



Préservation de l'eau en domaine skiable

Prévisions des conditions nivo-météorologiques pour optimiser la gestion de la neige sur les pistes de ski (projet PROSNOW)

Carlo Maria Carmagnola

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

Rencontres Eau en Montagne – Annecy – 18/10/2018

PROSNOW

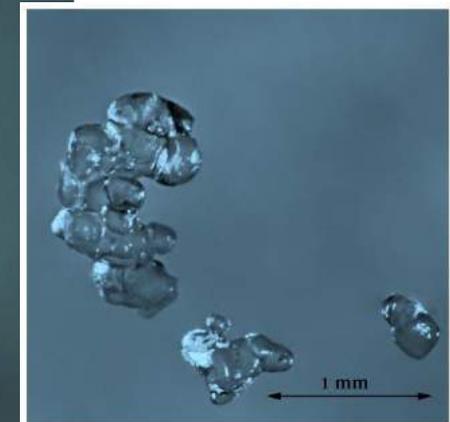
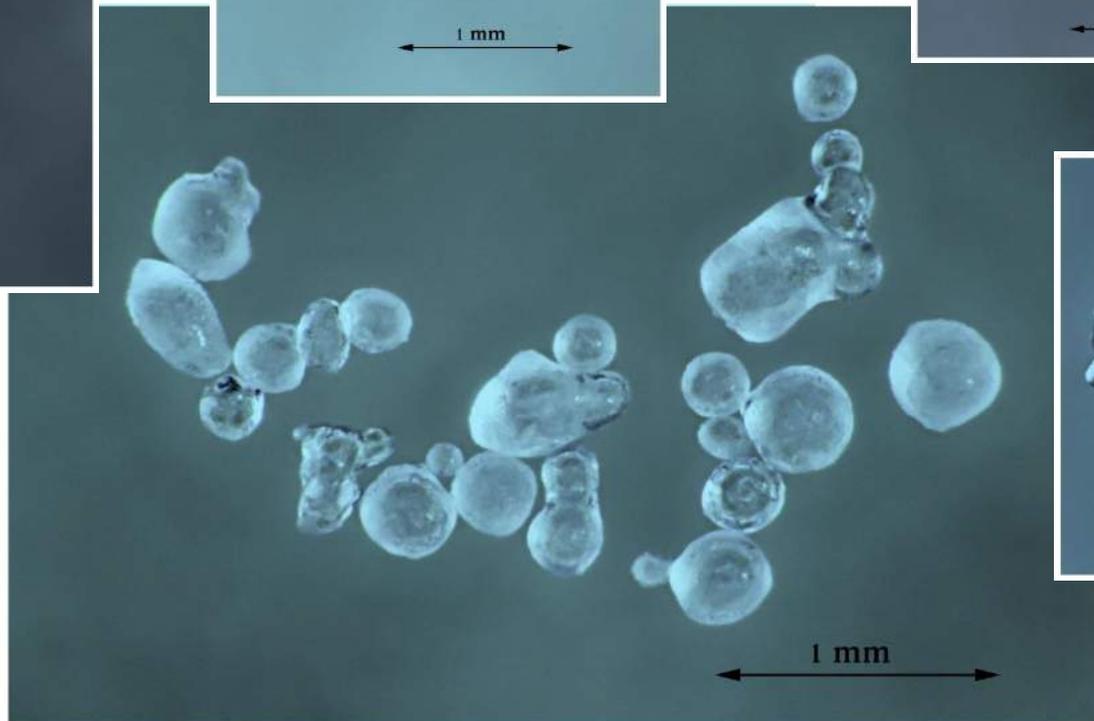
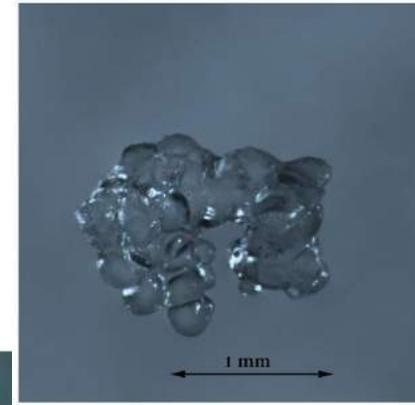
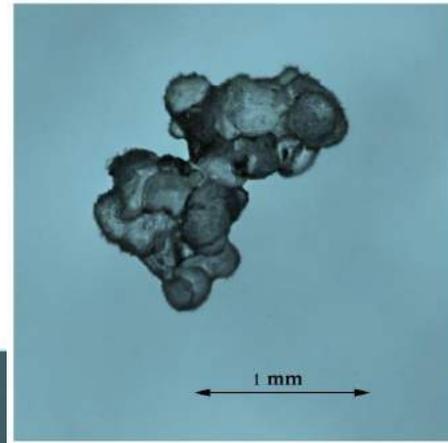
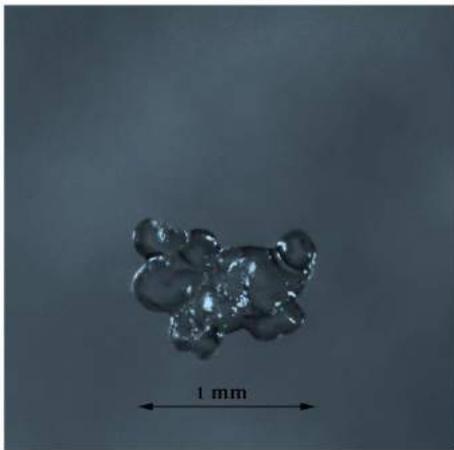
This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No730203



