

MANQUE DE NEIGE SUR LES PISTES DE SKI

Carlo Maria Carmagnola

Météo-France - CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige
Consultant pour Dianeige/Abest
Moniteur de ski AMSAO-ESF

Ateliers Neige - 13/11/2026

LA PROBLEMATIQUE



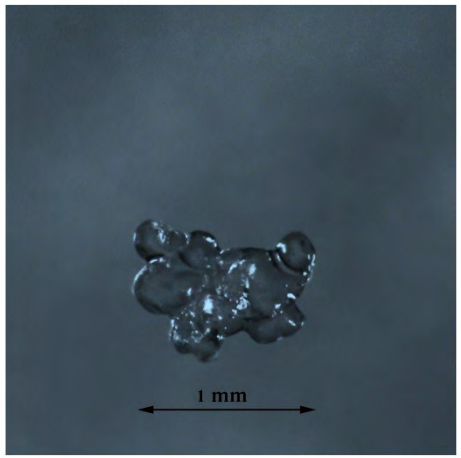


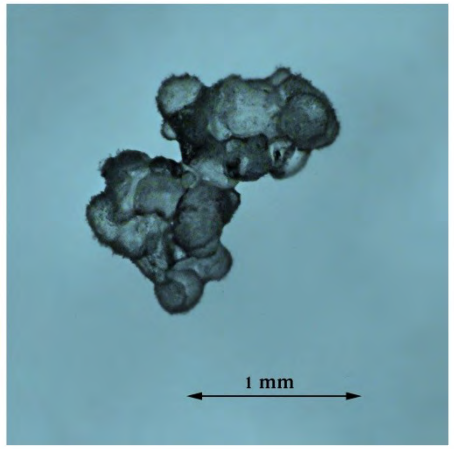
Snow design

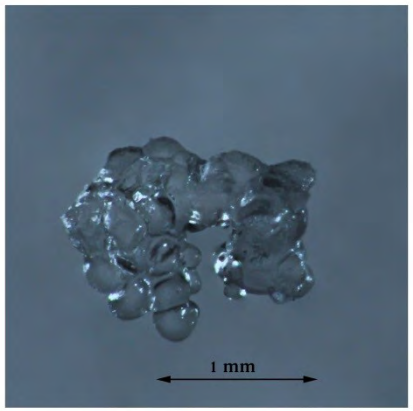


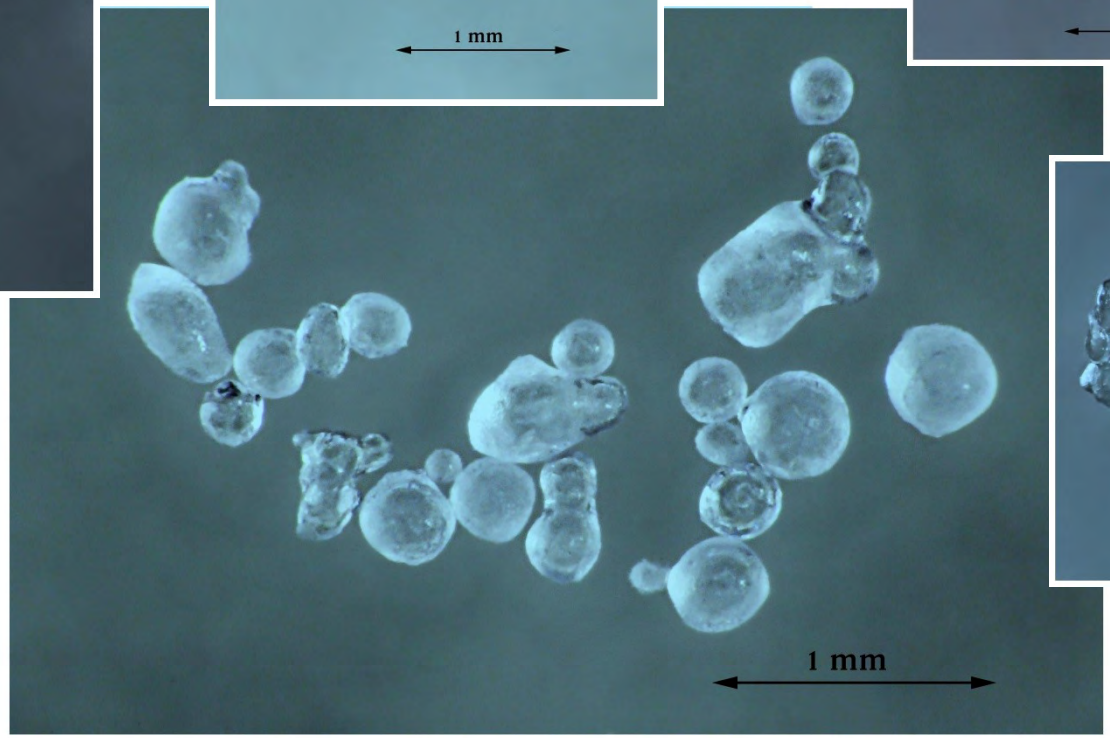
LA NEIGE DE CULTURE

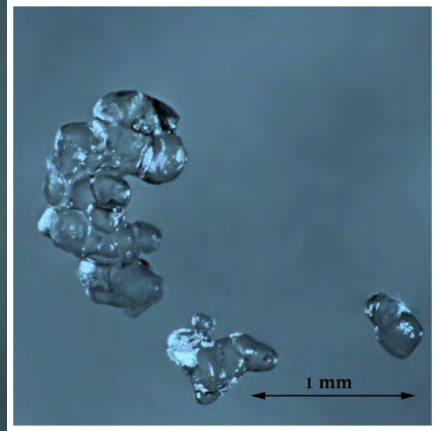
LA NEIGE DE CULTURE











Photos :
Météo-France

PROPRIETES DE LA NC



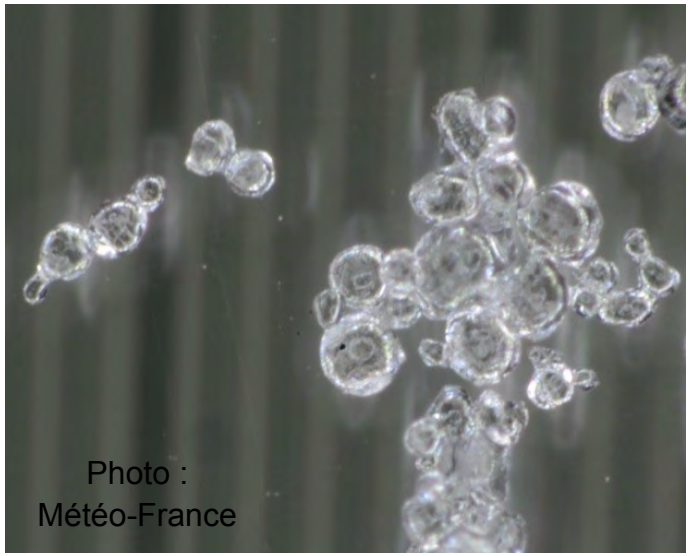






Neige de culture
= grains ronds de petite taille obtenus par congélation de gouttes d'eau

- Forme sphérique
- Taille : 0,2 à 0,4 mm
- Masse volumique : 300 à 500 kg/m^3
- Faible tassement
- Bonne résistance mécanique
- Forte albédo
- Métamorphisme de fonte



Les grains éclatent au cours du processus de congélation, car leur pression interne est très élevée

