

Avancées scientifiques et outils pour une optimisation de la gestion de l'eau en domaine skiable



Carlo Maria Carmagnola

PhD - Responsable recherche et formation sur la neige
dans les domaines skiables chez Dianeige



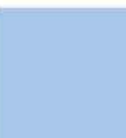
OUTLINE

La neige de culture : propriétés et utilisation

Recherche 1 : Simulations avec Crocus-Resort

Recherche 2 : Estimation des pertes

Recherche 3 : Optimisation de la production





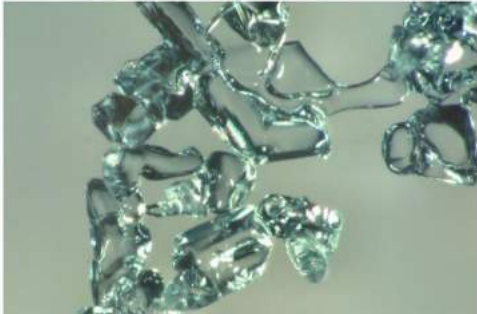
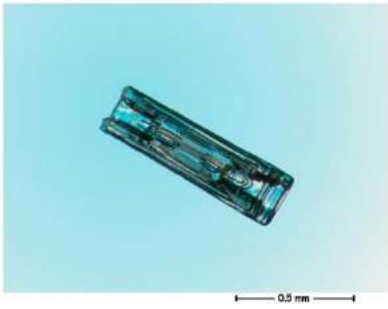
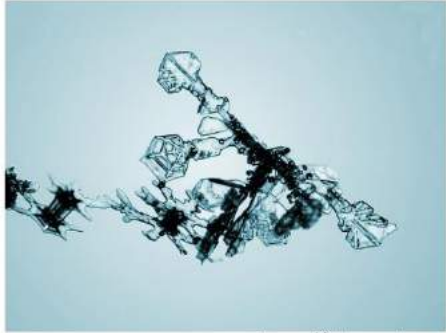
La neige de culture: propriétés et utilisation



NEIGE NATURELLE...



grené de surface



Photos: B. Lesaffre
Météo-France

...ET NEIGE DE CULTURE

Grains ronds de petite taille obtenus par congélation de gouttes d'eau

- Taille très uniforme et forme sphérique quasi parfaite
- Taille : 0,2 à 0,4 mm (parfois jusqu'à 1 mm)
- Masse volumique : 350 à 500 kg/m³

Faible tassement
Métamorphisme de fonte

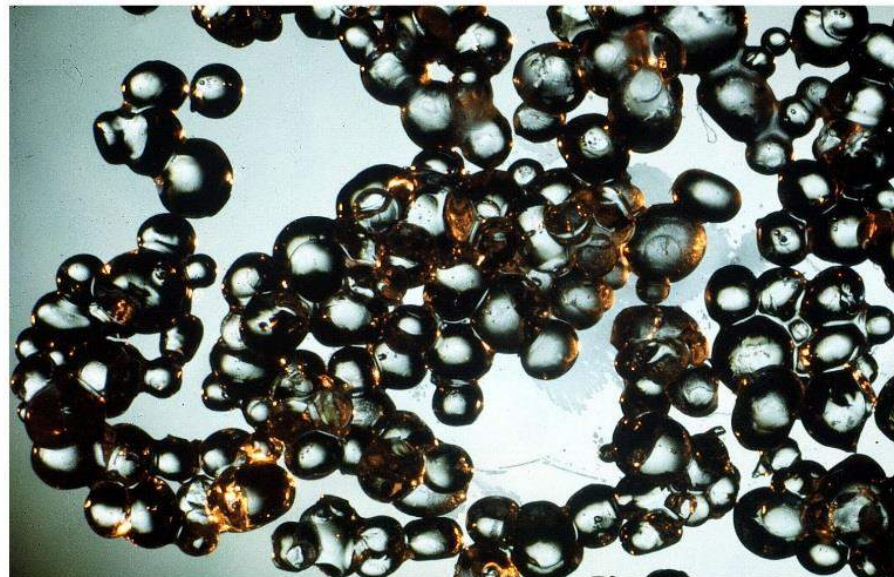


Photo: B. Lesaffre
Météo-France



NEIGE DE CULTURE: Densité

Masse volumique (kg/m ³)	Densité	Nature / Description
1000	1	Eau
917	0,917	Glace
800	0,8	Névé
450-500	0,45-0,5	Neige damée
350-600	0,4-0,65	Grains ronds
300-600	0,3-0,6	Neige ventée
300-500	0,3-0,5	Neige de culture
150-350	0,15-0,35	Grains fins
10-200	0,01-0,2	Neige fraîche

3-4 fois plus dense
que la neige fraîche



NEIGE DE CULTURE: Conductivité thermique

Matériau	$k_T \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Air	0.023
Bois	0.04 – 0.4
Eau	0.6
Verre	1.1
Calcaire	0.5
Glace	2.3
Acier inox	15
Aluminium	237
Cuivre	401
Diamant	1000

Meilleure capacité
à conduire la chaleur (et le froid)

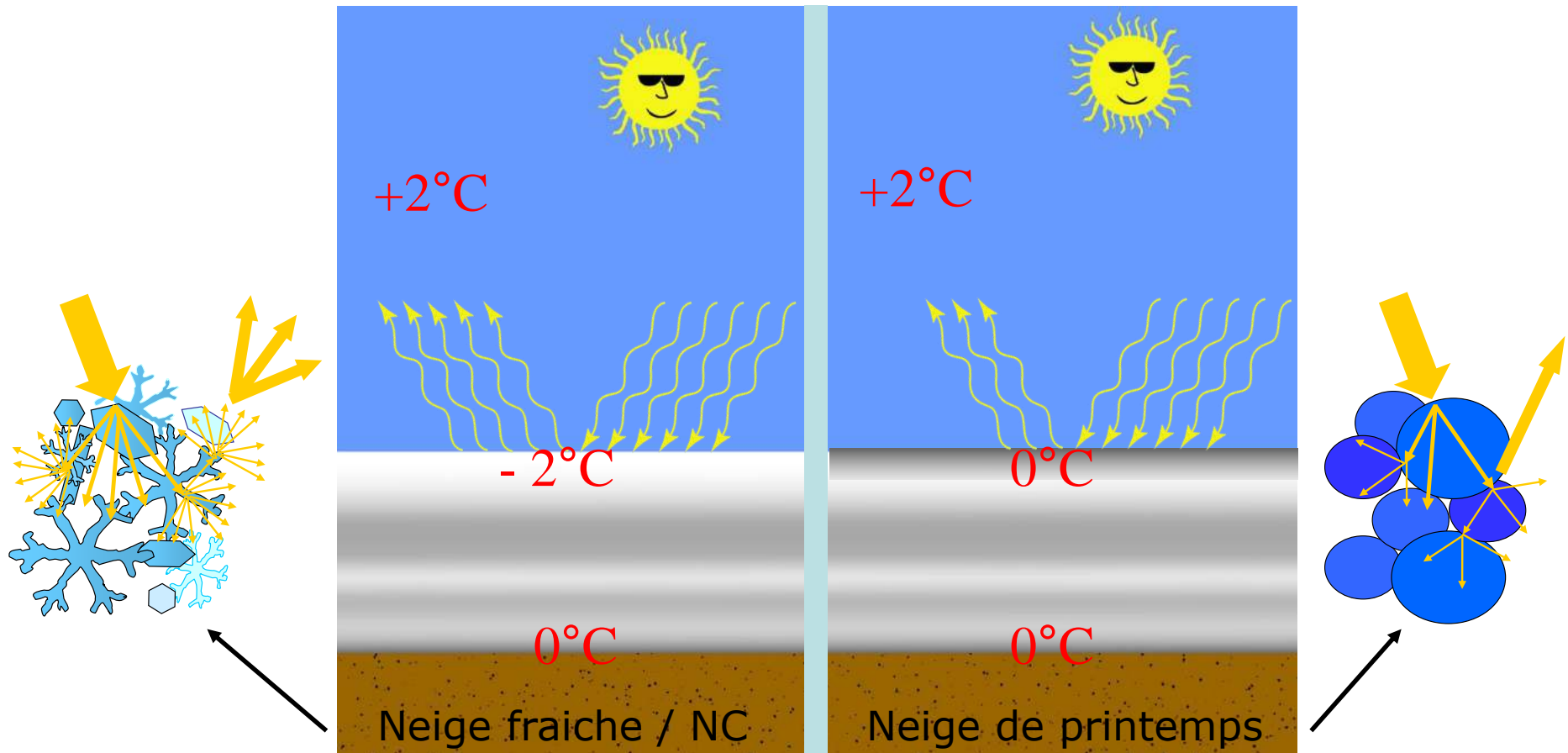
Meilleur stockage des frigories



NEIGE DE CULTURE: Albédo

Petits grains

Meilleure capacité à renvoyer le rayonnement par rapport à la neige évoluée



NEIGE DE CULTURE: Résistance au cisaillement

Cohésion

- Bonne
- Faible
- Très faible

Neige récente

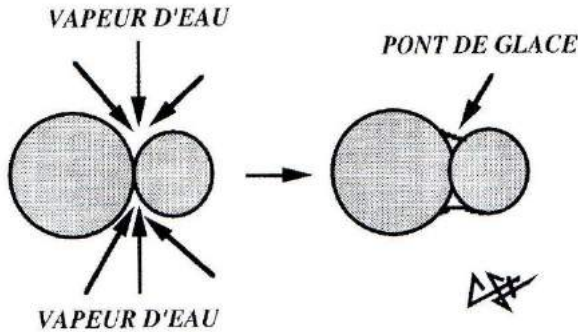
- Neige fraîche
- Neige roulée
- Givre de surface
- Neige de culture**

Neige évoluée

- Grains fins
- Grains à faces planes
- Gobelets
- Grains ronds

Cohésion de frittage

Présence de soudures (ou ponts de glace) entre les grains
Condensation solide de vapeur d'eau aux points de contact



Meilleure résistance à l'érosion (vent, carres, etc.)