LA NEIGE DE CULTURE

La neige de culture

De l'eau liquide
à la glace...



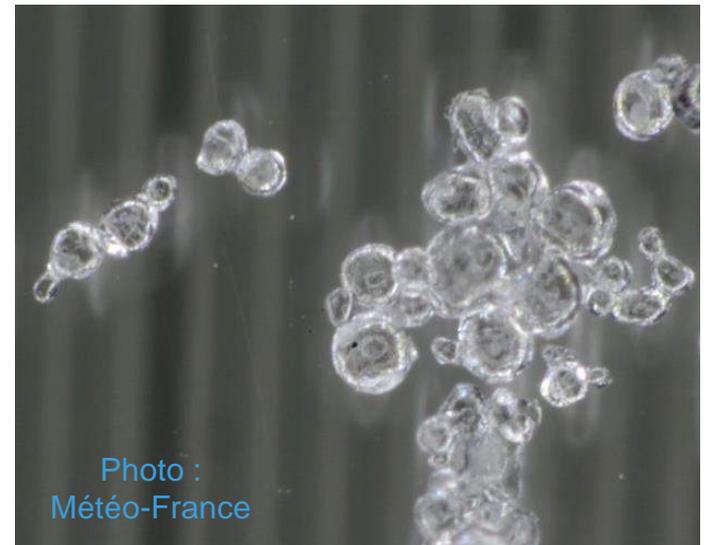
Photos :
Météo-France

La neige de culture

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/m³
- 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**

L'apport de la neige de culture

Neige de culture : 3 à 4 fois plus dense que la neige naturelle :

- Meilleur stockage des frigories
- Meilleure résistance à l'érosion (vent, carres, etc.)