↓

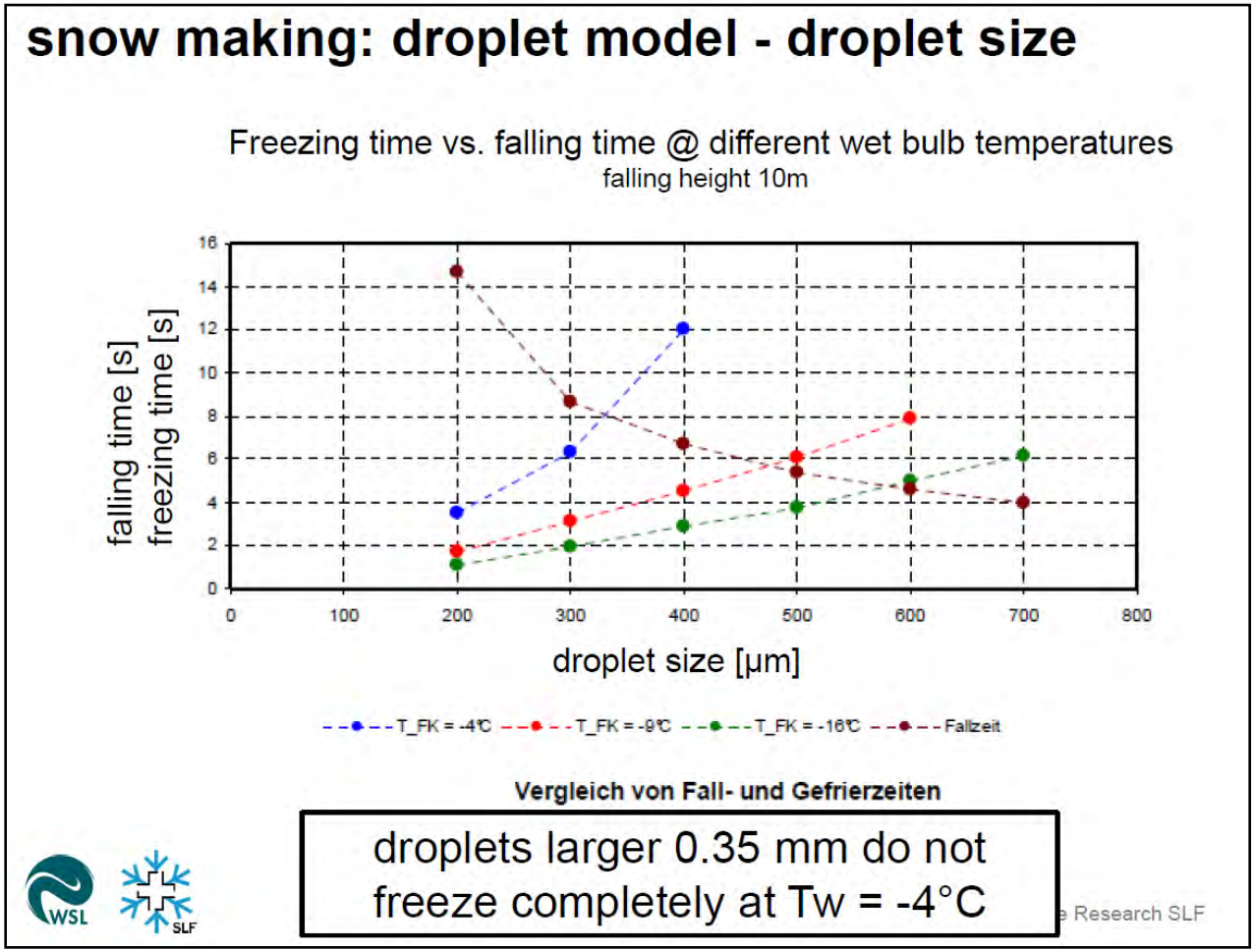
petits éclats à angles vifs

↓

neige **très abrasive**

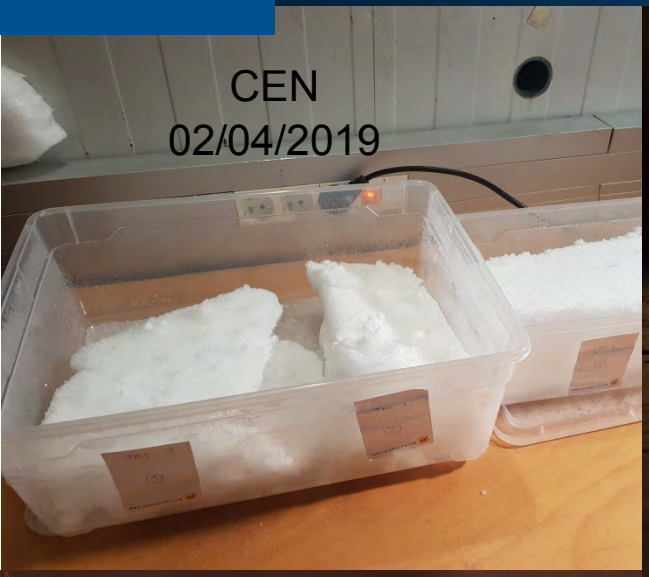
PROPRIETES DE LA NC

Propriétés du tas: taille des grains

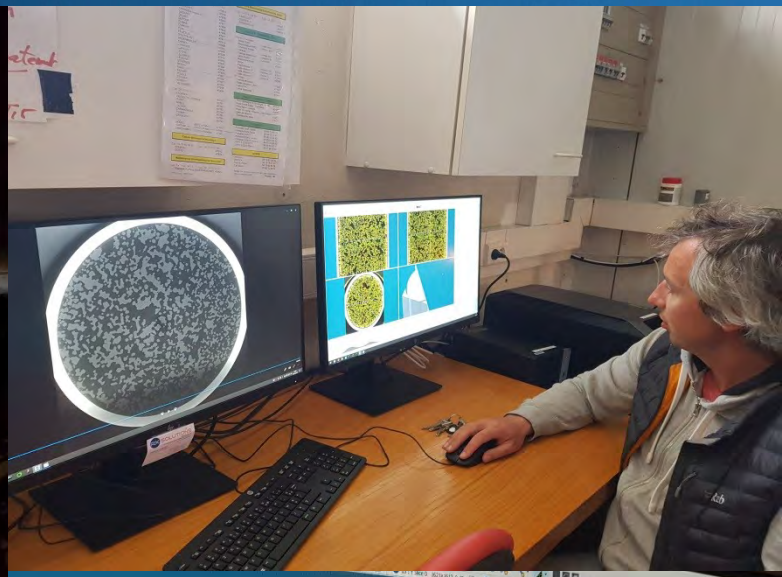


Wolfsperger, SLF

MICRO-CT - NEIGE DE CULTURE

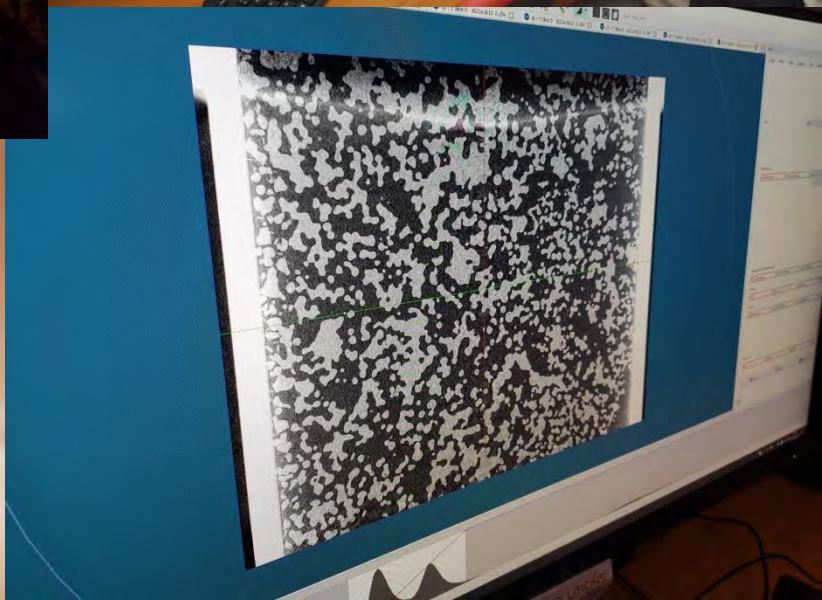




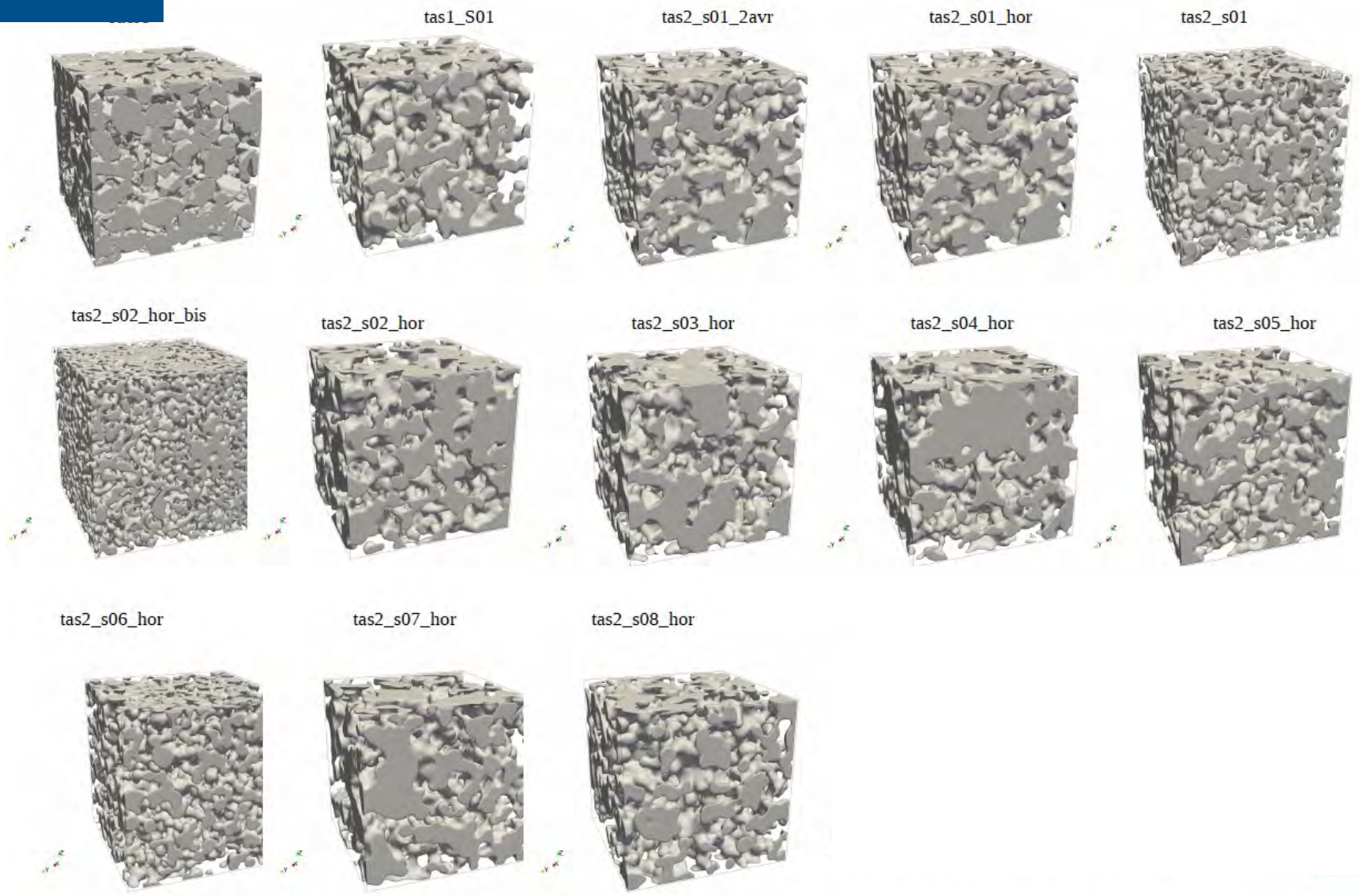




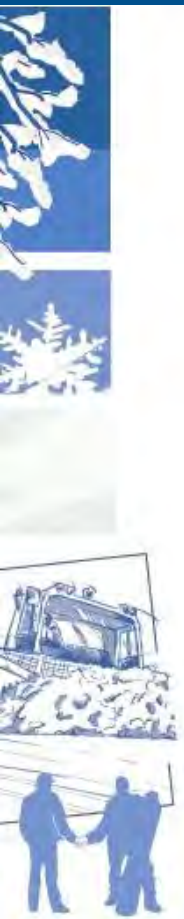




MICRO-CT - NEIGE DE CULTURE



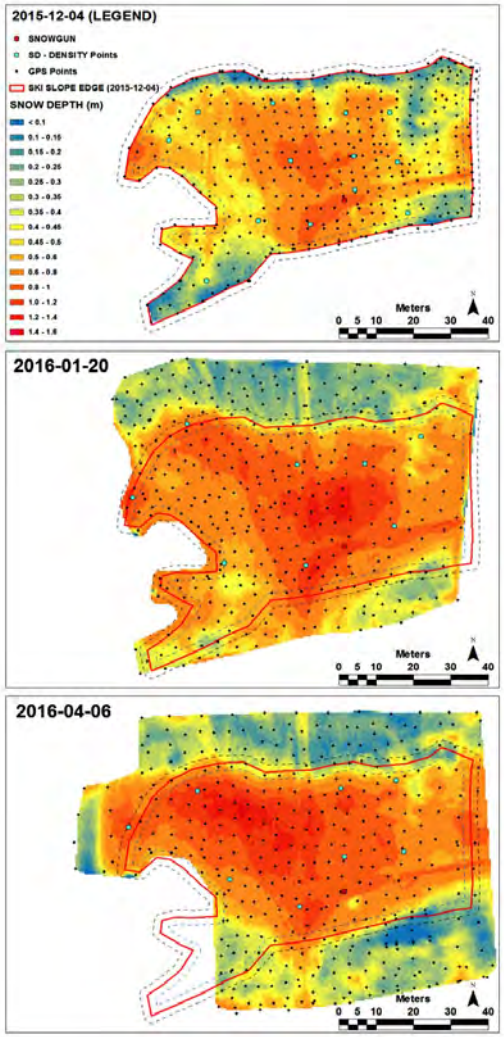
MICRO-CT - NEIGE DE CULTURE





Snow design

LES PERTES DES ENNEIGEURS



Spandre et al., 2016

1 m³ d'eau

=

2 m³ de neige ?

⇩

Mesure des volumes de neige d'un tas
et comparaison avec les volumes d'eau consommés

⇩

Pertes = 30-40% :

< 10% thermodynamiques
(évaporation, sublimation)

> 30% mécaniques
(vent, dépôt derrière l'enneigeur,
dépôt en dehors de la piste)

ADJUVANTS

Que de l'eau :

En France,
aucun produit chimique
(azote, Snowmax, etc.)



Le Snowmax :
Produit issu d'une protéine située dans la membrane d'une bactérie appelée Pseudomonas syringae. Cette bactérie présente naturellement dans la nature favorise la formation du gel.

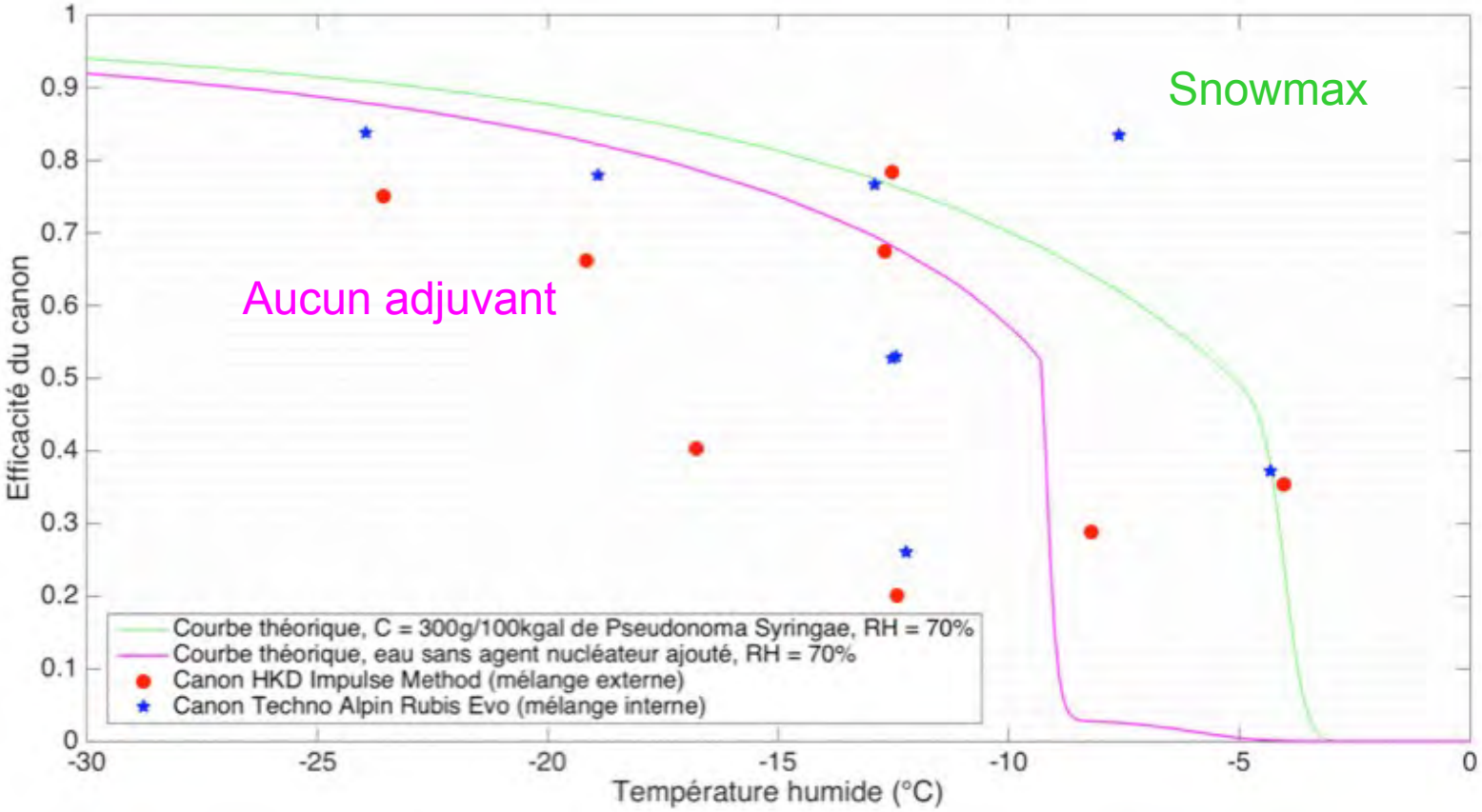
Produit utilisé en France jusqu'en 2006, dans certaines stations pour deux raisons :

- Production de neige en température marginale
- Augmentation des volumes de production

Depuis 2006, ce produit n'est plus utilisé en raison de son coût et de sa complexité de mise en place, ainsi que par principe de précaution (décision des stations de France).