ROLE DE LA NEIGE DE CULTURE

Techniquement, la neige de culture a 4 fonctions principales :

1. Créer précocement la couche de fondation du manteau neigeux (neige humide à 450 kg/m³ qui servira de support à la neige naturelle)
2. Constituer un matelas de frigories qui permettra la conservation de la neige naturelle
3. Conforter les zones d'usures (soit un préventif par surépaisseur, soit en curatif par production au jour le jour) = neige sèche souple à skier
4. A minima, garantir la fonctionnalité de l'ossature du domaine skiable



ROLE DE LA NEIGE DE CULTURE

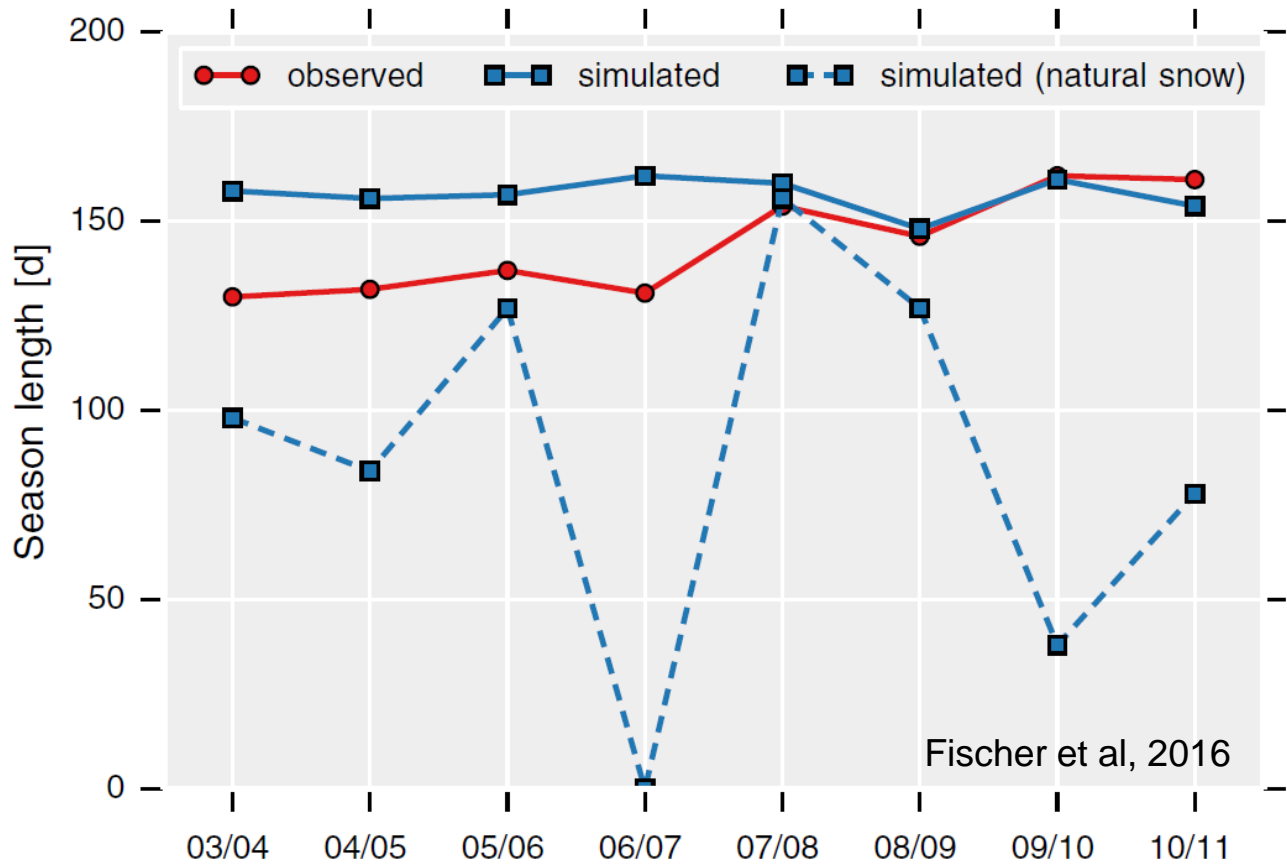


Fig. 10. Observed and simulated (with (solid line) and without (dashed line) snowmaking) ski season length for the seasons 2003/04–2010/11.

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 :

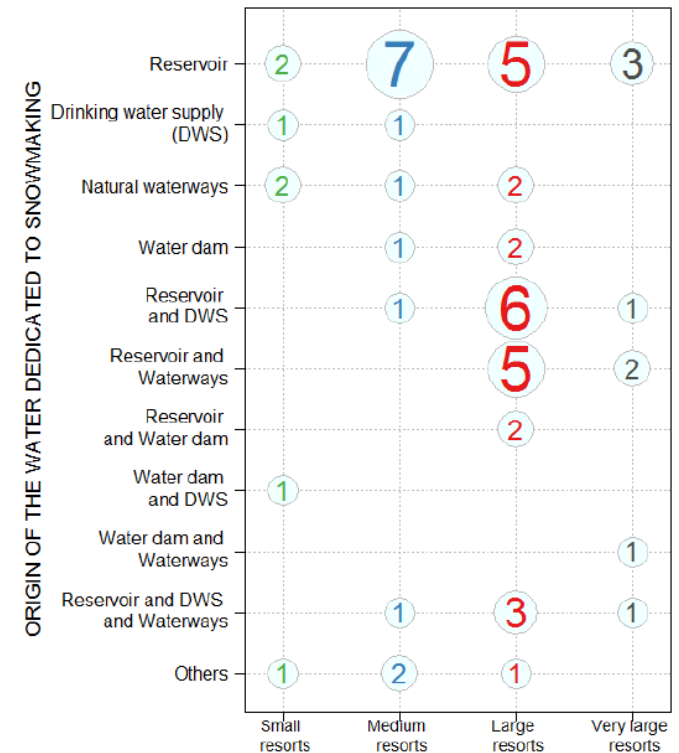
Eau restituée entièrement à la nature au printemps (70-90% par infiltration d'eau liquide dans le sol, 10-30% par évaporation)

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





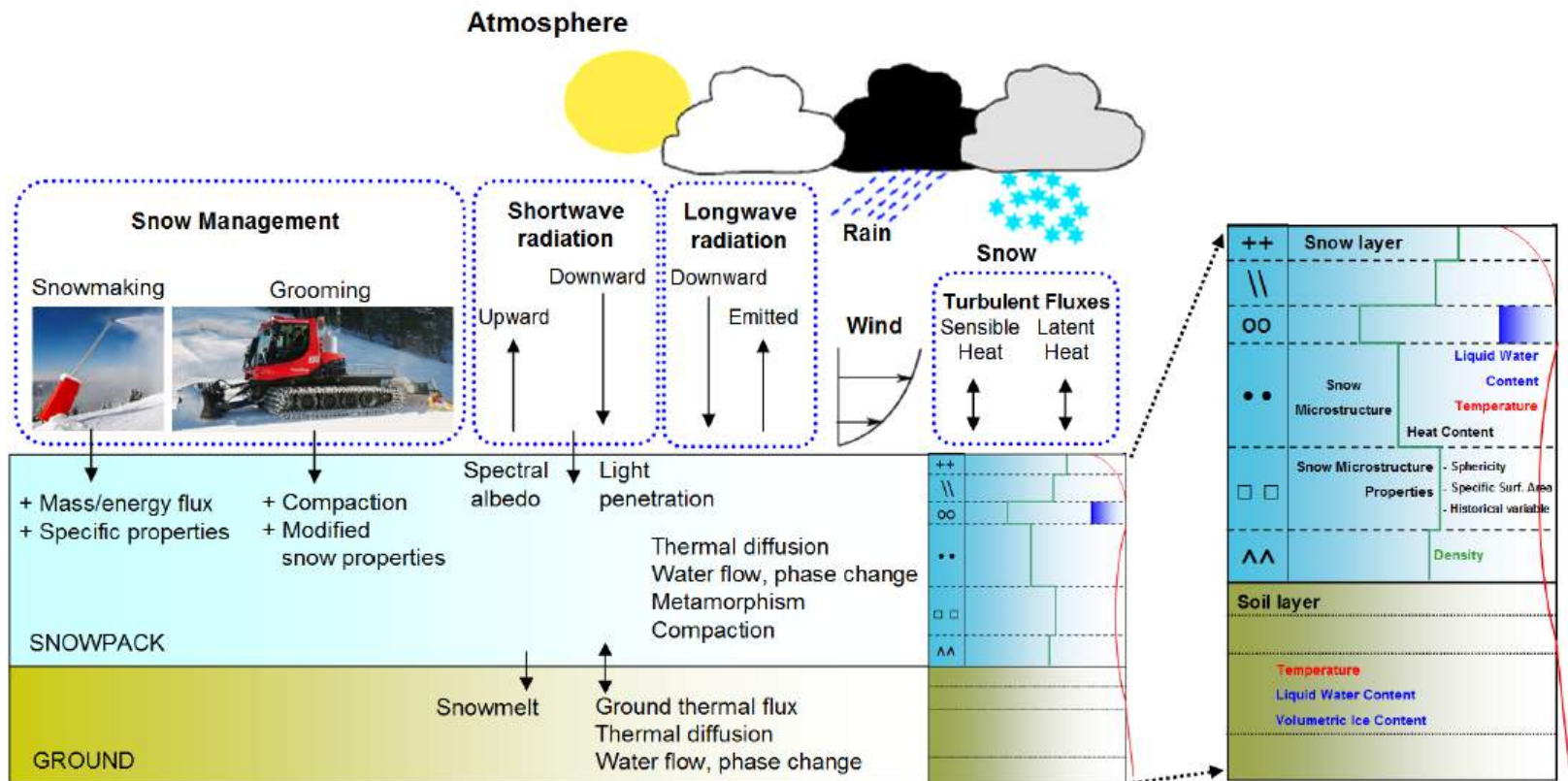
Recherche 1 : Simulations avec Crocus-Resort



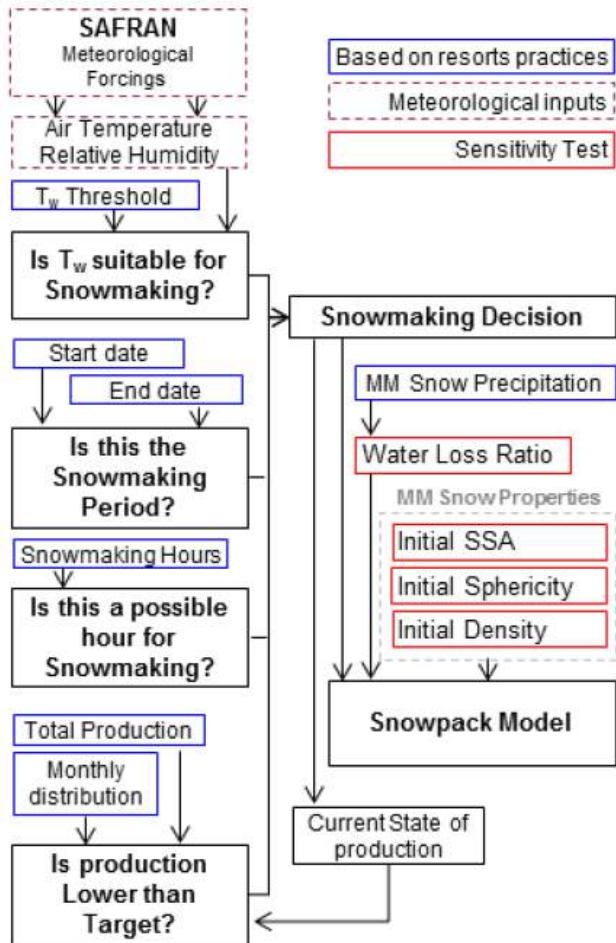
SIMULER LA NEIGE DE CULTURE

Travail mené par P. Spandre, doctorant à Météo-France/IRSTEA

Intégrer un module damage et un module neige de culture dans le modèle Crocus (Météo-France)



