistantes et denses (de type résineux) sont utilisées pour former des haies pare-congères (tout comme les premières barrières à neige étaient constituées de murs). Du fait de la similitude de fonctionnement aérodynamique entre barrières à neige et haies, des haies plus poreuses (feuilles caduques) ont été testées avec des gardes au sol (Naaïm-Bouvet et Mullenbach, 1998) (Figure 58). Il s'agissait de vérifier si les caractéristiques optimales des barrières à neige (porosité comprise entre 40 et 60%, garde au sol de $0,2H$ avec H hauteur de la barrière) pouvaient aussi s'appliquer aux végétaux. Le dispositif expérimental fut installé sur un plateau au nord-ouest du col de Manse (à proximité de Gap dans les Hautes Alpes) et perpendiculairement au vent dominant. Il était constitué d'une haie de sorbiers des oiseleurs, d'une haie de mélèzes, d'une haie de picéas pungens sans garde au sol, d'une haie de picéas pungens avec garde au sol, d'une barrière à neige type "CEMAGREF" chacune ayant une longueur de 20 m.

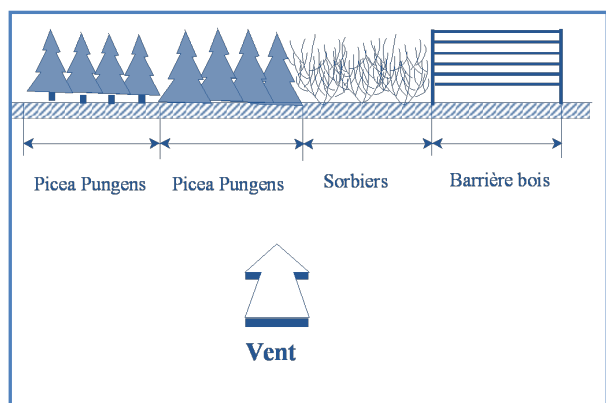


Figure 58. Dispositif pare-congère du Col de Manse



Cliché 117. Dispositif pare-congère du Col de Manse (F. Naaim/Irstea)

Bien que la porosité ne constitue pas le paramètre le plus approprié pour caractériser le dispositif, c'est le seul auquel nous puissions avoir accès dans le cas de la haie. La porosité moyenne de la haie de sorbiers, relativement homogène, était de l'ordre de 50%. Par contre, les épicéas présentaient une grande disparité entre la cime (porosité 60 à 80%) et la partie basse des arbres (porosité 20 à 30%).

Lors des premières années, les épisodes de transport de neige par le vent ont été peu nombreux et les résultats obtenus non significatifs. Seuls les résultats obtenus lors de l'hiver 1996 présentent un intérêt. Les arbres à feuilles caduques, tels les sorbiers, donnent de bons résultats puisque à la fin de la saison hivernale, la capacité de stockage de neige est d'environ 80% de celle de la barrière à neige témoin, considérée comme optimale. Certes, la capacité de stockage des épicéas pungens, proche de celle de la barrière à neige, est plus importante. Cependant, dans des zones de plaine où le transport de neige par le vent est actif, l'utilisation d'arbres à feuilles caduques comme dispositif pare-congères s'intègre mieux dans le paysage. Enfin, la garde au sol des épicéas de 50 cm, pourtant prometteuse, est insuffisante en raison du poids de la neige sur les branches basses : il est nécessaire d'en augmenter la hauteur. Ainsi, haies brise-vent et barrières à neige fonctionnent de donc façon identique (Figure 59).