ADJUVANTS

Efficacité = masse de neige produite / masse eau consommée



Snow design

SYSTEMES DE PRODUCTION

Ice Crushing Systems / Snowfactory

- Enneigement aux températures au-dessus de zéro
- Eau refroidie jusqu'au point de congélation, sans additifs chimiques
- Petites feuilles de glace, congelées à 100% (pas d'humidité résiduelle)
- Grâce au traitement par dameuse, l'on atteint une qualité de neige de type névé
- Distribution de la neige par bandes transporteuses ou ventilateurs







LA RESSOURCE EN EAU

D'où provient l'eau ?

A l'échelle d'un bassin versant :

- 60% de l'eau provient des retenues d'altitudes
- 25% provient de prise directe sur des ruisseaux
- 15% provient du trop plein de l'eau potable



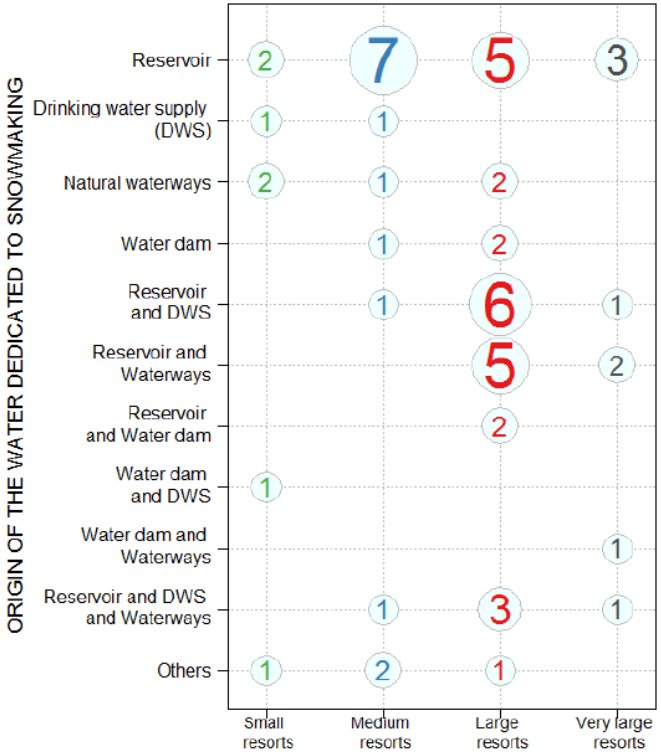
Prélèvement temporaire et non consommation :
Eau restituée entièrement à la nature au printemps (70-90% par infiltration d'eau liquide dans le sol, 10-30% par évaporation)

17 millions de m3

Eau propre entièrement restituée au milieu naturel

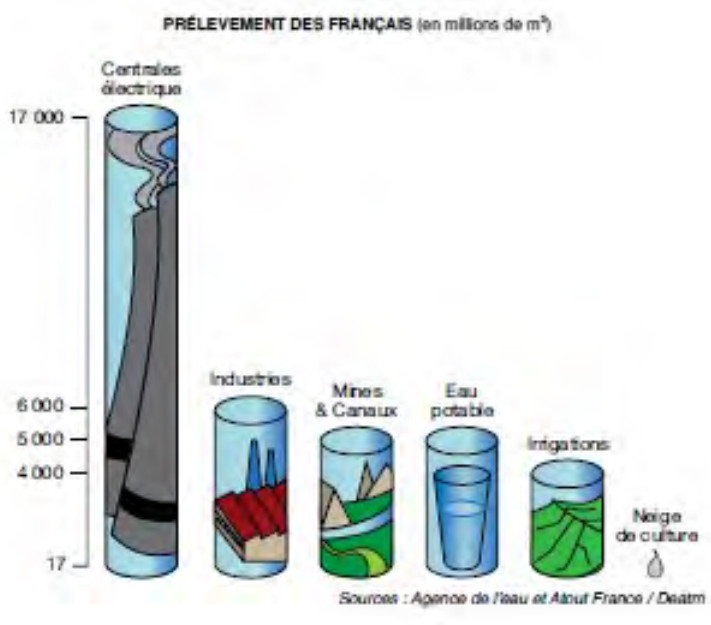
Pour fixer les idées :

- En France, l'eau des piscines privées représente 25-37 millions de m3
- La consommation en eau potable de Grenoble représente 20 millions de m3



LA RESSOURCE EN EAU

Il est nécessaire de bien relativiser les chiffres



L'Oisans

Les retenues de l'Alpe d'Huez - production de neige : 410 000 m3

Le barrage de Grand Maison - hydroélectricité : 137 000 000 m3

La Tarentaise

- Reçoit 2 000 000 000 de m3 de précip. annuelles
- EDF turbine 400 000 000 de m3
- La population consomme 20 000 000 de m3
- La neige de culture consomme 3 000 000 de m3

France

Parc de barrages EDF = plus de 7 milliards de m^3

15 à 20 millions de m^3 par an pour la neige de culture (l'équivalent de la consommation d'eau de Grenoble)