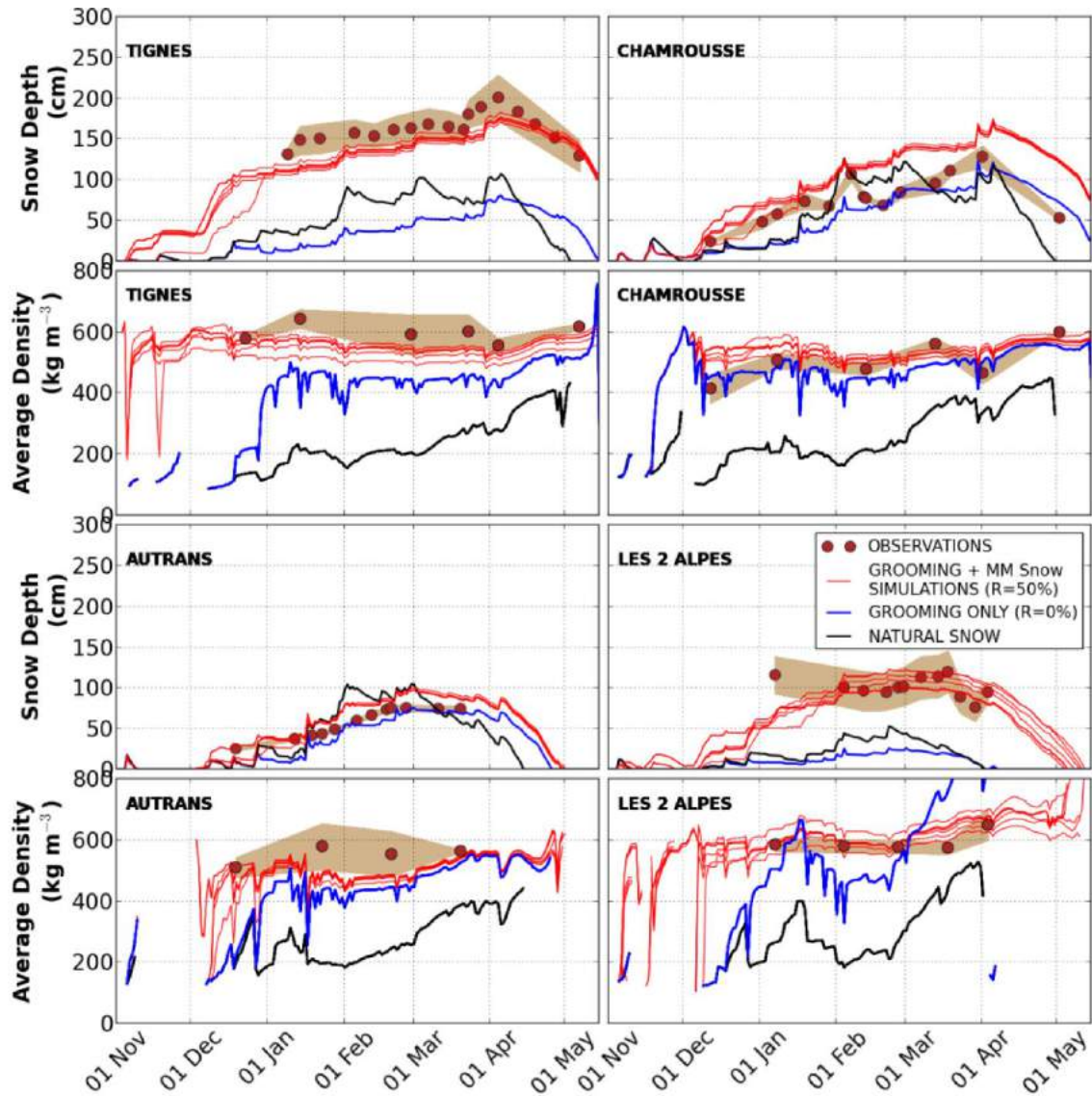
SIMULER LA NEIGE DE CULTURE



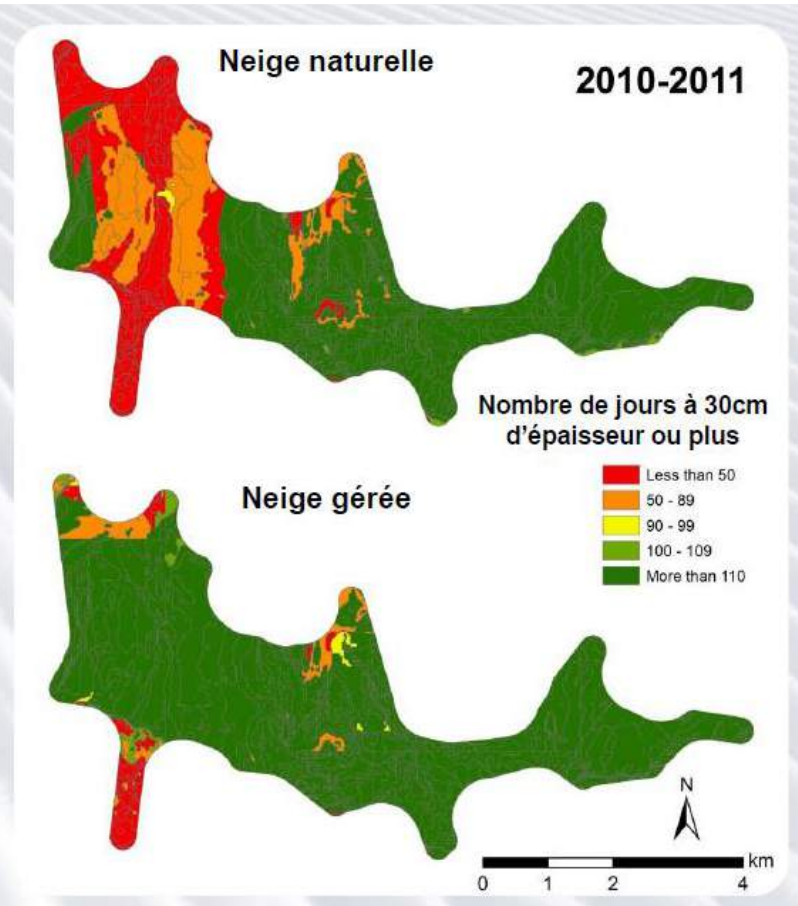
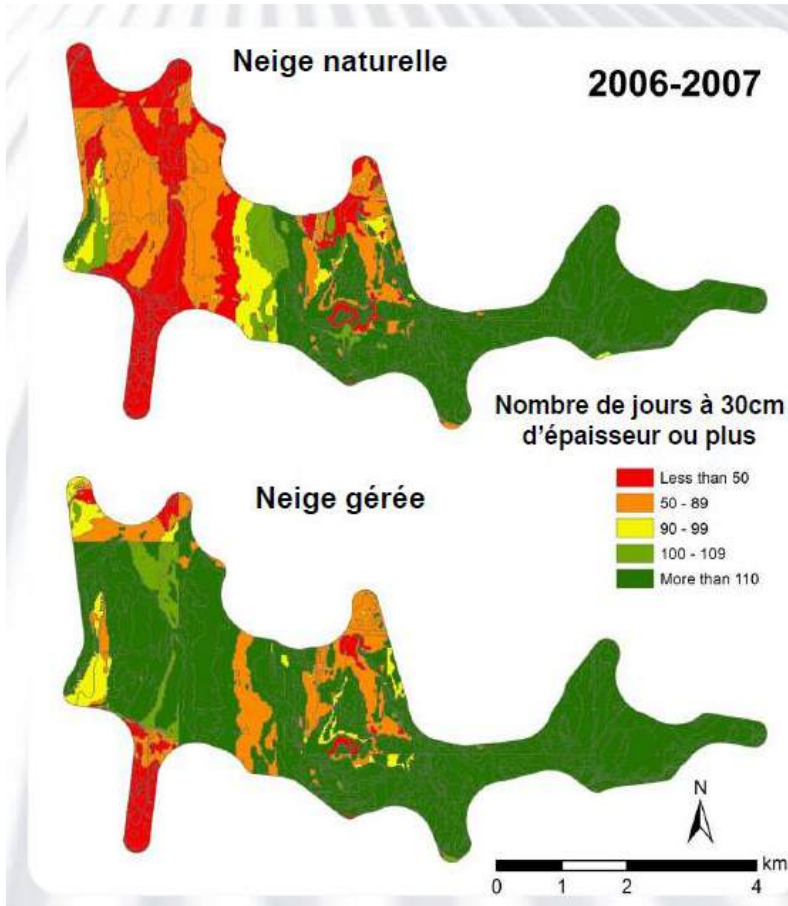
- Propriétés spécifiques (densité, SSA, sphéricité)
- Taux de production
- Seuil de température humide et de vitesse de vent