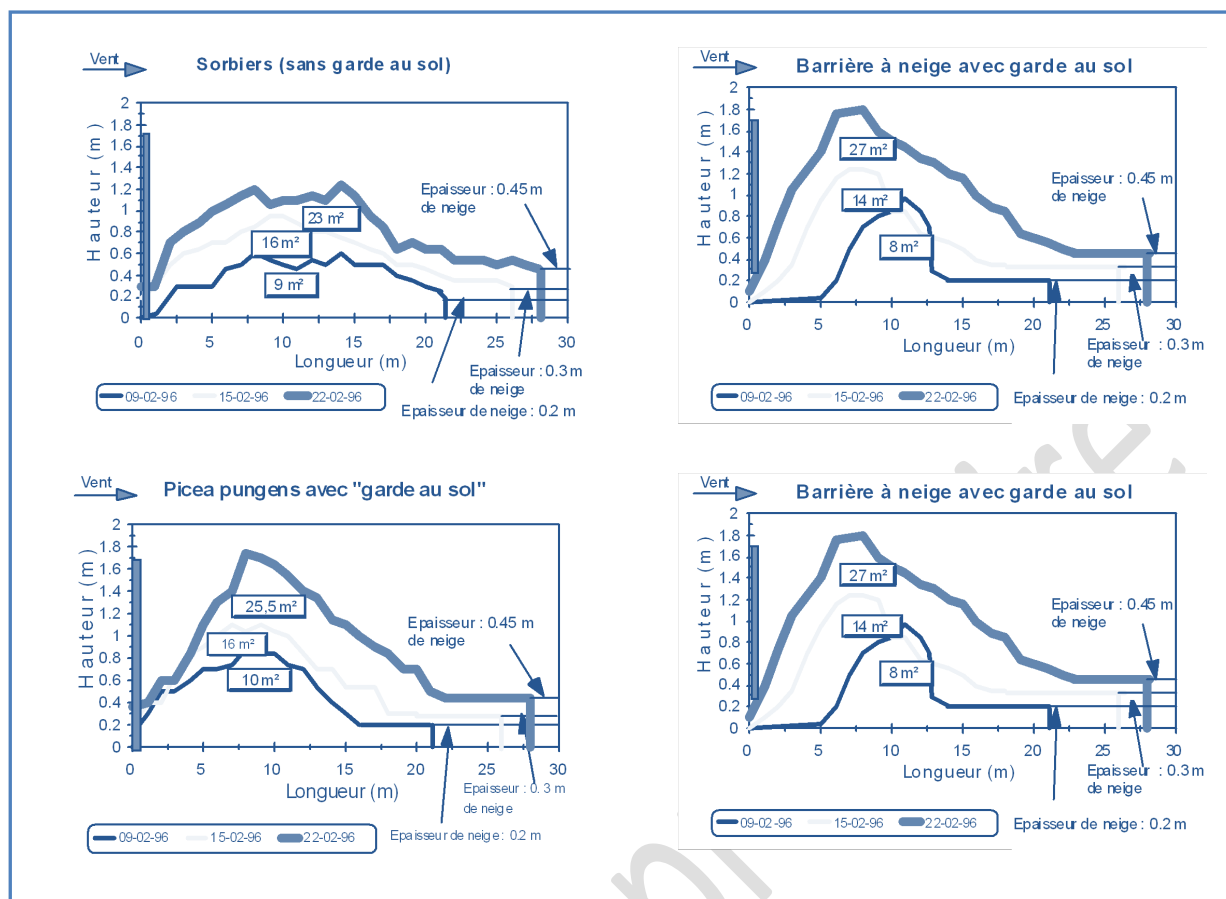


Figure 59. Comparaison du fonctionnement de différentes haies pare congères (Col de Manse)

Cependant, si les haies s'intègrent dans le paysage et cumulent d'autres avantages pour la faune et la flore, elles impliquent d'avoir la maîtrise foncière des zones sur lesquelles elles sont implantées (ou du moins elles requièrent un accord avec les propriétaires) et elles nécessitent un certain nombre d'années avant d'être efficaces (plants de 1.5 à 3 m de haut). D'autre part, le taux de reprise des plants peut être faible dans des zones ventées. Dans certains cas, on peut donc accompagner la plantation de la mise en place de barrières à neige. D'une part, la barrière favorise la reprise des plants et, d'autre part, elle prend la place de la haie, dans son rôle de pare-congère en attendant que cette dernière atteigne une taille significative. Mais attention, les dépôts de neige générés sur les plants ne devront pas dépasser 1.5 m pour ne pas exercer une pression excessive sur les plants.

LES BANDES BOISEES

Les bandes boisées (Figure 60) peuvent également limiter la formation des congères en bloquant la neige au vent du peuplement. Elles sont caractérisées par des plantations larges et denses (au minimum cinq rangées de résineux ou dix rangées de feuillus). L'air s'engouffre dans le massif d'arbres et s'élimine progressivement par les cimes. Du côté sous le vent, la protection s'étend sur 20 à 30 fois la hauteur du peuplement. Il y a non seulement interception de la neige soufflée dans la bande boisée, mais aussi du brouillard et de la bruine, d'où un accroissement de visibilité particulièrement significatif, améliorant ainsi confort et sécurité de l'utilisateur. Cet accroissement de visibilité n'a jamais été quantifié précisément. Par ailleurs un tel dispositif est moins sensible à la direction du vent qu'une barrière ou qu'une haie : il est efficace pour un angle θ de quasiment 180° . Par contre, une bande boisée bordant une route peut favoriser la formation de verglas dangereux pour l'automobiliste.