LE TRAVAIL DE LA NEIGE

METEO FRANCE

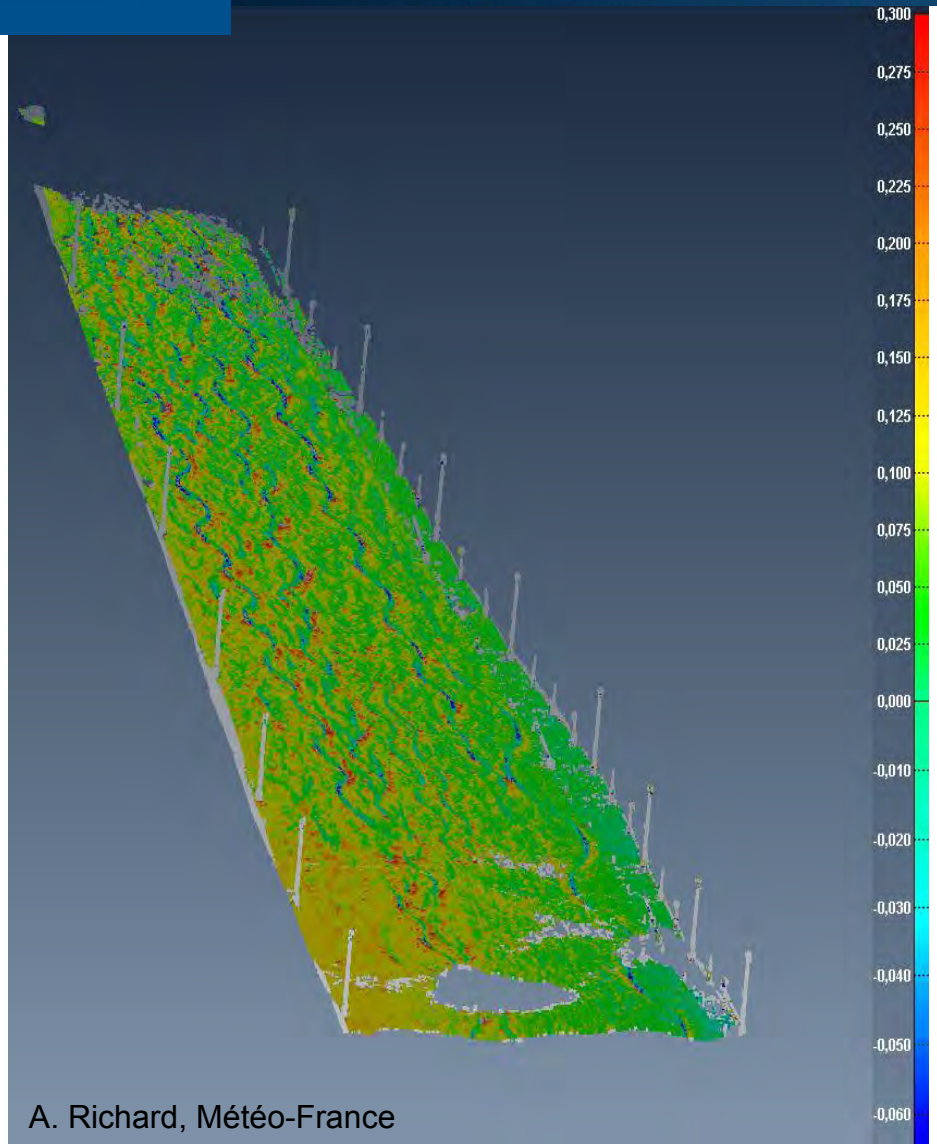
TRANSPORT

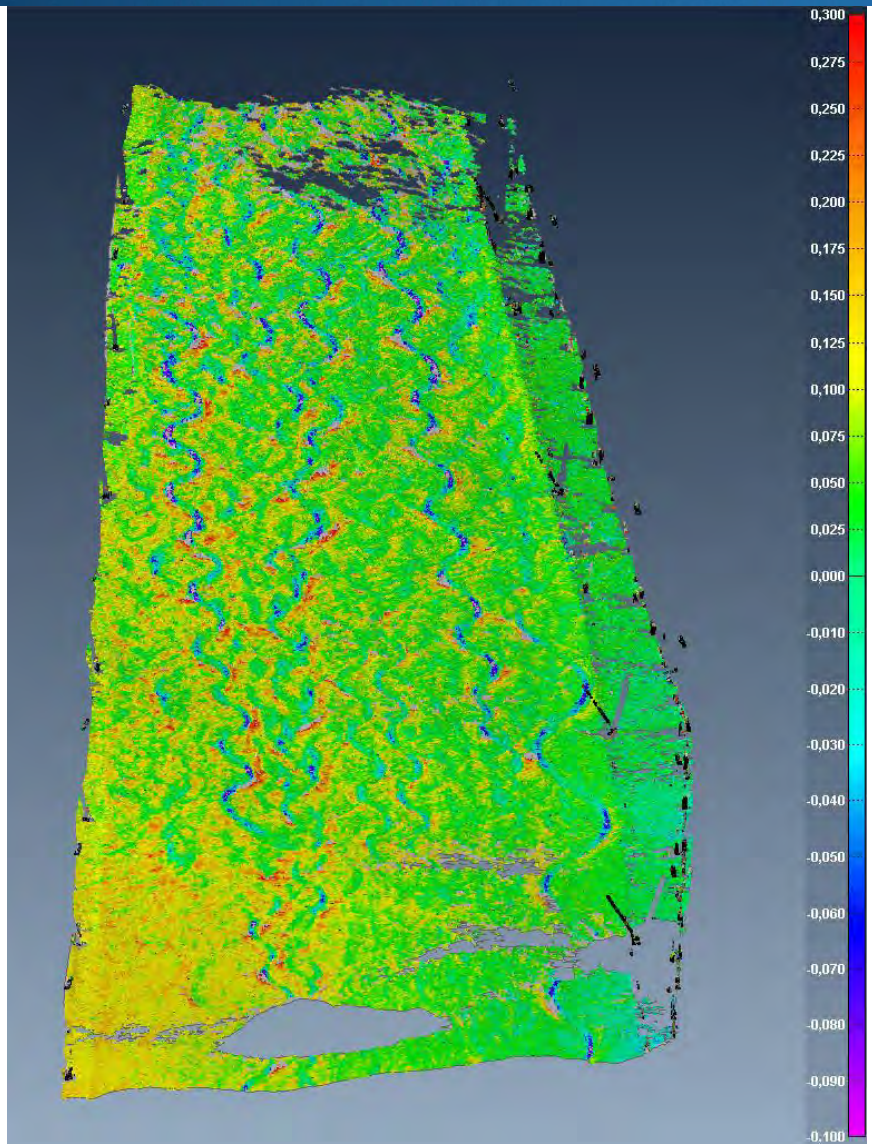


TRANSPORT



TRANSPORT

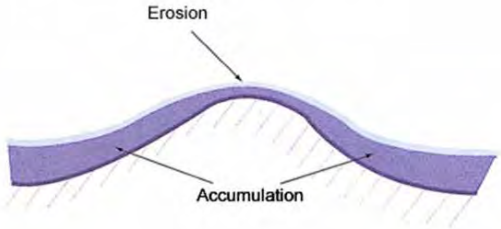


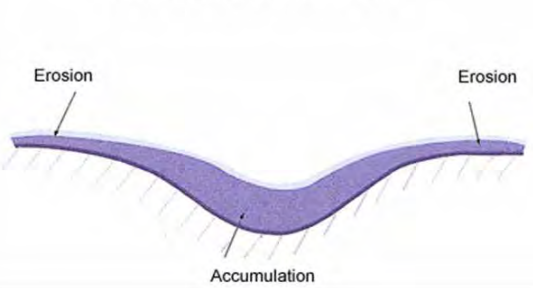


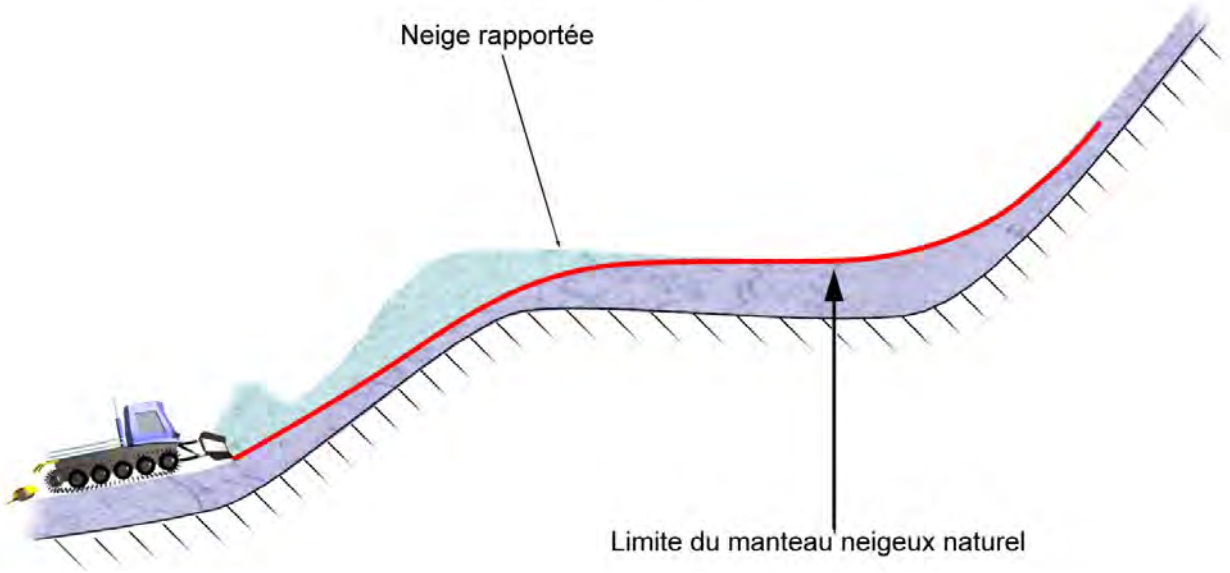
A. Richard, Météo-France

TRANSPORT

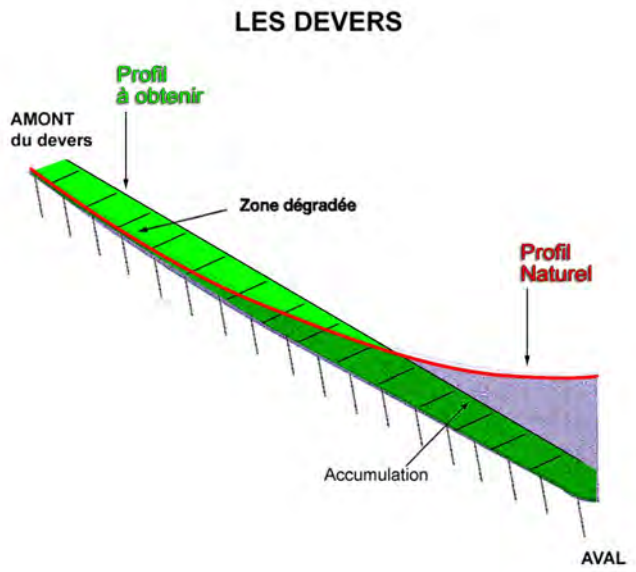
Modelage de manteau neigeux d'une piste
pour renforcer les zones sensibles

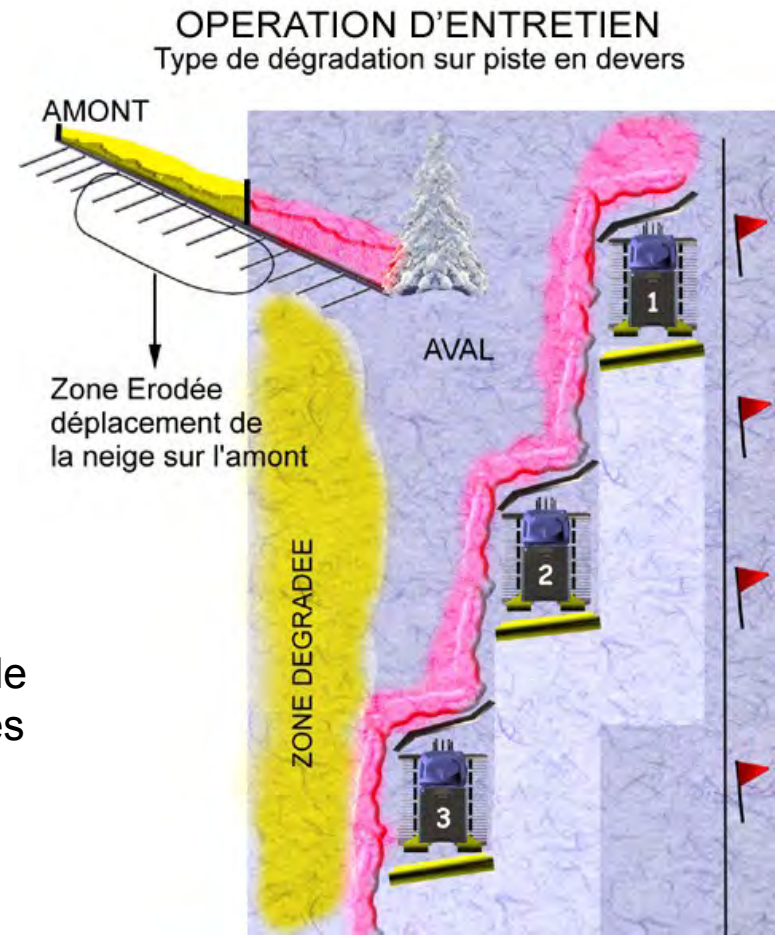






TRANSPORT





Piste à fort dévers : la neige s'accumule naturellement, et par l'intermédiaire des skieurs, sur la partie aval de celle-ci

Remonter la neige sur la partie sensible en amont du dévers

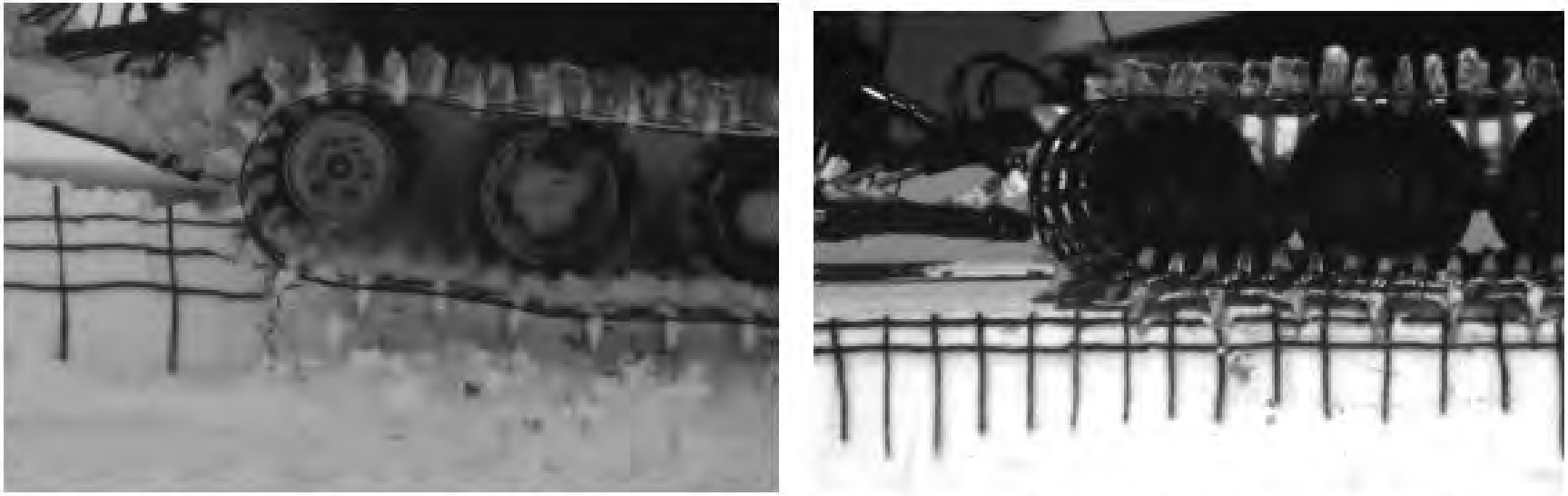
Snow design



COMPACTAGE

1) Modification de la **conductivité thermique**

La densification est efficace sur une faible épaisseur
(15 à 30 cm en neige fraiche, <10 cm en neige damée)

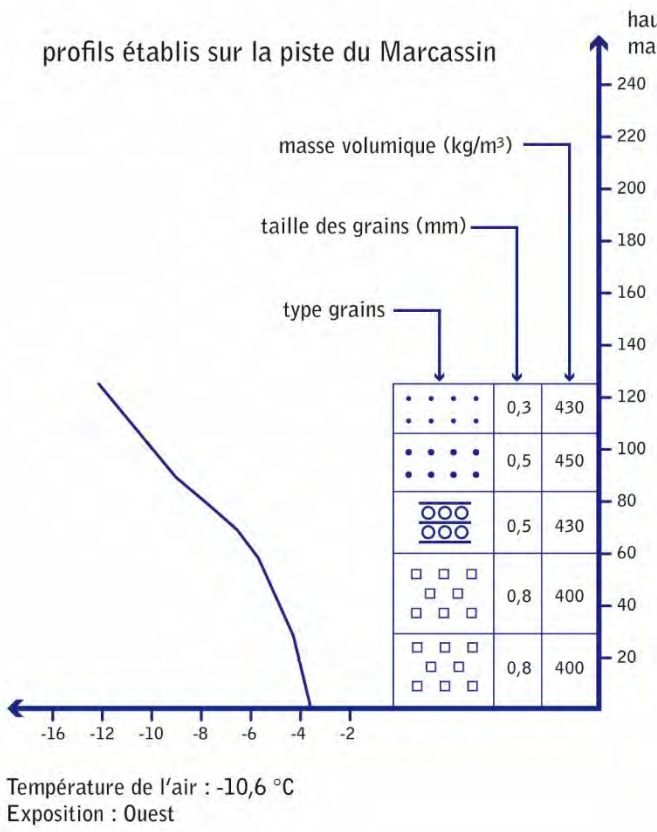


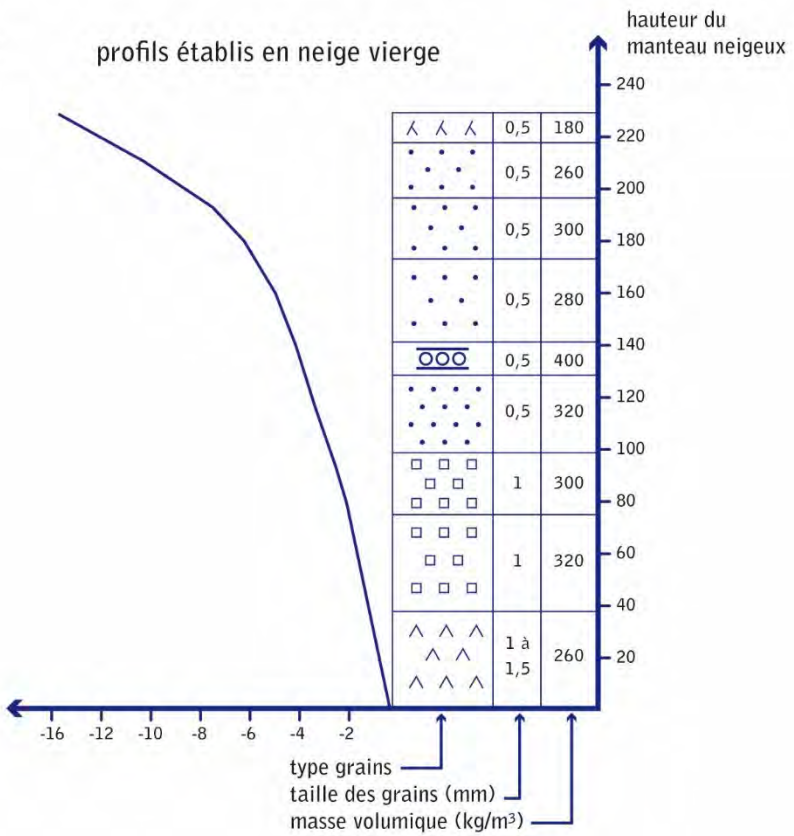
Penetration of a piste machine on new snow and after 3 preparation runs