QUELQUES RESULTATS

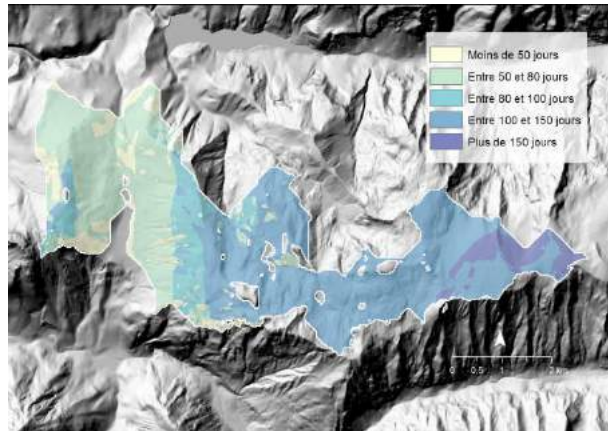


QUELQUES RESULTATS

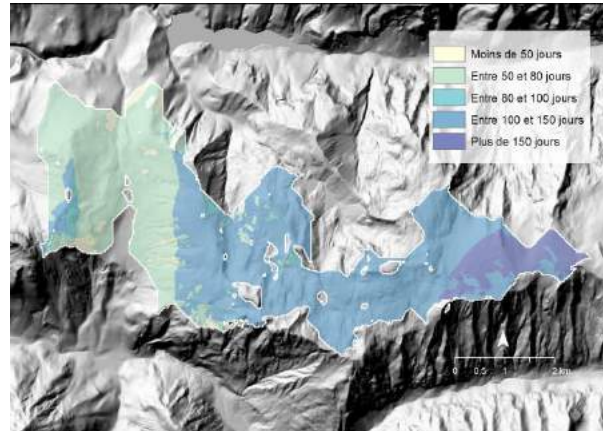


QUELQUES RESULTATS

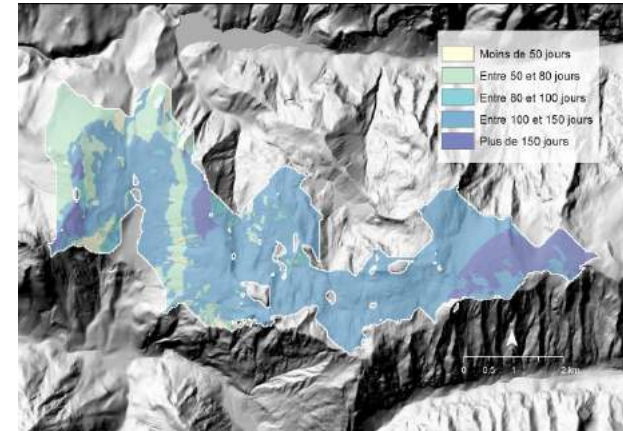
2006/07



NN

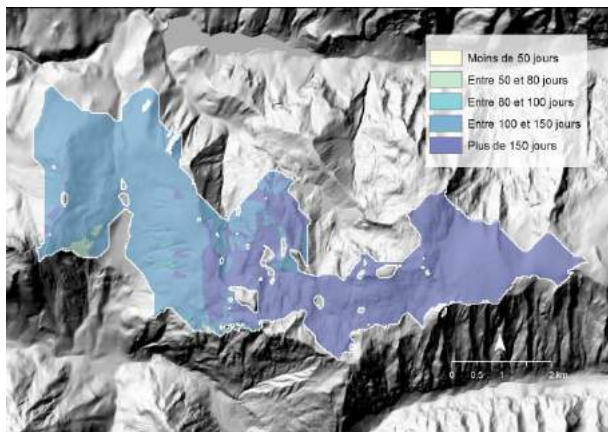


NN+damage

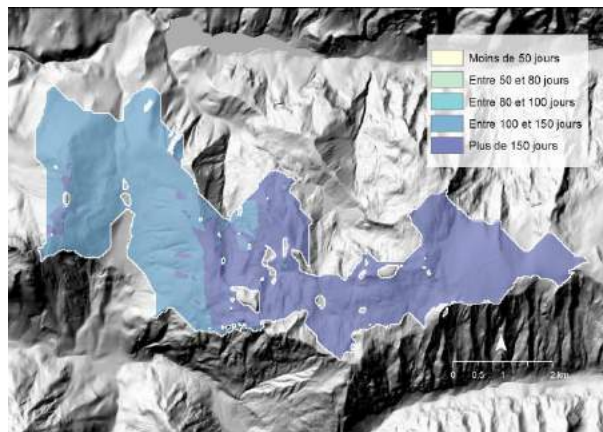


NN+damage+NC

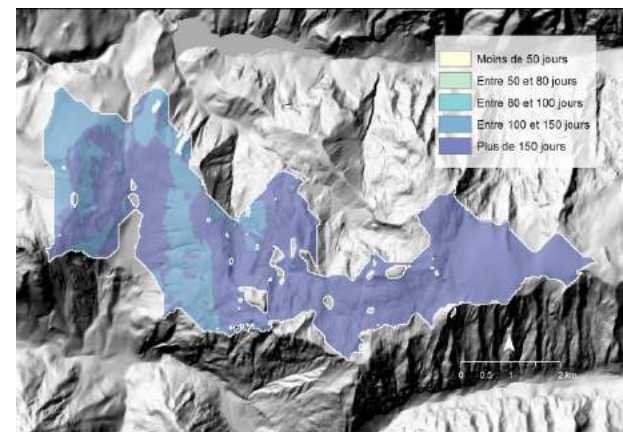
2008/09



NN



NN+damage



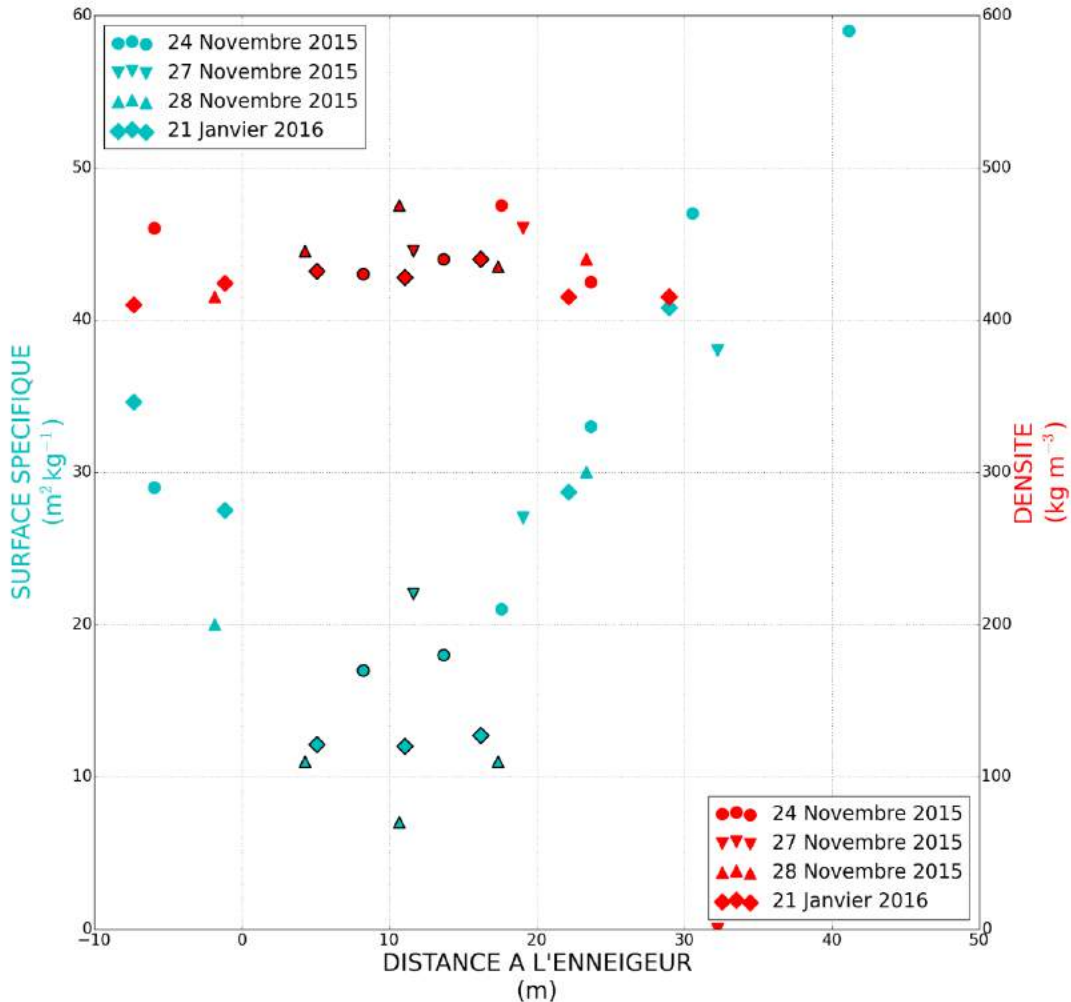
NN+damage+NC



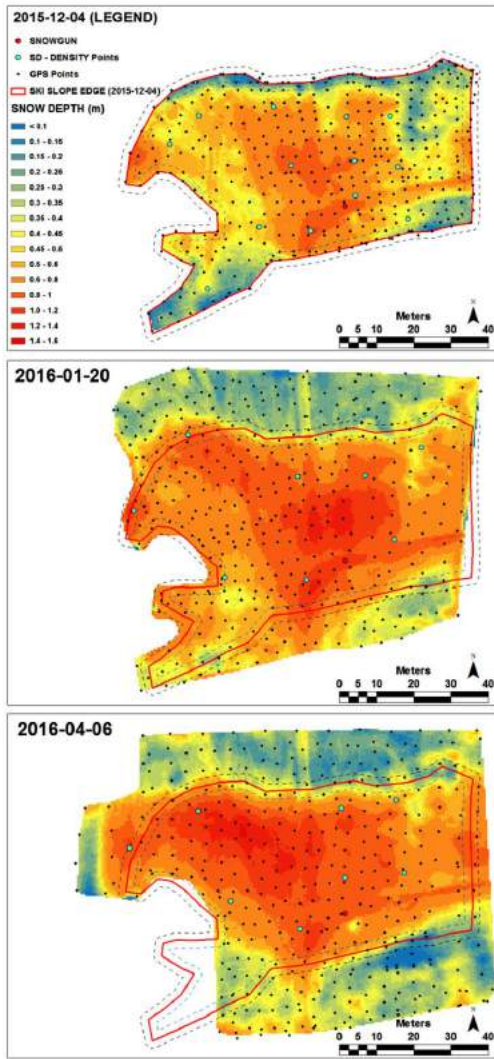
Recherche 2 : Estimation des pertes



MESURER LES PROPRIETES D'UN TAS DE NEIGE



LES PERTES DES ENNEIGEURS



1 m³ d'eau
=
2 m³ de neige?

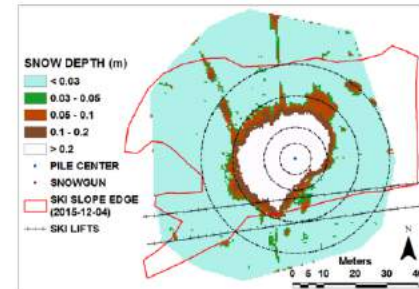


Figure 4a. The snow depth raster for the 23 November 2015 production session along with the positions of the snowgun, the center of the MM snow pile and the concentric circles of radius R = 5, 10, 20 and 30 m. The edge of the ski slope on the 4 November 2015 is also shown.

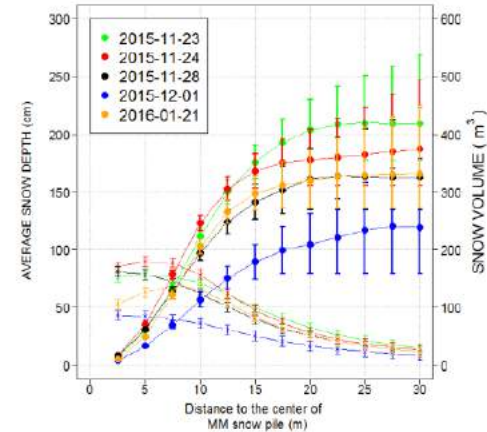


Figure 4b. Average snow depth (x) and snow volume (•) within concentric circles around the center of the MM snow pile of radius R from 2.5 to 30 m. The larger the circle the lower the average snow depth and thus the larger the uncertainty on the snow volume.