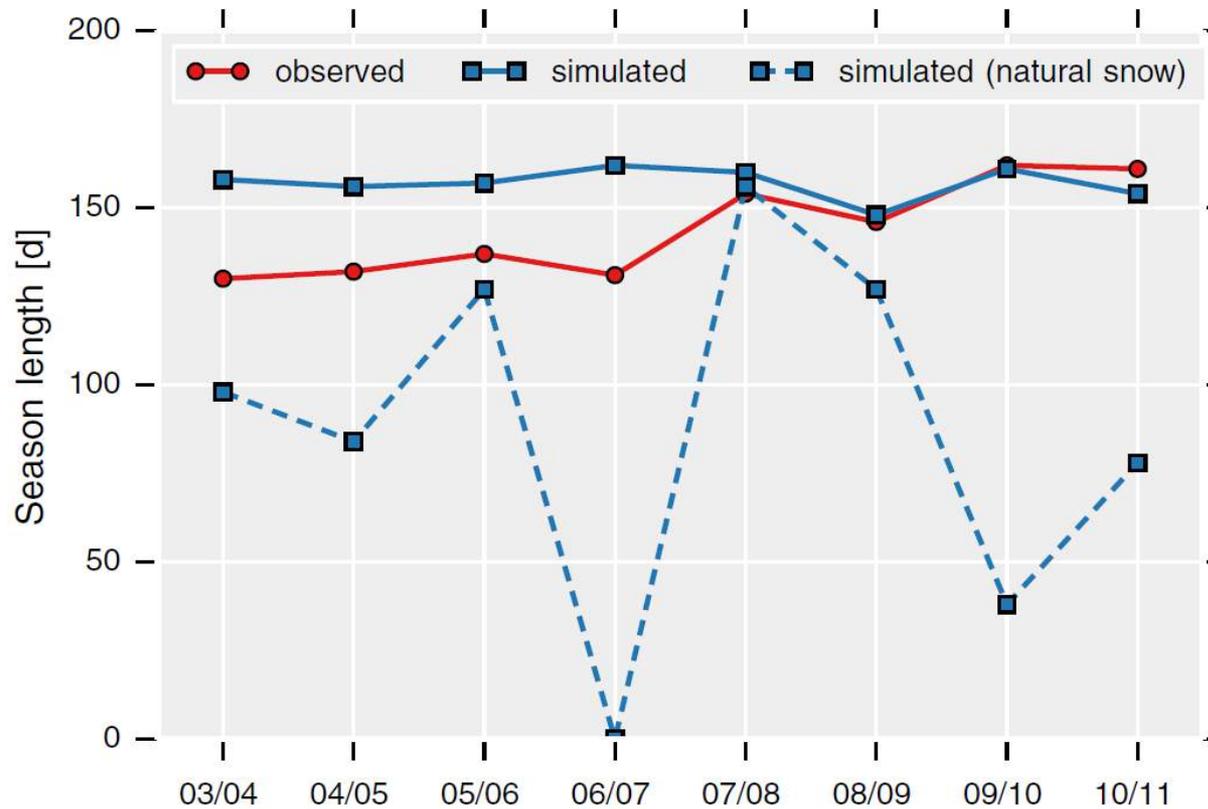
Techniquement, la neige de culture a 3 fonctions principales :

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. Conforter les zones d'usures (soit un préventif par surépaisseur, soit en curatif par production au jour le jour) = neige sèche souple à skier
3. A minima, garantir la fonctionnalité de l'ossature du domaine skiable



L'apport de la neige de culture

Effet de la production de neige sur la longueur de la saison



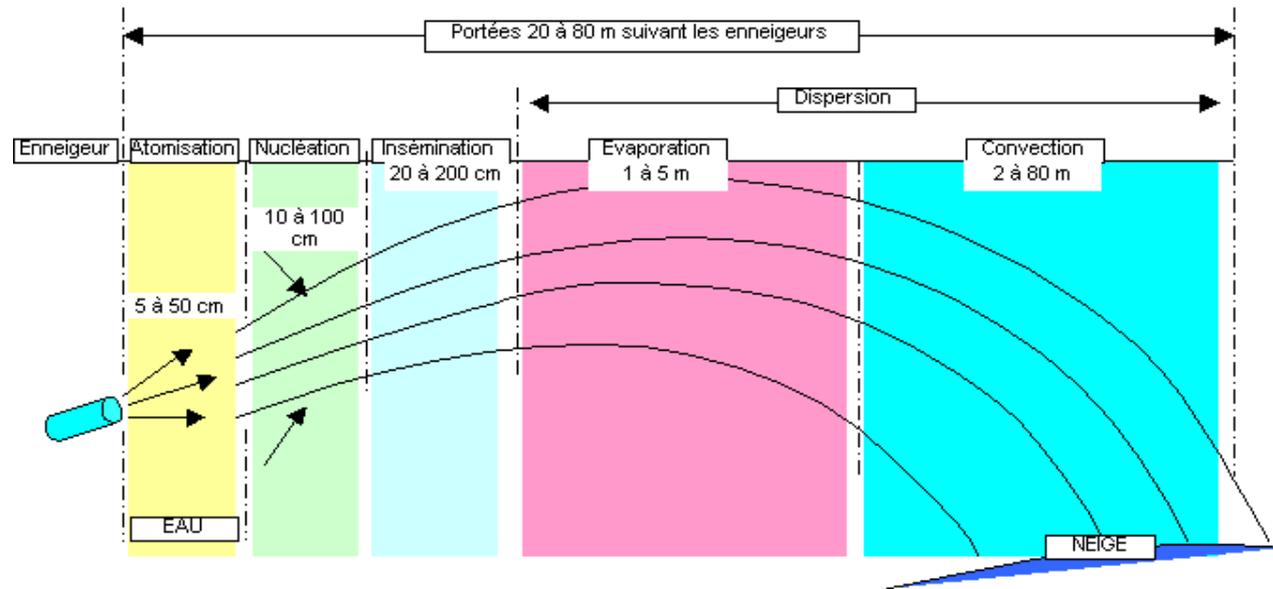
Comment ça marche?