Wolfsperger, SLF

COMPACTAGE

1) Modification de la **conductivité thermique**





Snow design

COMPACTAGE

1) Modification de la **conductivité thermique**

Taïga
•Végétation
•Faible compaction par le vent

Sol chaud

Tundra
•Pas de végétation
•Forte compaction par le vent

Sol froid - permafrost

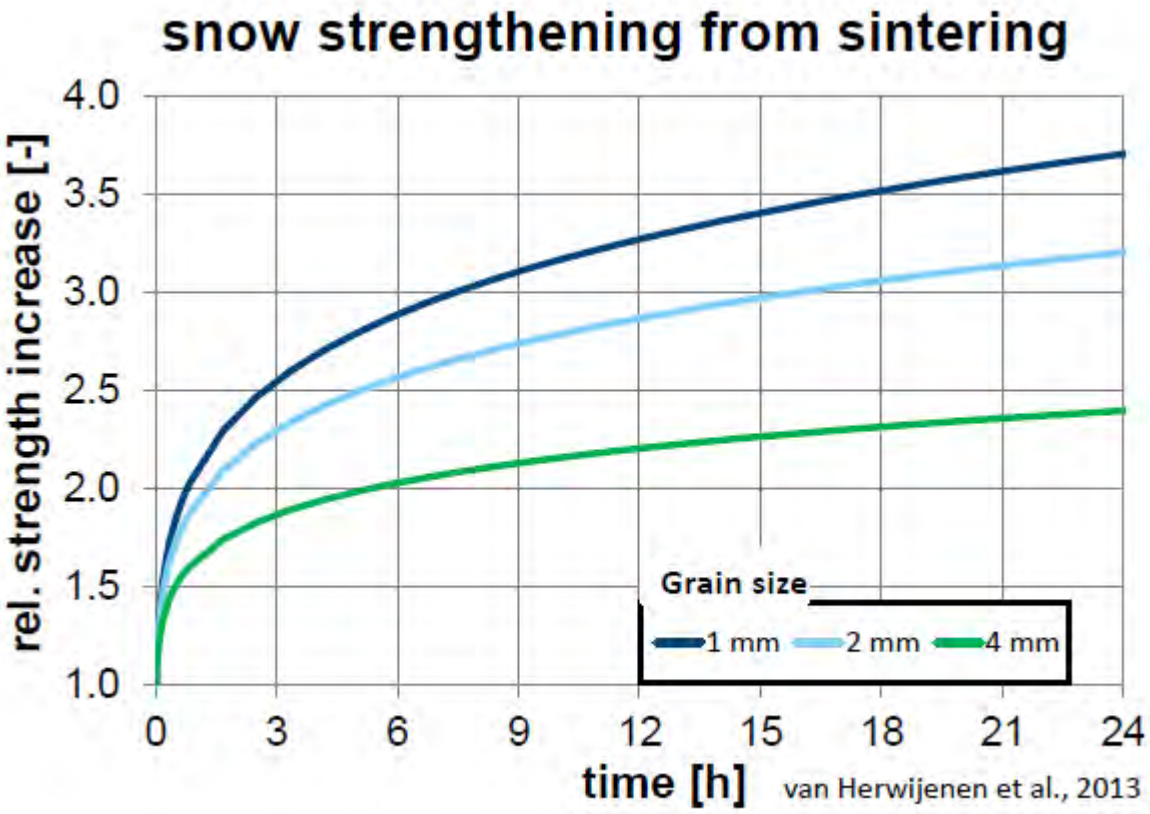




COMPACTAGE

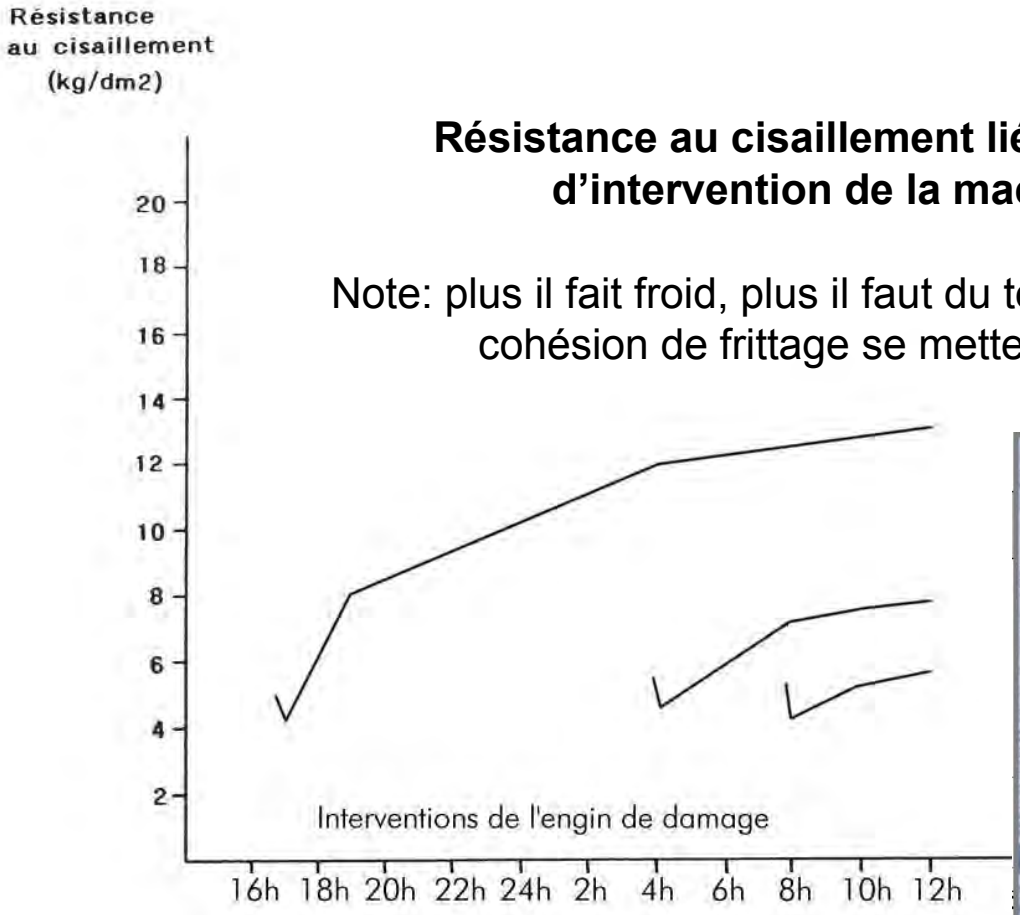
2) Evolution des **résistances mécaniques**

La résistance au cisaillement dépend de la taille et du type de grains



COMPACTAGE

2) Evolution des **résistances mécaniques**



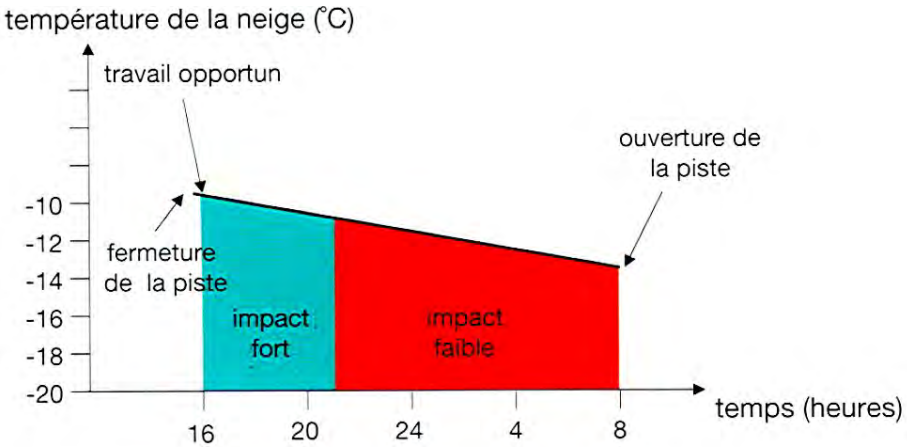
Résistance au cisaillement liée à l'heure d'intervention de la machine

Note: plus il fait froid, plus il faut du temps pour que la cohésion de frittage se mette en place

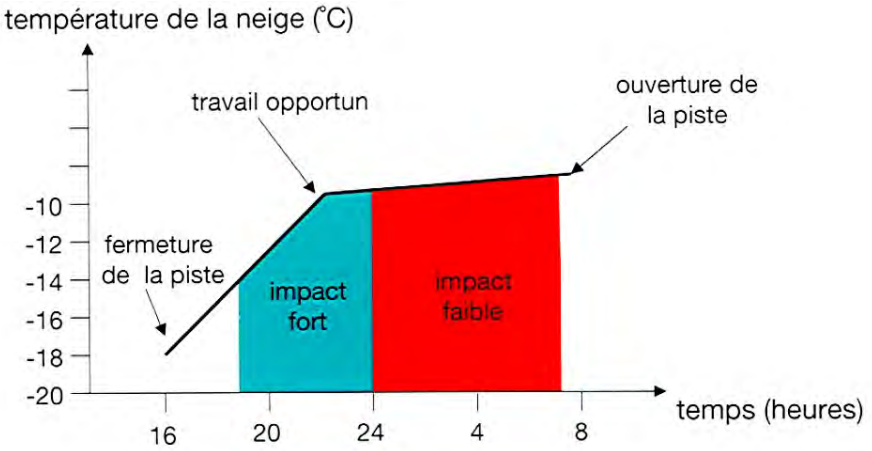


COMPACTAGE : heures de travail

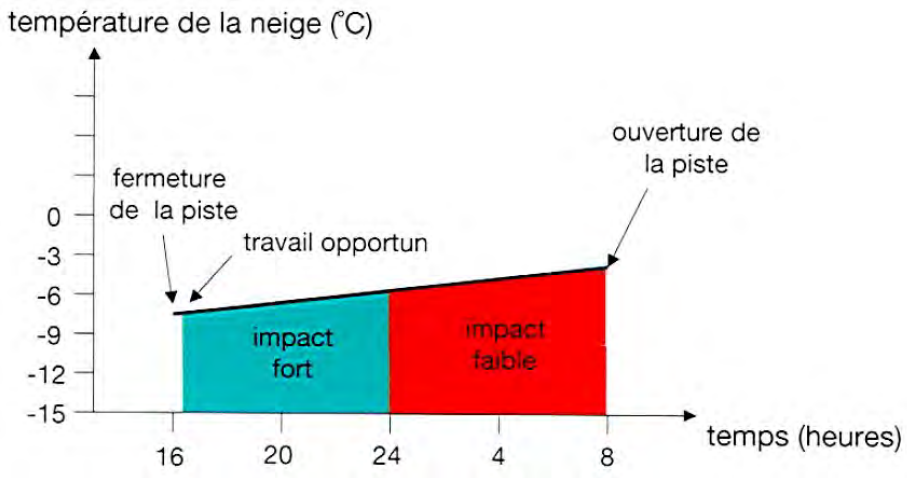
Neige sèche et froide, temps sec



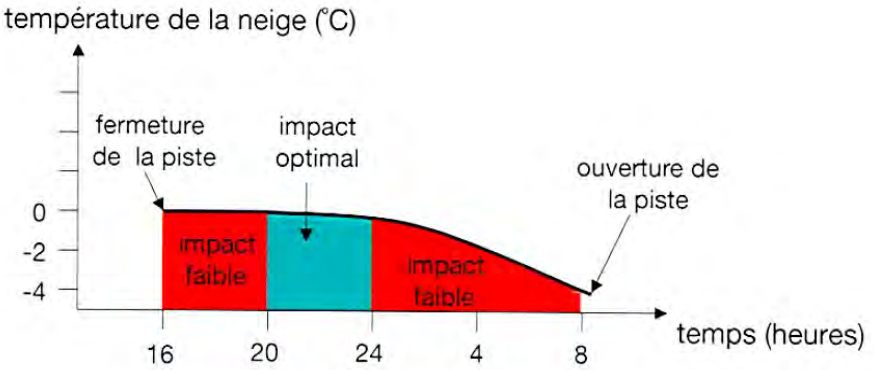
Neige sèche et très froide / T augmente le soir