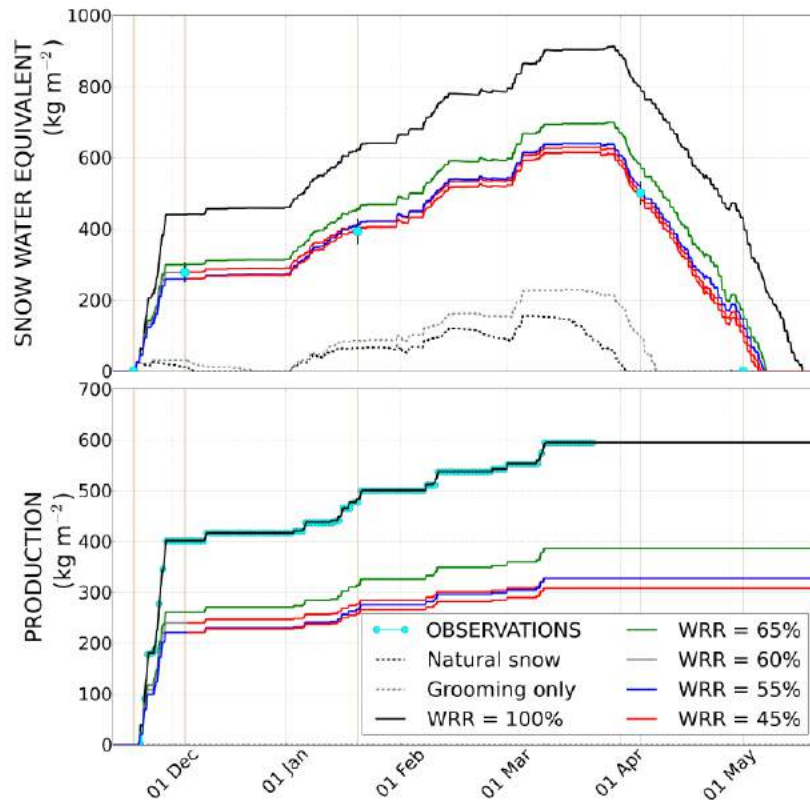


Figure 7. Seasonal evolution of the ski slope snowpack. Simulations of the natural snow and groomed natural snow conditions are shown along with the simulations of the ski slope conditions including MM snow production, accounting for water recovery rates (WRR) of 100%, 65% and the three combinations (Table 9) which provided the best agreement with the observations (dots with error bars).

LES PERTES DES ENNEIGEURS

Pertes: 30-40%:

- < 10% thermodynamiques (évaporation, sublimation)
- > 30% mécaniques (vent, dépôt derrière l'enneigreur, dépôt en dehors de la piste)



less than 50% of the water mass can be expected within the edge of a typical ski slope width (approximately 20 to 30 m, Section 4.2) with snowguns on the side and perpendicular to the slope (a typical installation).

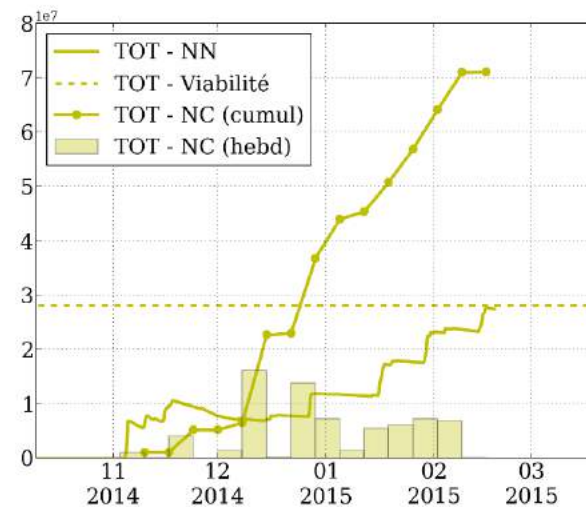
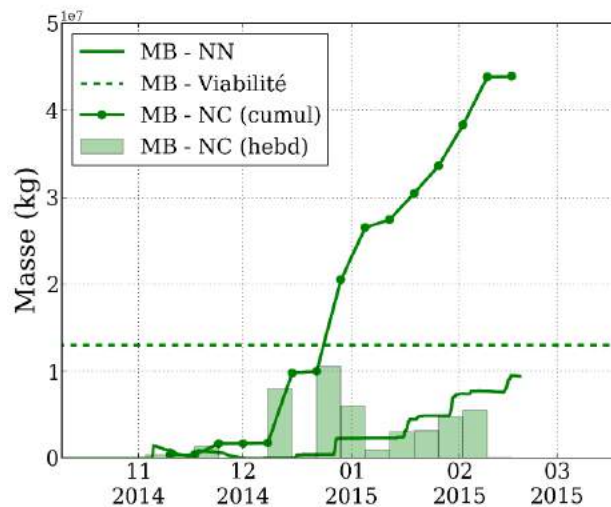
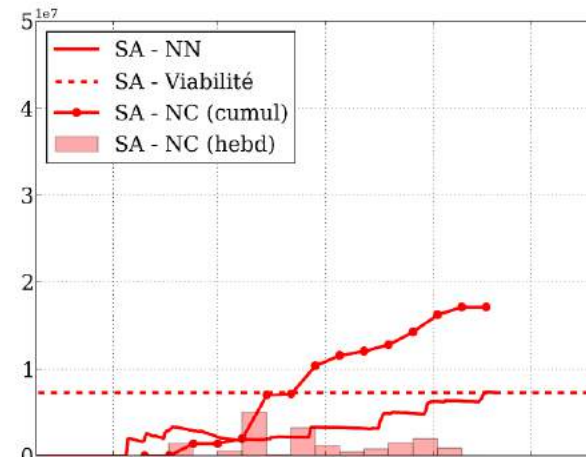
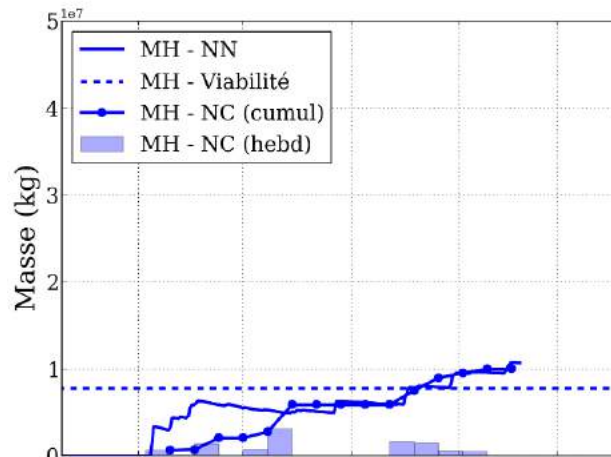


Recherche 3 : Optimisation de la production



MASSES DE NEIGE PRODUITES

Les masses de neige de culture produites sur les pistes sont parfois supérieures à celles tombées en neige naturelle





OPTIMISER LA PRODUCTION : Partenariat

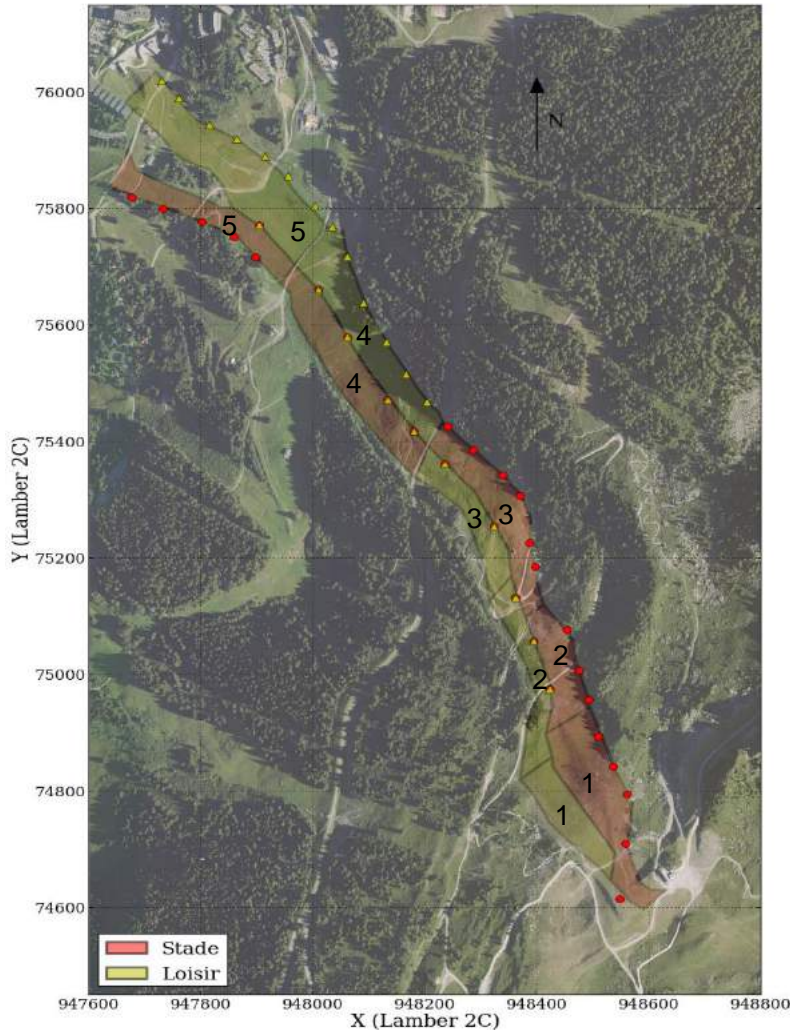


Snow design



OPTIMISER LA PRODUCTION : Un exemple

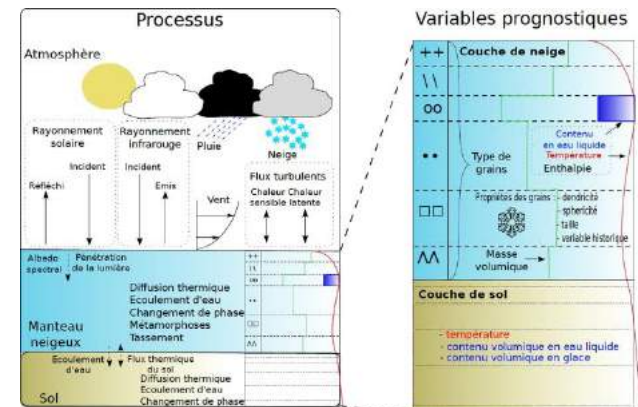
Les Arcs - Piste de la Cachette



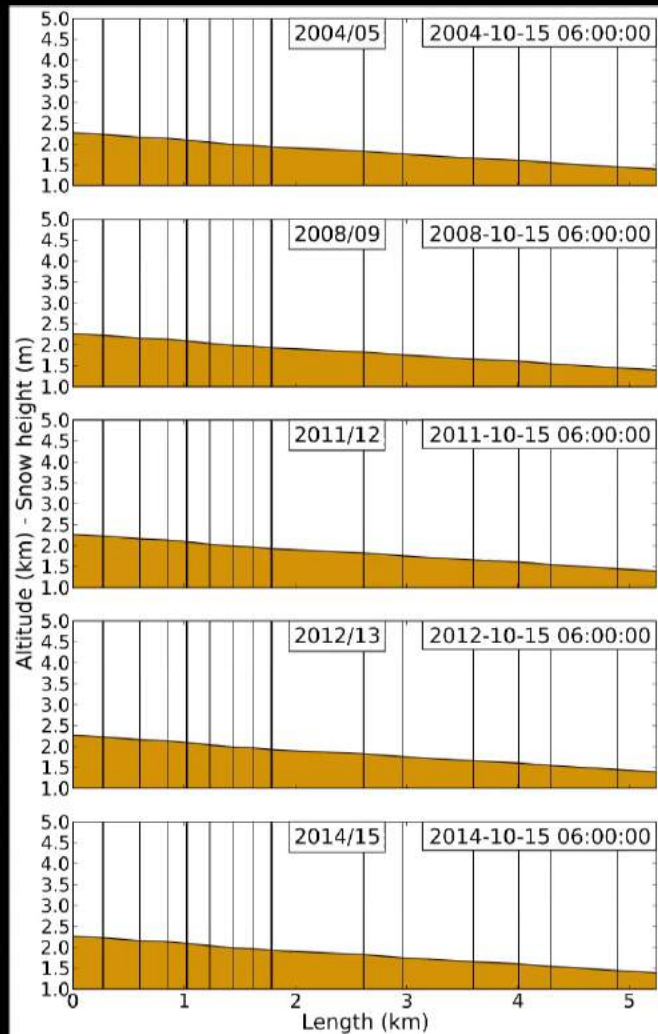
Découpage
en tronçons

		Altitude (m)	Pente (°)	Orientation (°)	Surface (m ²)	Surface tot (m ²)
Stade	1	2073	24	320	23 305,2	92 246,7
	2	2040	22	340	11 851,6	
	3	1948	21	330	18 733,3	
	4	1825	25	330	23 377,2	
	5	1703	19	330	14 979,4	
Loisir	1	2110	19	320	11 371,7	91 418,8
	2	2028	23	340	11 930,0	
	3	1940	21	330	11 727,4	
	4	1825	23	330	23 781,3	
	5	1693	18	330	32 608,4	