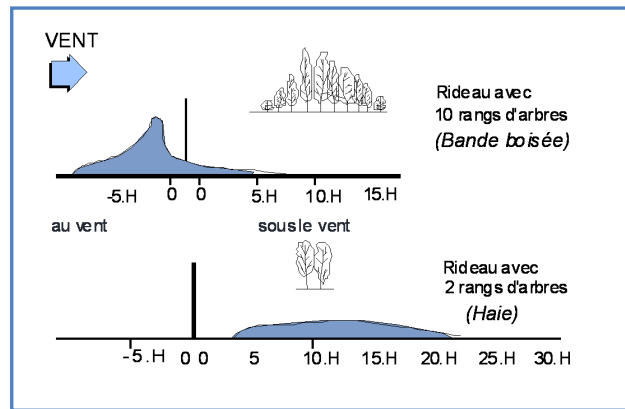


Figure 60. Profils d'accumulations de neige interceptée par des rideaux d'arbres défoliés (d'après Woodruff)



Cliché 118. Verglas persistant à cause de l'ombre portée d'une bande boisée (F. Naaim/Irstea)



Cliché 119. Illustration de l'effet d'une bande boisée (en premier plan on distingue une congère correspondant à la zone non protégée par la bande boisée (F. Naaim/Irstea)

L'avantage de la bande boisée est sa grande efficacité sur les congères tout en améliorant la visibilité. En contrepartie, ce dispositif implique d'avoir la maîtrise foncière des zones sur lesquelles il est implanté et nécessite de nombreuses années avant d'être efficace (plants de 4 à 5 m de haut). Des bandes boisées plantées à proximité de la route, auront tendance les premières années à générer des congères sur la chaussée, les plants de petite taille se comportant comme des haies pare-congères. On peut envisager de palier ce manque d'efficacité par la mise en place de barrières pare-neige.

LA PLANTATION EN ZONE D'ABLATION

La mise en place de réseaux de brise-vent ou de plantations diffuses dans la zone d'ablation entraîne une modification de l'écoulement du vent à l'échelle régionale (*cas des réseaux de brise-vent parallèles dans la basse vallée du Rhône*). La force de frottement exercée par le vent au niveau du sol est plus faible dans le cas d'une zone pourvue de haies ou de plantations diffuses que dans le cas d'une zone dénudée. De ce fait la quantité de neige transportée est plus faible voir inexistante. Etant donné les surfaces à traiter, cette solution technique est peu ou pas utilisée (Cliché 120).



Cliché 120. Exemple de plantations en zone d'ablation

LE CHOIX DES ESSENCES ET L'ENTRETIEN

LA POROSITE

Les essences retenues doivent répondre à 4 critères :

- porosité hivernale intéressante pour une bonne efficacité pare-congères,
- adaptation aux conditions de sols, de climat et de plein ensoleillement,
- diversification pour une meilleure résistance au vent et aux tempêtes,
- intégration au paysage.

Il est intéressant d'identifier les essences adaptées au site d'implantation en étudiant les plantations spontanées ou anthropiques menées à proximité des sites retenus. La porosité hivernale de différentes essences spontanées peut être mesurée grâce à un logiciel de traitement d'images (il en existe plusieurs en version libre) à partir de vues prises en hiver sur un couvert de neige (pour simplifier le traitement) (Cliché 121).



Cliché 121. Détermination de la porosité des différentes images par traitement d'images

DES PRECAUTIONS INDISPENSABLES A LA PLANTATION

Les plantations de haies et de bandes boisées requièrent des précautions liées au contexte du site. Tout d'abord, il faut exiger des plants d'origine locale, pour leur bonne adaptabilité. Les plants forestiers sont conseillés et sont à implanter en godets, au printemps pour les résineux. Le paillage est fortement recommandé dès que la pluviométrie est limitée car il permet de retenir la fraîcheur du sol. En altitude, le paillage sous forme de film plastique ou de bois déchiqueté est conseillé. Les films biodégradables ont été

testés mais ne sont pas assez pérennes en altitude où la croissance des plants est lente. Les plantations sont à réaliser selon les mêmes exigences que celles des haies champêtres (travail plus soigné qu'en plantation forestière) car les conditions de croissance des plants seront plus difficiles qu'en forêt. La clôture des plantations est indispensable s'il y a présence de bovins en estive l'été.