Neige sèche / T augmente la nuit



Neige humide au printemps



Fauve, 2002

INJECTION D'EAU

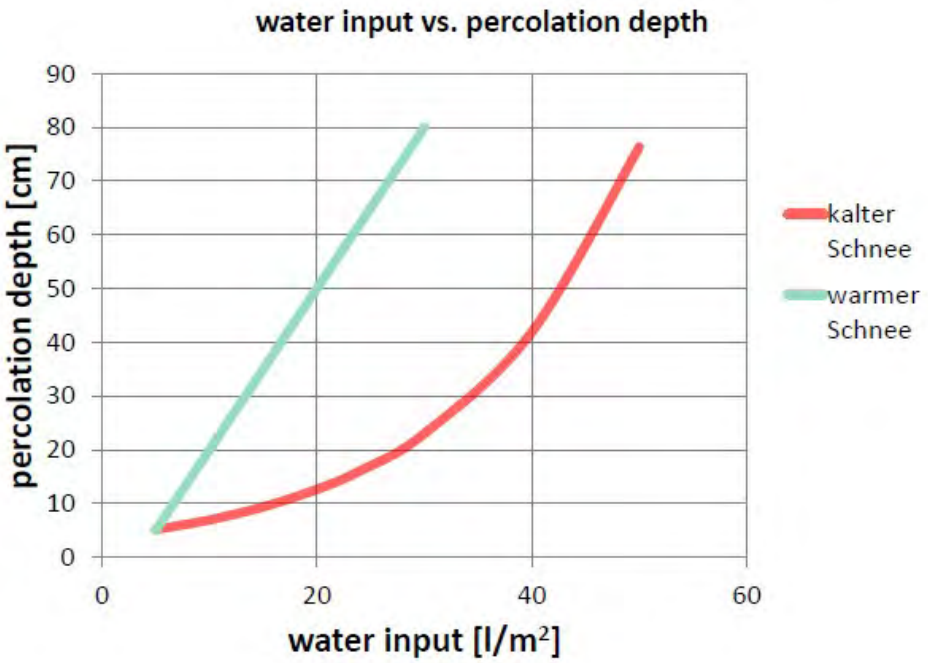
Préparation de pistes de compétition



Race piste watering using an on-board water injection system



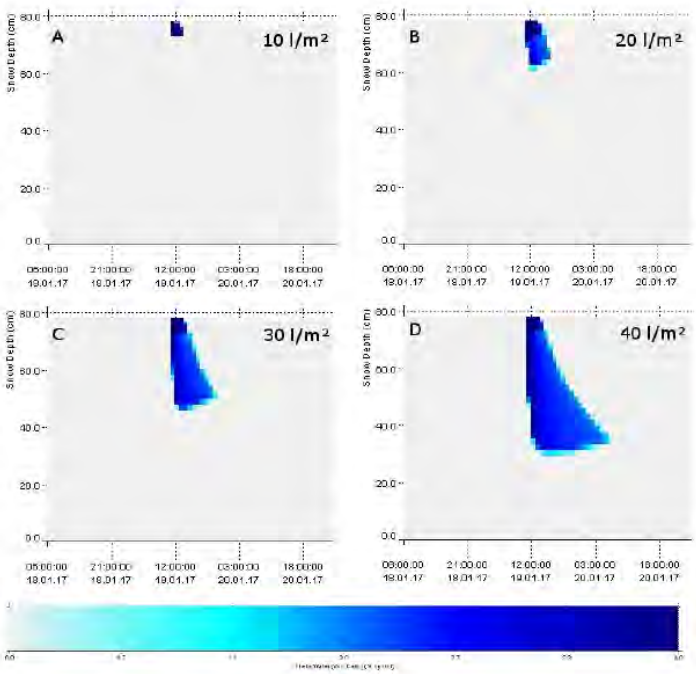
Watering experiments on snow of different grain sizes and densities

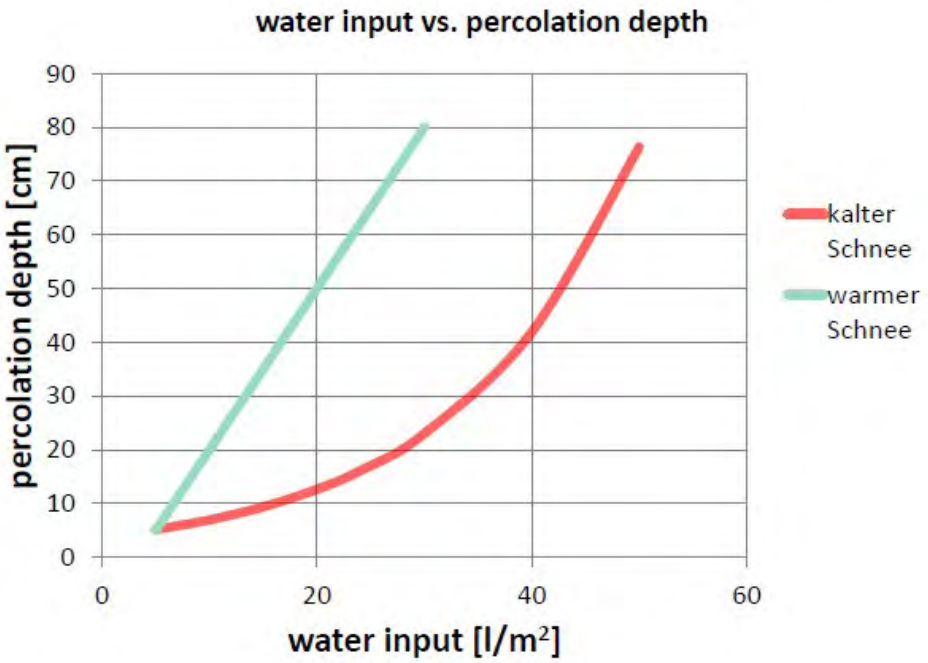


Wolfsperger, SLF

INJECTION D'EAU

Préparation de pistes de compétition





Wolfsperger, SLF



SNOW FARMING

METEO FRANCE

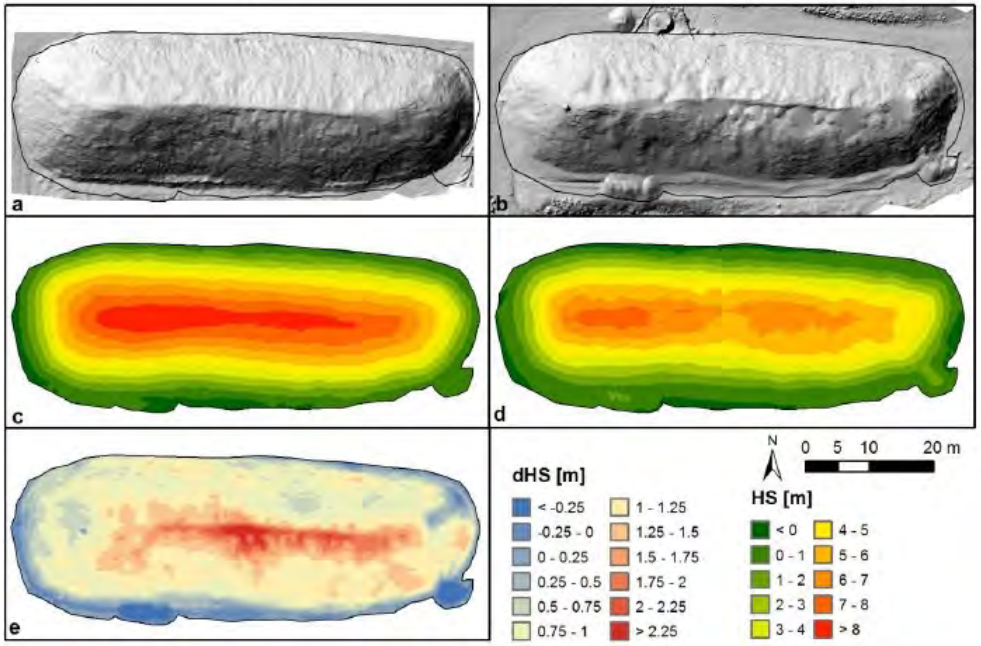
PRINCIPE



QUANTIFIER LES PERTES

Davos

6826 m³ 5307 m³

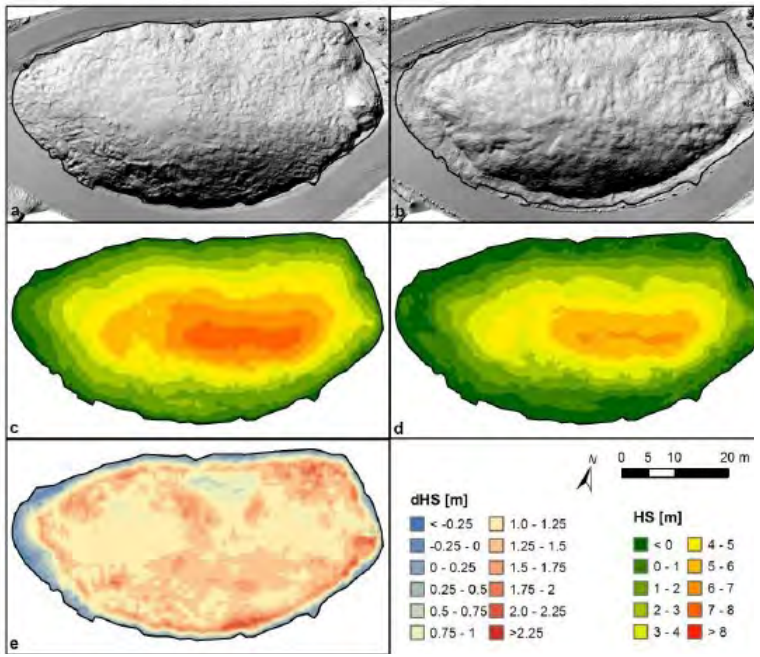


Rel. volume loss: 22.6 %

Rel. snow height loss at HS_{max} : 15.1 %

Valle di Martello

7138 m³ 4820 m³

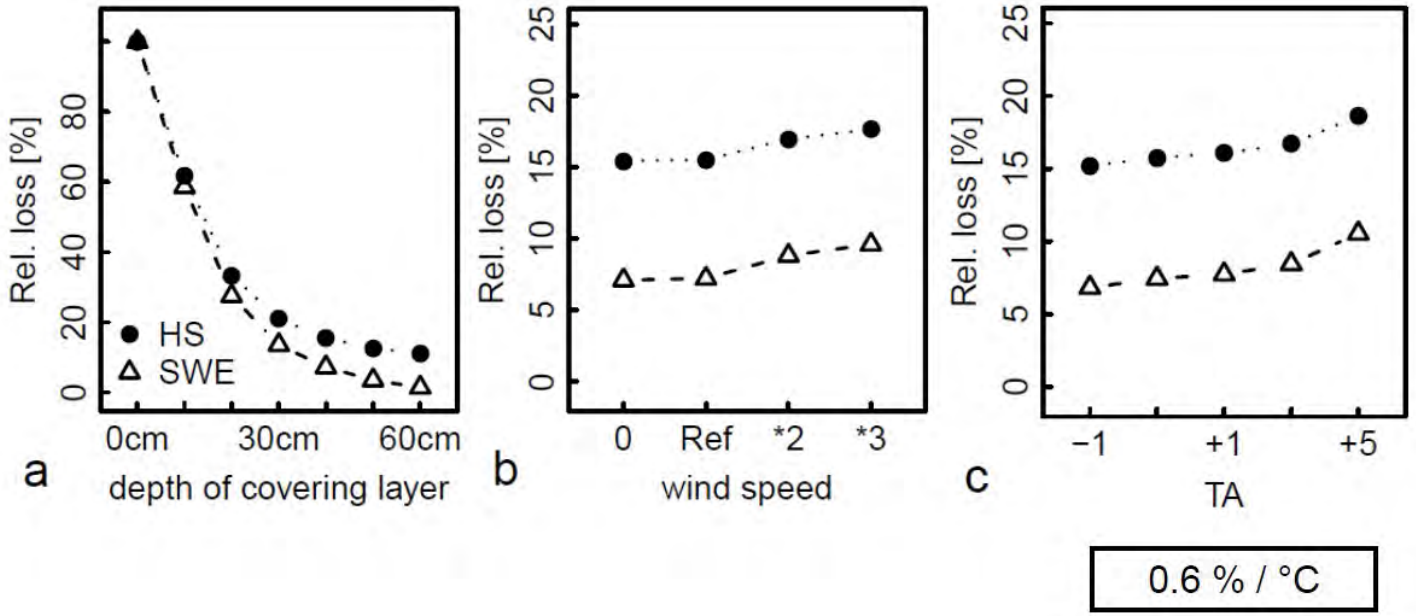


Rel. volume loss: 32.5 %

Rel. snow height loss at HS_{max} : 16.1 %

Grünewald et al., 2018

QUANTIFIER LES PERTES



- Epaisseur idéale = 40 cm
- Le vent augmente les pertes
- On perd 0,6% du volume par °C
- Faible effet de l'orientation, diminution de la fonte avec la pente
- 9% de densification pendant le stockage

Grünewald et al., 2018

METEO FRANCE

SKI DE FOND - NORVEGE

Cold Regions Science and Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/coldregions

Snow Storage in Nordic skiing: From physical drivers of snow loss to operational considerations

Sondre Bergtun Auganæs [a,*], Erik Melin Söderström [b], Fabian Wolfsperger [c]

[a] Department of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Høgskoleringen 7a, 7034 Trondheim, Norway
[b] Peak 63, Akademigatan 3, 831 31 Östersund, Sweden
[c] WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Flüelastrasse 11, 7260 Davos, Switzerland

ARTICLE INFO

Keywords:
Snow storage
Ski facility operations
Insulation materials
Nordic skiing
Winter sports sustainability
Snow management

ABSTRACT

Reliable snow conditions are essential for Nordic skiing, but climate warming and the year-to-year climatic variability make both, natural snowfall and artificial snow production, increasingly unfavourable. To address this challenge and meet the growing demand for dependable skiing, many Nordic ski facilities have adopted snow storage, in which snow is preserved over the summer by covering it with insulating materials such as sawdust.