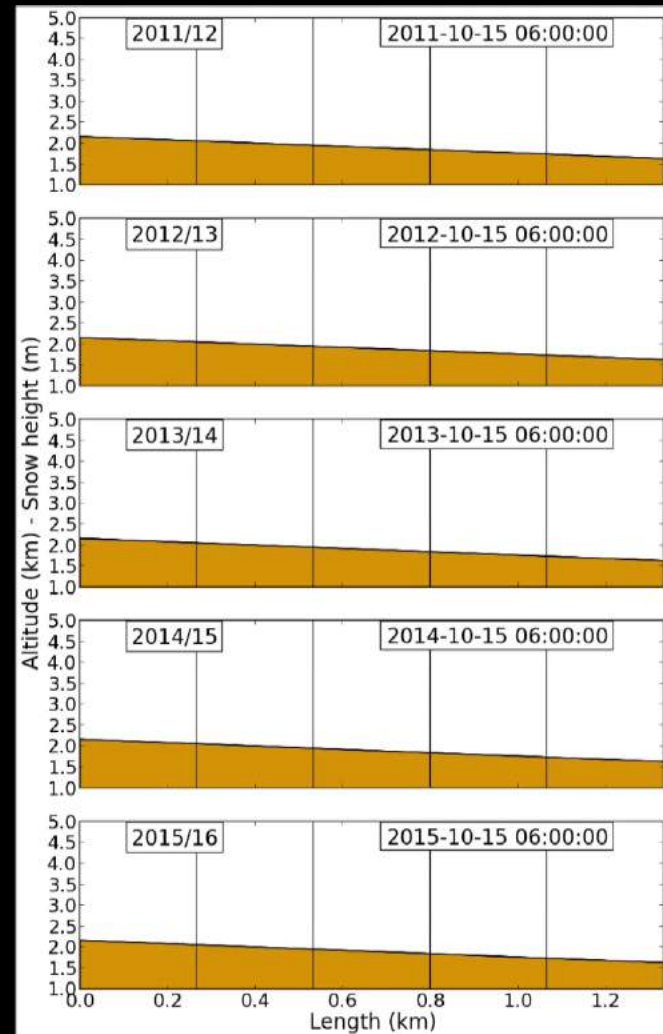
Simulations
neige



Piste Marteau Serre-Chevalier

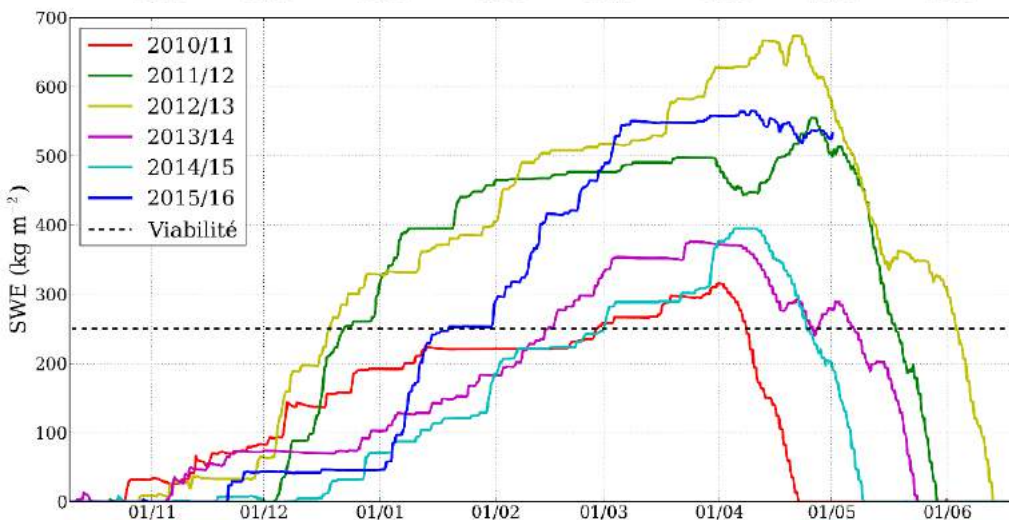
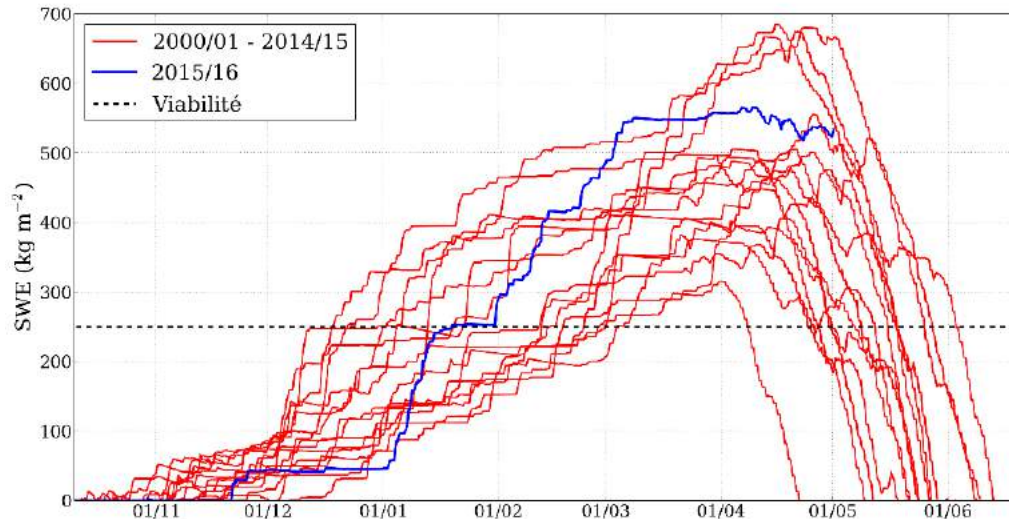


Piste Cachette Les Arcs



OPTIMISER LA PRODUCTION : La neige naturelle

Cachette - Haut

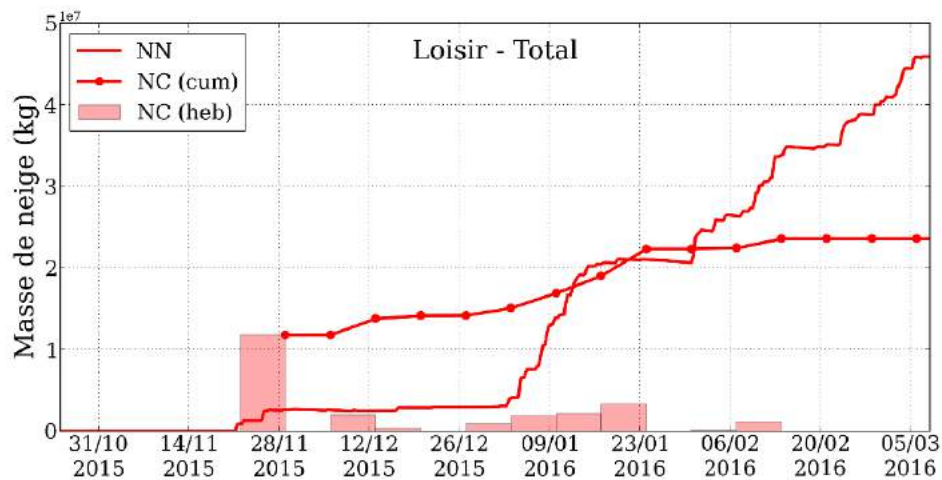
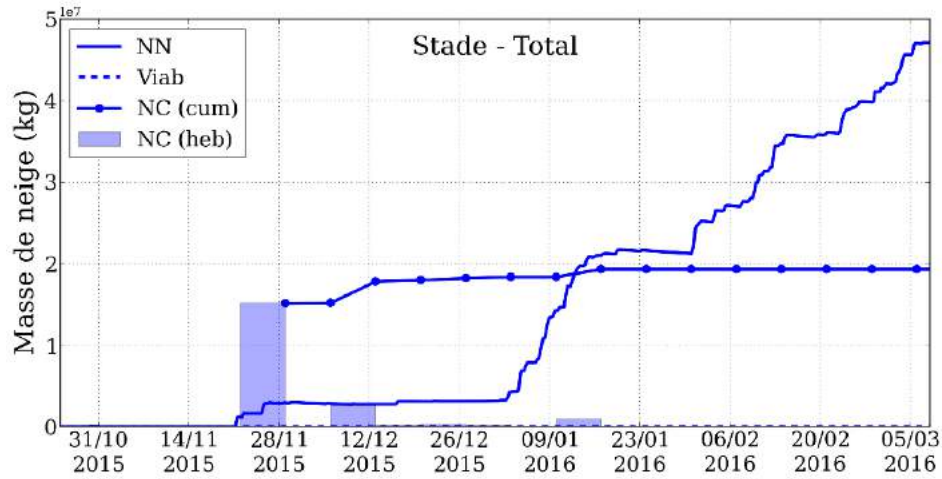


Evolution de masses de
neige naturelle par rapport au
seuil de viabilité de la piste



OPTIMISER LA PRODUCTION :

La neige de culture



Masses de neige sur la piste

« Inversion avant la mi-janvier »



OPTIMISER LA PRODUCTION :

Estimation des seuils

Deux seuils :