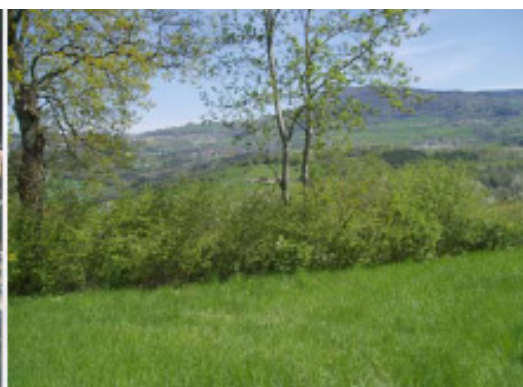
Après un ou deux ans de végétation, il faut regarnir les trouées et recéper les arbustes intermédiaires (sorbier des oiseaux, saule marsault, aubépine). L'objectif du recepage, qui consiste à rabattre les arbustes à 5-10 cm du sol, est de faire buissonner ces essences afin de diminuer leur porosité. Les haies devront également être taillées afin que la porosité soit maintenue homogène et les clôtures au droit des zones de pacages des troupeaux devront être surveillées.

UN ENTRETIEN LIMITE ET UNE GESTION ASSURANT LA PERENNITE DE L'EFFICACITE DU DISPOSITIF

A long terme, la haie devra être rabattue régulièrement à la hauteur de l'objectif. Dans le cas contraire, elle pourrait conduire à une suraccumulation de neige sur la chaussée. Pour les plantations à croissance libre (bandes boisées), il n'y a pas d'entretien annuel mais un suivi précis tous les 10 ans. Ainsi pour les feuillus en cas de moindre efficacité, un recepage est possible. Il consiste à couper au ras du sol les arbres et arbustes en fin d'hiver (Cliché 122). Ils rejettent alors vigoureusement de la base et reforment une touffe dense et bien garnie (Cliché 123). Quant aux résineux gérés en peuplement, ils se dégarnissent à la base s'ils sont trop en concurrence (la lumière doit arriver jusqu'à la base des arbres pour maintenir les branches basses en vie). Or, l'efficacité brise-vent des bandes boisées pare-congères dépend justement d'une bonne densité de branches basales et l'élagage naturel des branches basses doit impérativement être évité. Pour éviter cet élagage naturel, il est suggéré, en fonction de la croissance des plants, d'effectuer tous les 10-20 ans un dépressage par suppression d'un arbre sur deux, afin de maintenir la pénétration du soleil jusqu'au pied des arbres, garantie de viabilité des branches basses. Il est également conseillé d'anticiper le renouvellement de ces bandes résineuses en plantant des essences résineuses d'ombre (sapin pectiné) à la place des plants coupés. Ces jeunes plants constitueront un sous-étage qui prendra à terme la place des résineux implantés en premier. Cette gestion sylvicole est indispensable pour éviter le problème d'élagage naturel et le risque de perte d'efficacité totale des bandes boisées résineuses. C'est aujourd'hui le cas sur certaines bandes boisées résineuses mono spécifiques de l'Aubrac, qui au bout de 30 ans, se dégarnissent (Cliché 124) et ont été abîmées par la tempête de 1999. A défaut de protéger les voiries, elles créent mêmes des nuisances les hivers ventés (cliché 125).



Cliché 122. Recepage (source : Mission Haies Auvergne)



Cliché 123. Régénération dense de 2 ans (source : Mission Haies Auvergne)



Cliché 124. Bande boisée résineuse de l'Aubrac non entretenue avec pour conséquence un élagage naturel par concurrence des résineux sur 4 m de haut (source : Mission Haies Auvergne)



Cliché 125. Du fait de cet élagage, en cas de vent fort, la neige traverse le dispositif au ras du sol avec création d'une congère sur la voirie à protéger. (source : Mission Haies Auvergne)

Il faut donc prévoir dès l'implantation un accès possible aux engins d'entretien.

Cette gestion à long terme est rarement pratiquée et pourtant elle était préconisée dès 1864 : « Les bandes de quelques mètres d'épaisseur plantés sur la lisière des chemins de fer ne sont pas l'équivalent d'une forêt entière et exigent, pour être efficaces, quelques soins spéciaux. On sait que le sapin, en grandissant, perd ses branches inférieures et livre ainsi facilement passage au vent près du sol. Pour prévenir cet effet et obtenir une fermeture plus hermétique, il importe de multiplier les rangées de plants, de couper fréquemment la rangée extrême de façon à la maintenir à l'état de haie, de laisser grandir davantage la rangée suivante et ainsi de proche en proche ; » (Extraits de l'article de Nordling)