This study presents data from 37 snow storages with sawdust or geotextile covers. For the first time, an empirical model was parametrized to predict the volume loss of a sawdust covered snow storage. The observed range of snow losses (11.5 % to 32.5 %) could be explained well ($R^2_{adj} = 0.88$) by the four influencing factors, cover thickness, total volume, surface area, and temperature. The findings indicated that besides applying adequate insultation covers, minimizing the surface-area-to-volume ratio and maximizing the storage volume, both effectively reduce snow loss. This means shaping the pile more like a hemisphere to reduce surface area and/or increasing its size.

Resource use and economic aspects of snow storage were examined to provide practical recommendations for improving efficiency and reducing costs. When combined with the snow loss analysis, the results indicate that sawdust layers thicker than 30 cm are not cost-effective, as the additional reduction in snow loss is too small to justify the higher material costs. The primary cost driver was snow transportation from storage to slopes and trails, highlighting the need for strategic storage placement within the slope and trail network to improve efficiency and reduce expenses. The findings offer practical recommendations for improving snow storage efficiency, reducing costs, and ensuring reliable early-season skiing. Ultimately, this study contributes to the sustainability of Nordic skiing, helping to secure consistent snow availability for both recreational and competitive skiing in a more resource-efficient way.

SKI DE FOND - NORVEGE

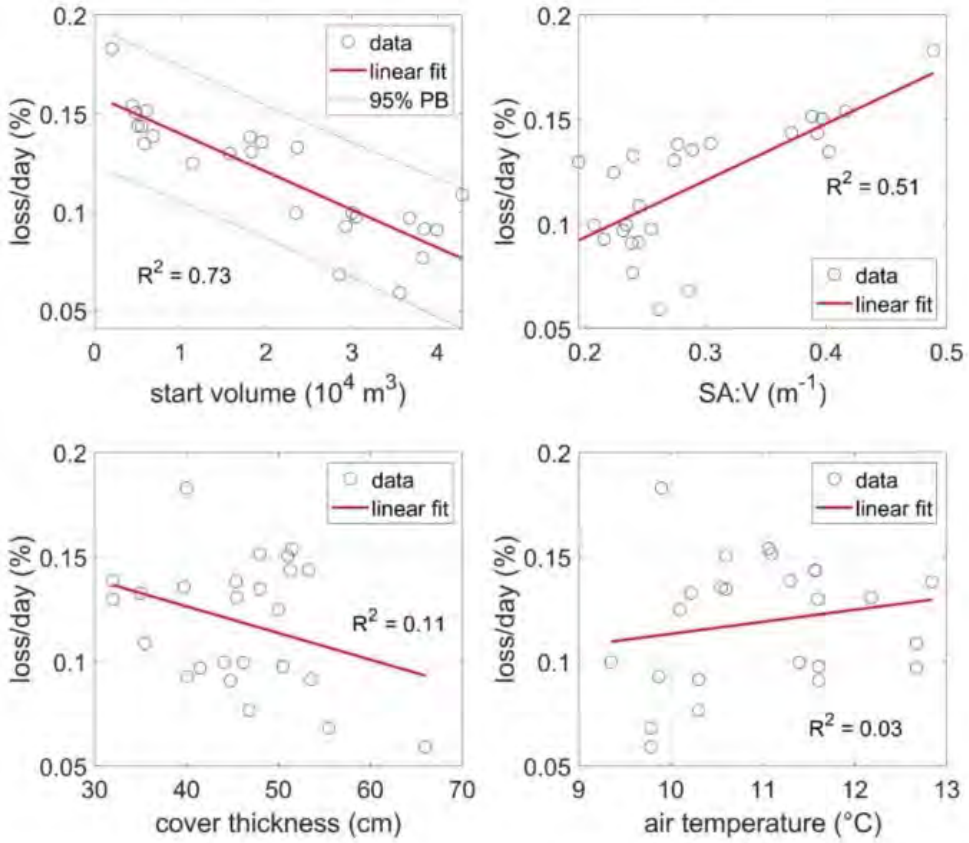


Fig. 4. Single parameter linear regression models for the average daily snow volume loss of 25 sawdust covered snow storages using the start volume (top left), the volume-to-surface ratio (top right), the cover thickness (bottom left), and the air temperature (bottom right) as explanatory variables.

SKI DE FOND - NORVEGE

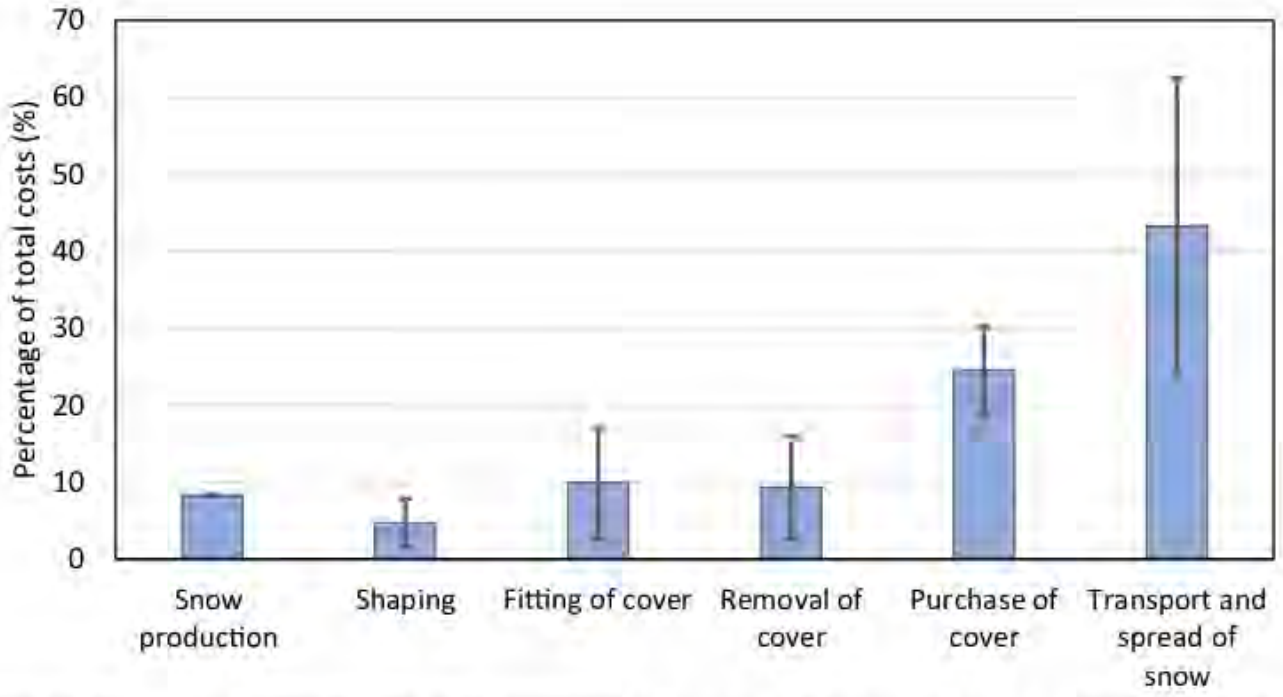


Fig. 7. Distribution of cost for snow storage operations. The graph represents the average cost breakdown from 12 different Nordic ski facilities that have used sawdust or woodchips as cover material. Error bars showing one standard deviation in each direction.

SKI DE FOND - NORVEGE

The study underscores the effectiveness of using a sufficient layer of sawdust as an insulating material for snow storage, demonstrating their good performance compared to alternatives like geotextiles. Snow volume losses ranged from 13.2 % to 22.7 % for sawdust-covered piles, compared to 30.2 % to 71.9 % for geo-textiles. The observed trends highlight the interplay between cover thickness, air temperature, surface area, and volume on snow loss, emphasizing that initial volume (V_0) and the surface-area-to-volume ratio (SA:V) together have the greatest influence on reducing melting. These two factors are closely linked—both in the model and in practice—and cannot be fully disentangled, as changes in volume inherently affect SA:V. Designing snow piles with adequate volume and an optimal shape (ideally hemispherical) minimizes exposure to ambient heat and maximizes snow preservation.

An emprical model was developed, that can estimate the snow loss based on cover thickness, average temperature, start volume and surface to volume ratio. This could help practitioners in planing their snow storage strategies. Analysis using the empirical model revealed that increasing the cover thickness beyond 30 cm is not cost-effective compared to producing additional snow for storage.

Operational costs for snow storage were dominated by transportation and spreading of snow, accounting for 43 % of total expenses.

Strategic placement of storage piles near the ski trails or alternative transportation methods, should be investigated to reduce costs and environmental impacts. The findings suggest that more focus should be put into designing a facility where it is easy to spread the snow from pile to trails, and the labour of applying/removing the isolation material should be considered, and not only the isolation properties itself.

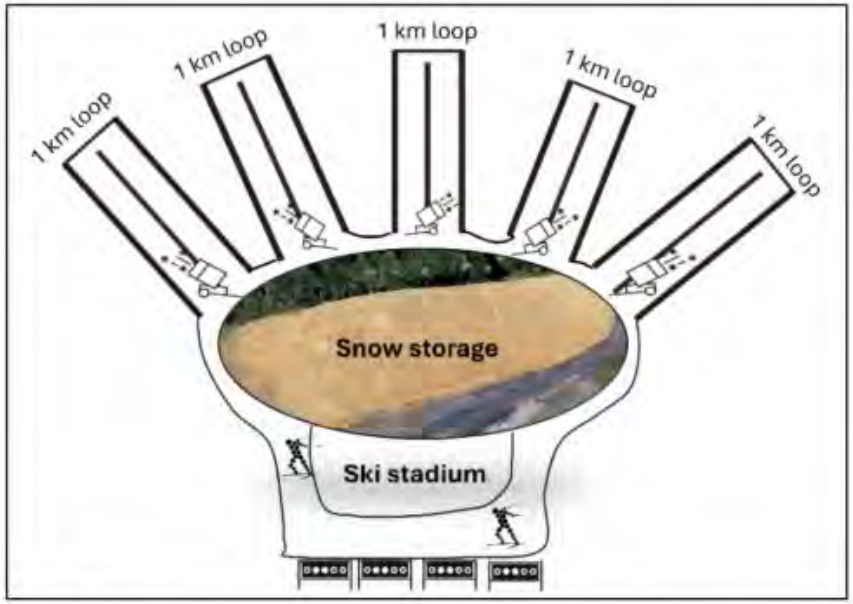


Fig. 9. Concept of a Nordic ski facility with a centralized snow storage and connected loops for more efficient snow management.