8 décembre
Seuil de viabilité

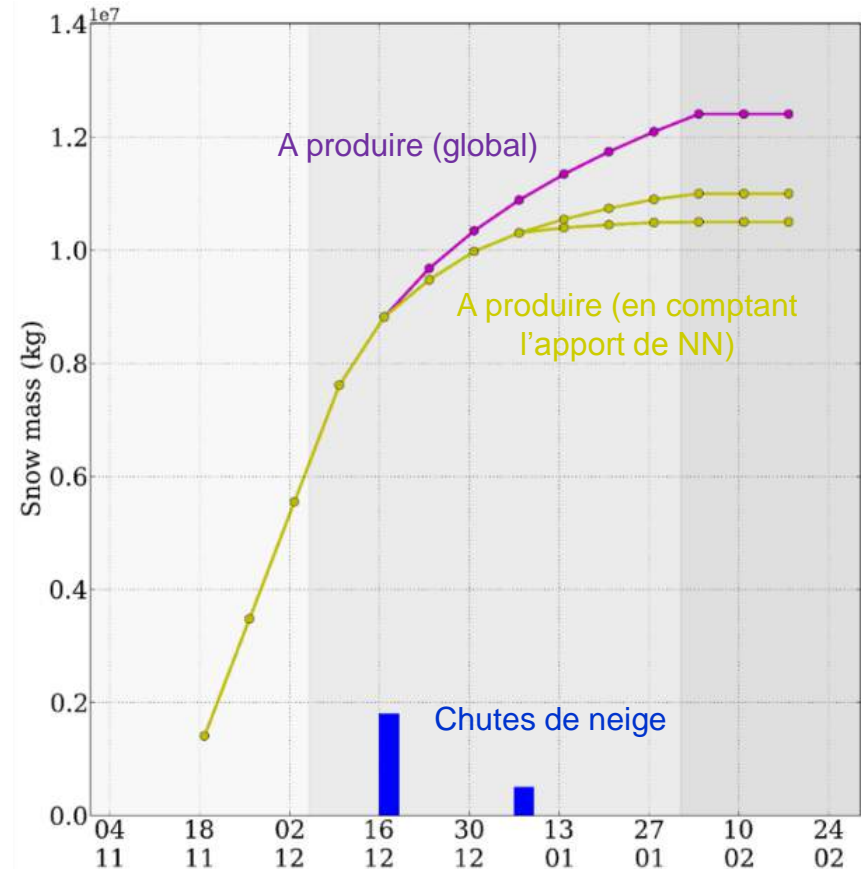
$$0,5\text{m} \times 500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} = 250 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$$

1^{er} mars
Seuil de confiance

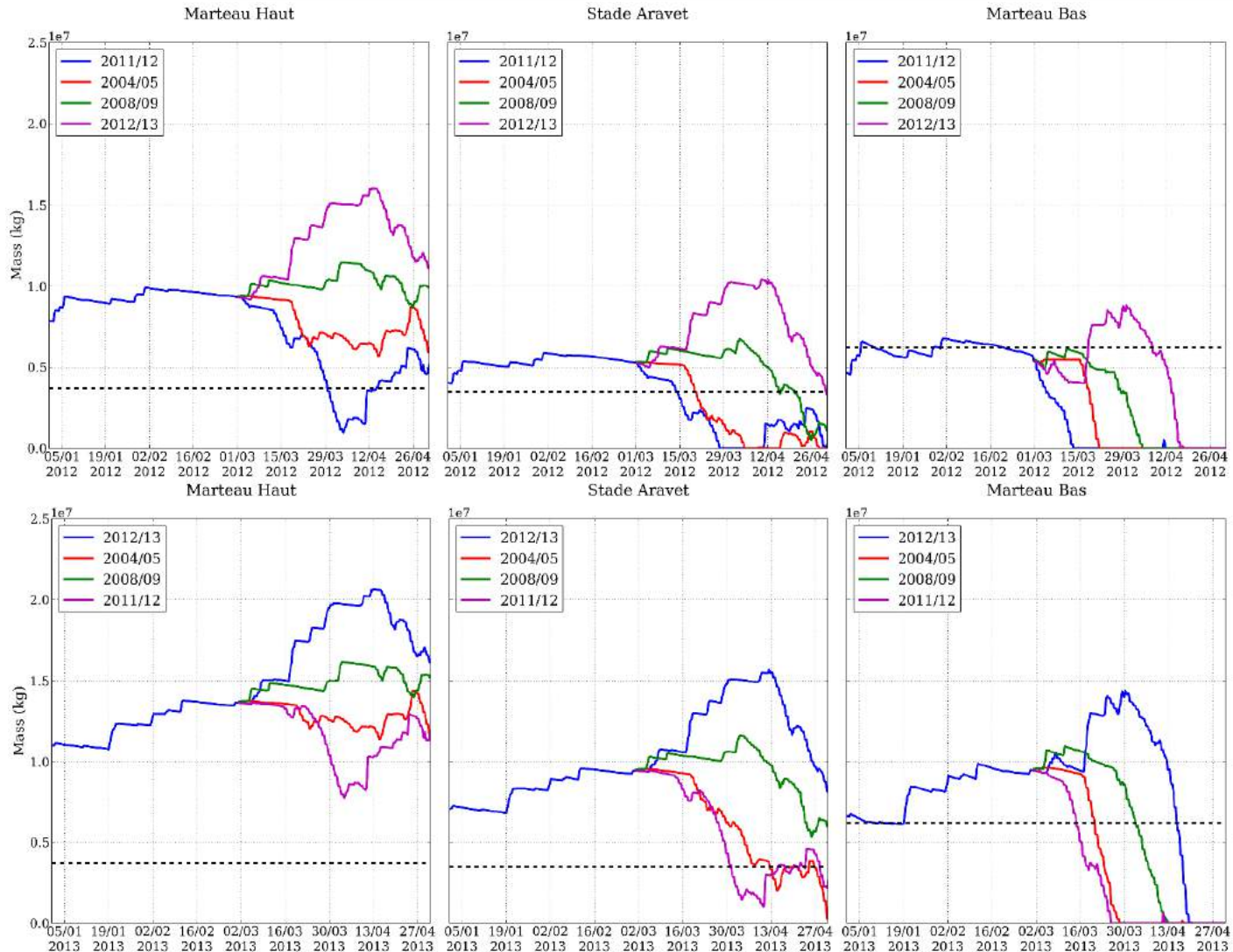
A déterminer à
partir de la
statistique

Trois périodes :

- Avant ouverture (prod. pour atteindre le seuil de viabilité)
- Jusqu'au 1 mars (prod. pour atteindre le seuil de confiance)
- Fin de saison (pas de production)



OPTIMISER LA PRODUCTION : Estimation des seuils

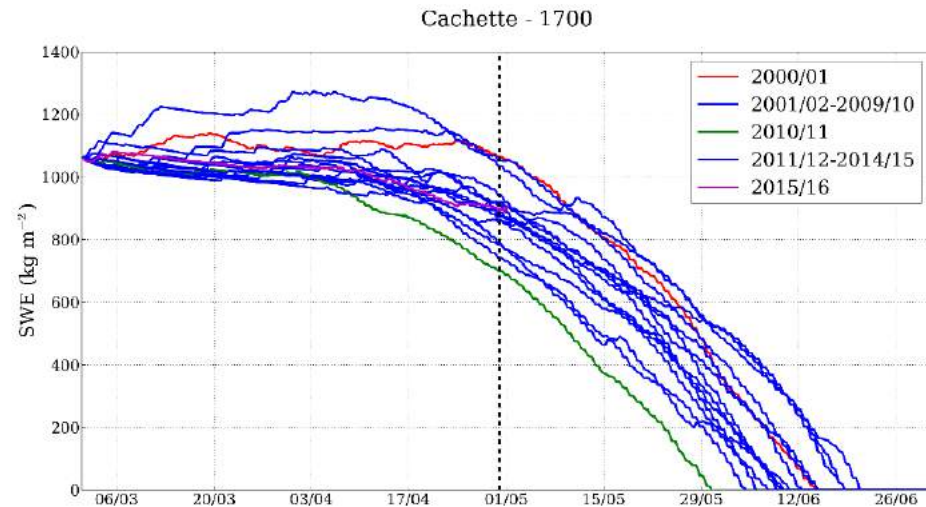
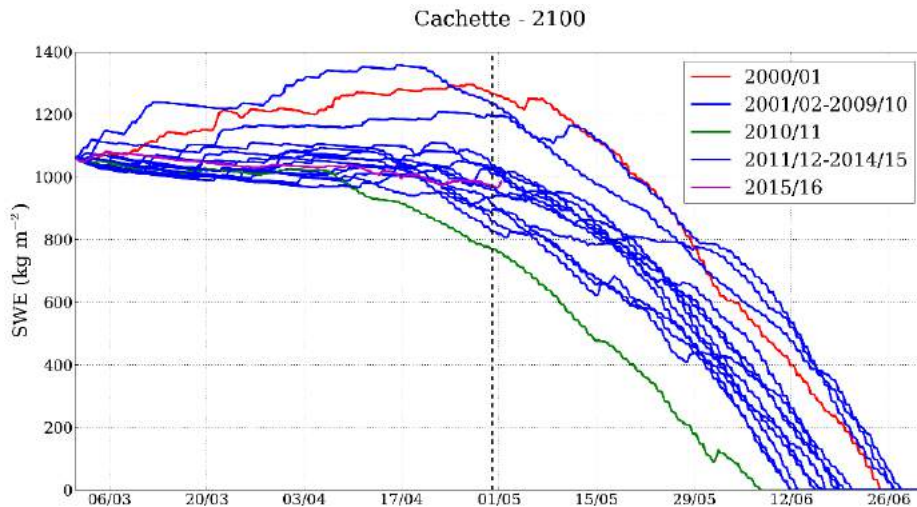


OPTIMISER LA PRODUCTION :

Estimation des seuils

Calcul du seuil de confiance :

- 1 - Simulations pour chaque saison à partir du 1^{er} mars, initialisées avec un manteau neigeux damée (2 m , $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
- 2 - Trouver la saison avec la fonte la plus rapide (2010/11)