Pour produire de la neige, il faut des conditions extérieures ad hoc :

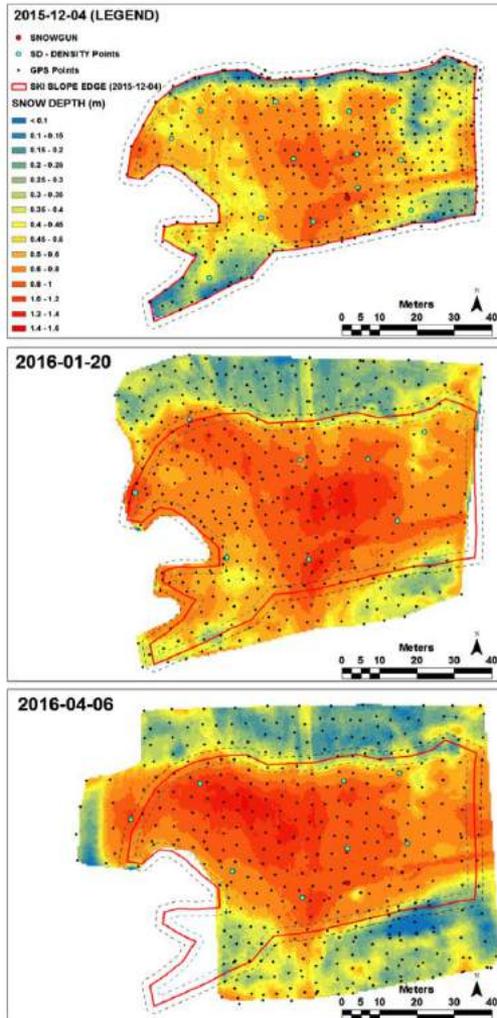
- Des frigidités (commerciallement : -2°CH / dans les faits : -4°CH)
- Un taux d'humidité $< 60\%$
- Des conditions de vent acceptables ($< 10 \text{ km/h}$)

Neige de culture
= Mélange d'eau et d'air sous pression

- Buses de différents diamètres qui fragmentent l'eau en de très fines gouttelettes
- Gouttelettes projetées (par la détente de l'air) dans l'air ambiant à T° négative
- Elles captent les frigidités = transformation de l'eau en neige



Pertes lors de la production



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% :