BARRIERES A NEIGE

BARRIERES A NEIGE

Les barrières à neige permettent d'«utiliser»
la neige transportée par le vent afin de :

-Contrôler l'enneigement des pistes de ski, des RM, des gares de départ et d'arrivée de TK et de TS

-Protéger les voies de communication contre les congères

-Mettre en place des carrières à neige



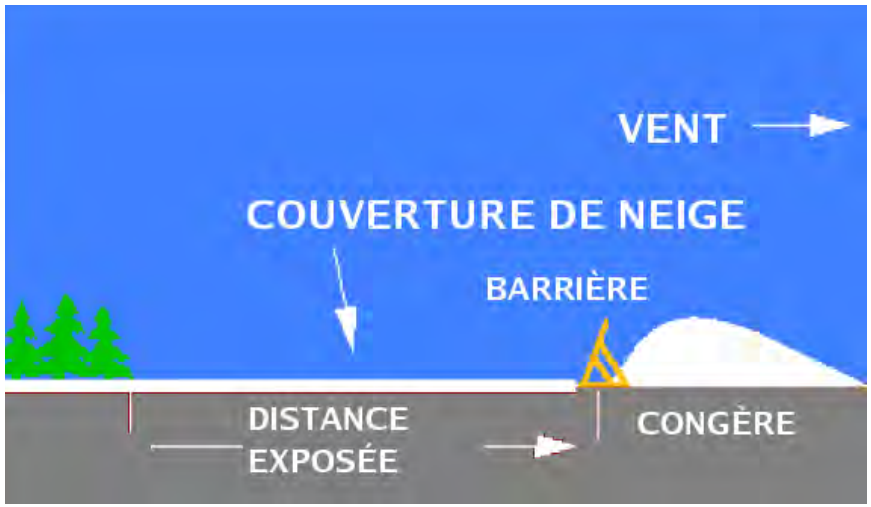
BARRIERES A NEIGE

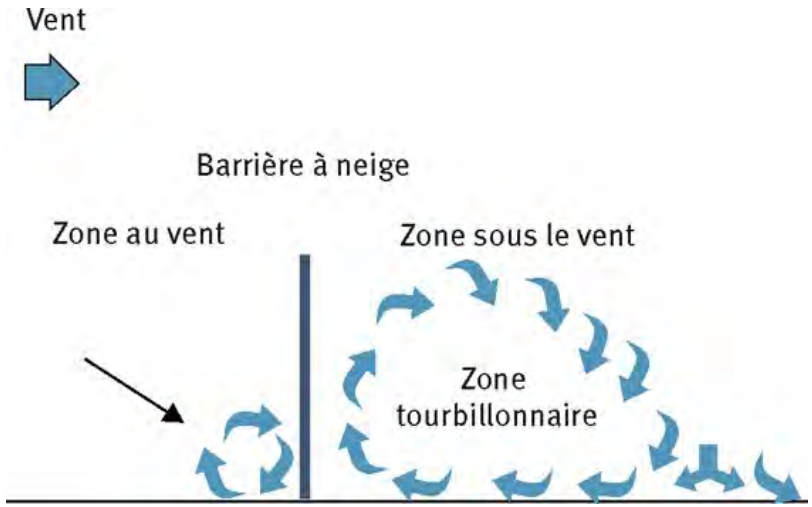
Les barrières à neige permettent d'«utiliser»
la neige transportée par le vent afin de :

-Contrôler l'enneigement des pistes de ski, des RM, des gares de départ et d'arrivée de TK et de TS

-Protéger les voies de communication contre les congères

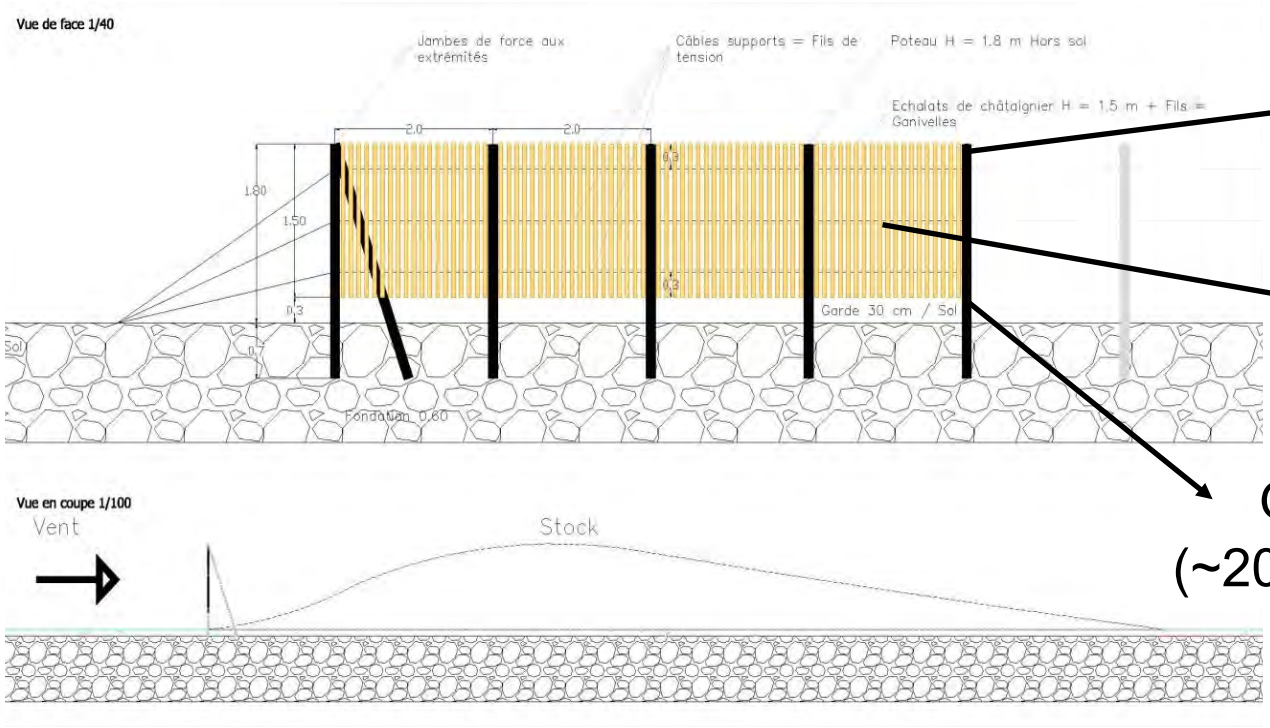
-Mettre en place des carrières à neige





BARRIERES A NEIGE

Trois paramètres pour contrôler le stock de neige accumulée



Hauteur - H
(~1,5-2 m)

Porosité
(~40-60%)

Garde au sol
(~20-50 cm, ~0,2 H)

BARRIERES A NEIGE

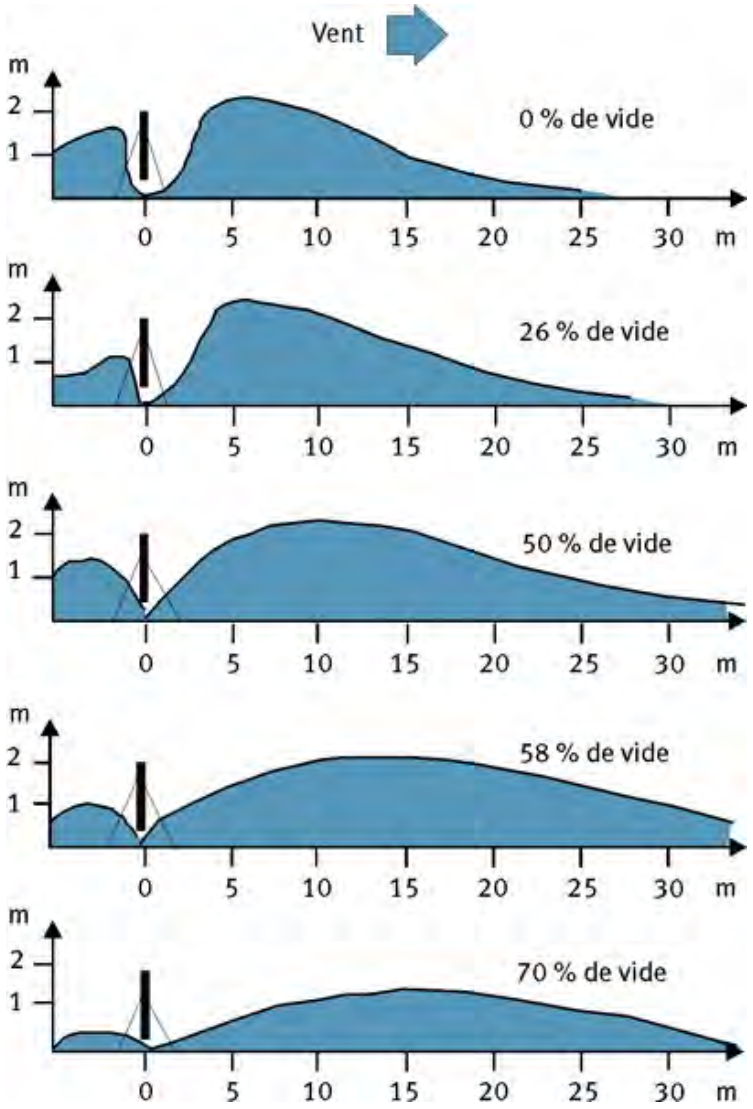
Porosité

Rapport de la surface des vides sur la surface totale

Pour une vitesse de vent donnée, lorsque la porosité augmente les congères deviennent plus longues et moins épaisses

Porosité optimale comprise entre 40 et 60%

Maille de l'ordre de 10 à 20 cm (apparition du givre qui en obturant rapidement les mailles de petite taille ramène la porosité à 0%)



BARRIERES A NEIGE

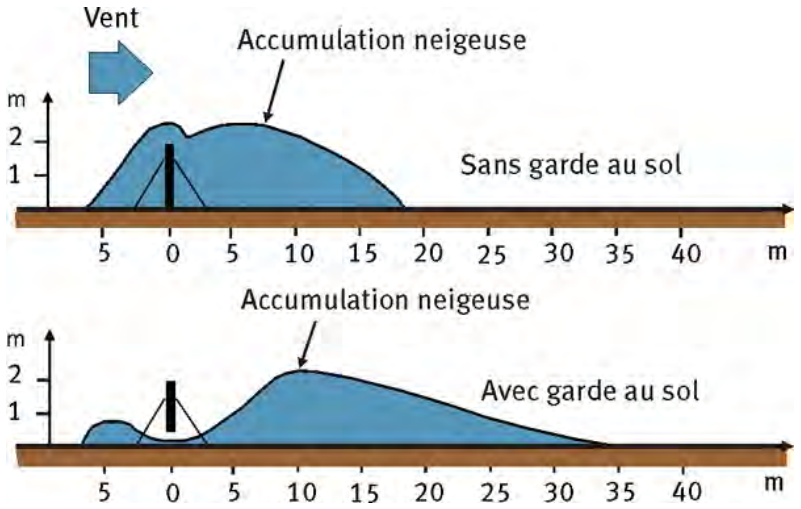
Garde au sol

Espace laissé libre entre le bas du panneau 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 (pour ne pas l'abimer)

Hauteur optimale de la garde au sol = hauteur moyenne d'une chute de neige sans vent (il ne faut pas que la garde au sol soit enfouie sous la neige)

De l'ordre de 20 à 50 cm maximum



BARRIERES A NEIGE

Résumé

Pour un maximum d'efficacité, une barrière à neige de hauteur H doit avoir :
- porosité de 40 à 60%
- mailles de l'ordre de 10 à 20 cm
- garde au sol de 20 à 50 cm
- longueur supérieure à 20 fois sa hauteur

Dans ces conditions, pour une barrière à neige implantée en terrain plat et perpendiculairement à la direction du vent dominant :
- la longueur de la congère à saturation est de 25 H
- le volume de neige accumulé à saturation est de 20 H^2 par mètre linéaire

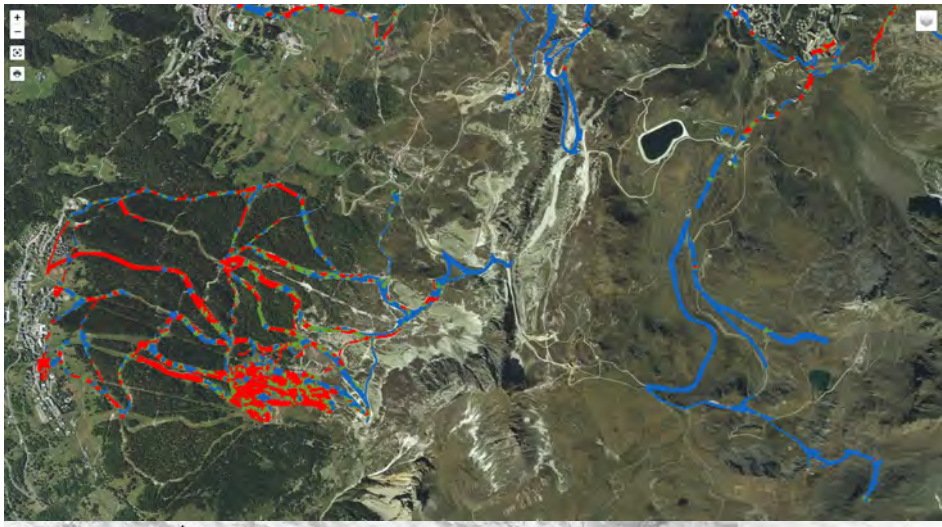
Exemple
par mètre linéaire, une barrière de 2 m de haut permet de créer une congère de 50 m de long et stocker un volume de neige de 80 m^3 (lorsque que les vents sont violents, la longueur et la hauteur de la congère à saturation sont plus faibles, et la congère sera plus éloignée de la garde au sol)

METEO FRANCE

LES OUTILS



TIP SNOW





CLIMSNOW

Prospective enneigement stations