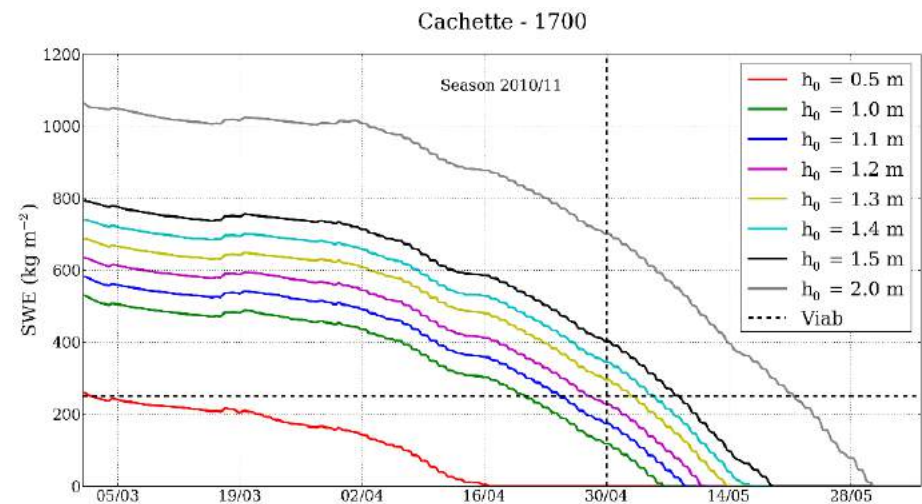
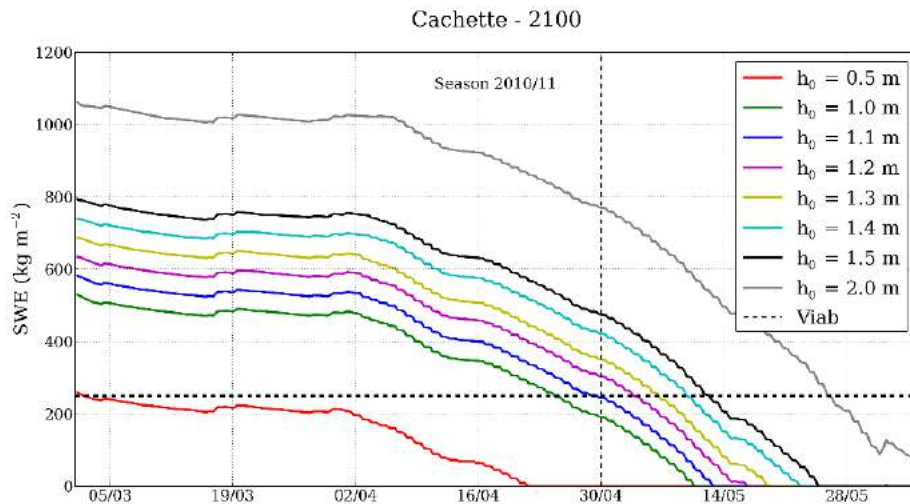
OPTIMISER LA PRODUCTION :

Estimation des seuils

Calcul du seuil de confiance :

3 - Pour 2010/11, simulations pour trouver la hauteur de neige mini au premier mars (h_0) donnant $SWE > 250 \text{ kg m}^{-2}$ and $h > 0.5 \text{ m}$ jusqu'à la fin de la saison (ex: $h_0 = 1,3 \text{ m}$ à 1700 m)

4 - Calculer h_0 et SWE_0 pour chaque tronçon

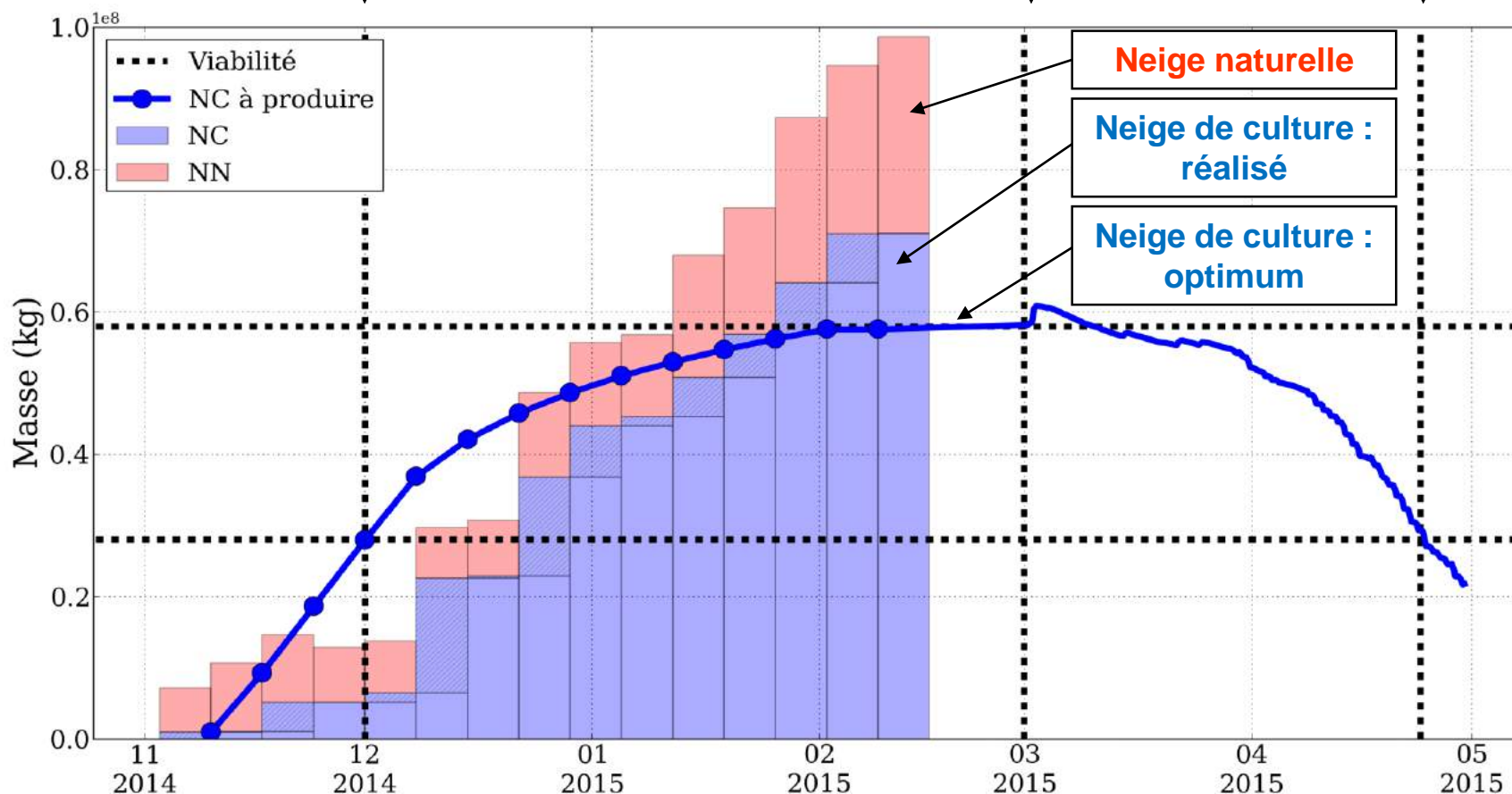


OPTIMISER LA PRODUCTION : Résultats

1 décembre : masse mini pour que la piste soit ouverte

1 mars : masse mini pour que la piste tienne jusqu'à fin saison

25 avril : fermeture



OPTIMISER LA PRODUCTION :

Résultats

Zone	Secteur	Vol eau consommés (m3)	Vol eau à consommer (m3)	Gain potentiel (m3)	Gain potentiel (euros)
Stade	1	1 274	3 517	-2 243	-2 916
	2	3 594	2 242	1 352	1 758
	3	7 146	4 142	3 004	3 905
	4	5 892	5 856	36	47
	5	3 600	3 954	-354	-460
	Total		21 506	19 711	1 795
Loisir	1	0	1 716	-1 716	-2 231
	2	1 924	2 256	-332	-432
	3	1 133	2 593	-1 460	-1 898
	4	8 585	5 957	2 628	3 416
	5	14 571	8 607	5 964	7 753
	Total		26 213	21 129	5 084

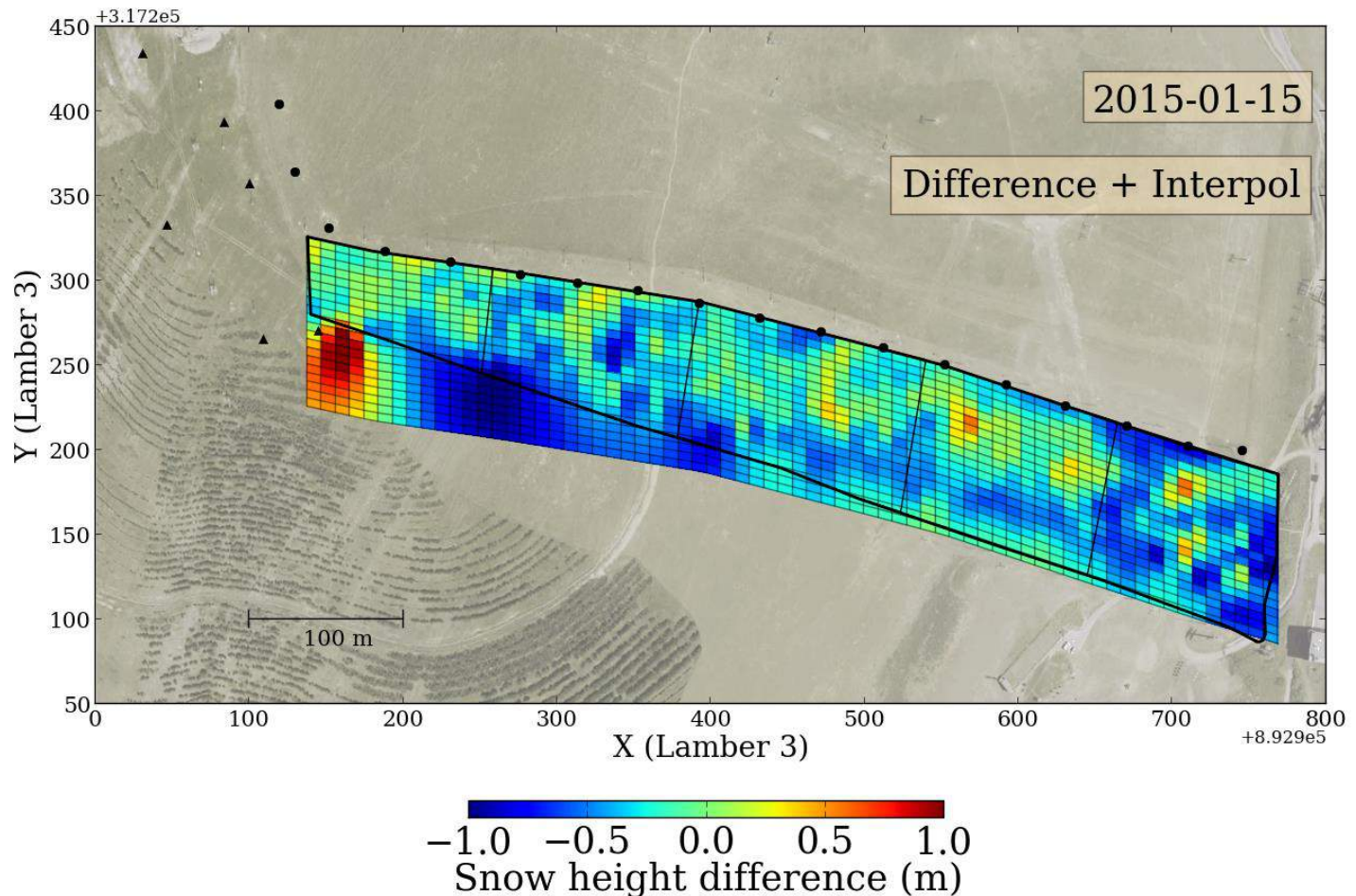
Si la saison est riche en neige naturelle, les gains sont plus importants



OPTIMISER LA PRODUCTION :

Application pour le damage

Le dameur peut savoir si, sous la surface occupée par son engin, il a un surplus ou un manque de neige par rapport aux quantités idéales





QUESTIONS ?