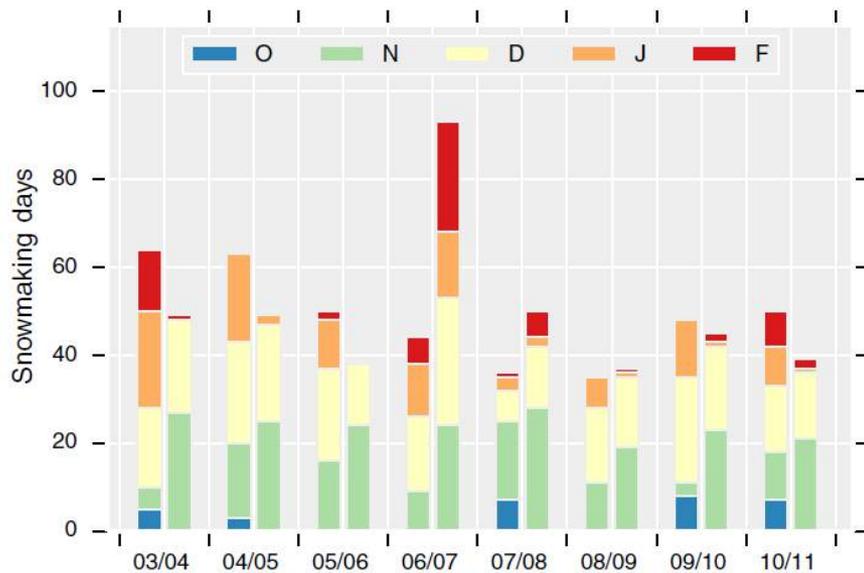
- < 10% thermodynamiques
(évaporation, sublimation)
- > 30% mécaniques
(vent, dépôt derrière l'enneigreur,
dépôt en dehors de la piste)

Conditions de production

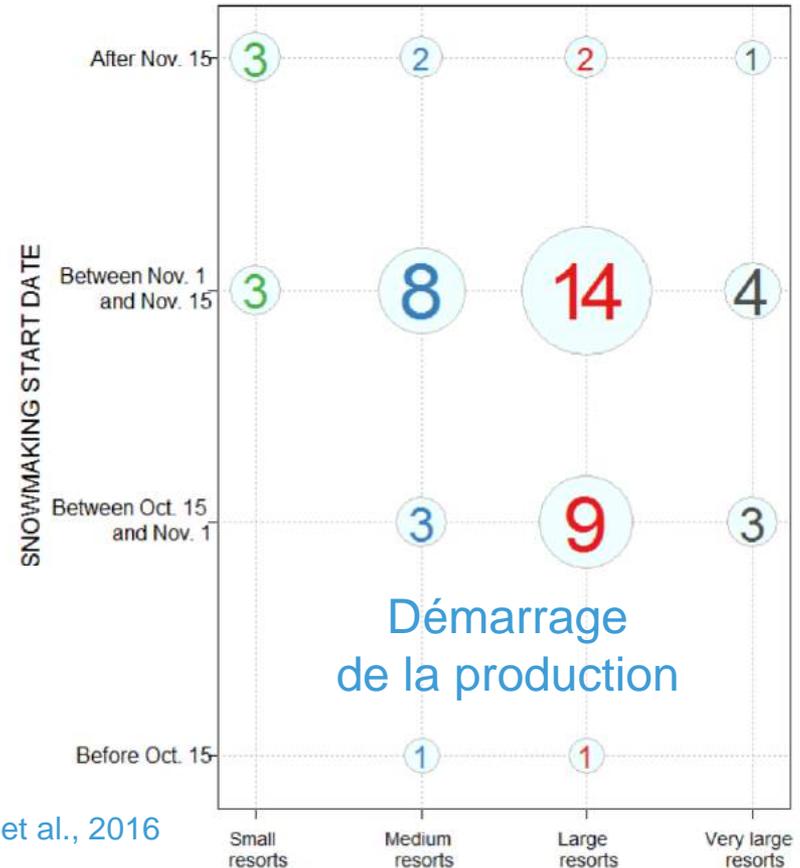
Contrainte annuelle

- Pas de production avant le 01/11
- 50% de production avant le 20/12
- 40% entre le 20/12 et le 20/02
- 10% entre le 20/02 et le 31/03
- Pas de production après le 01/04

Jours de production



Fischer et al., 2016



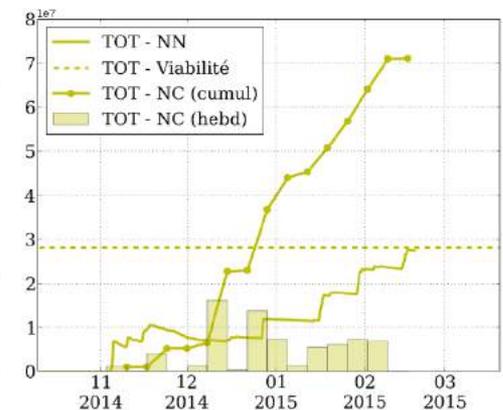
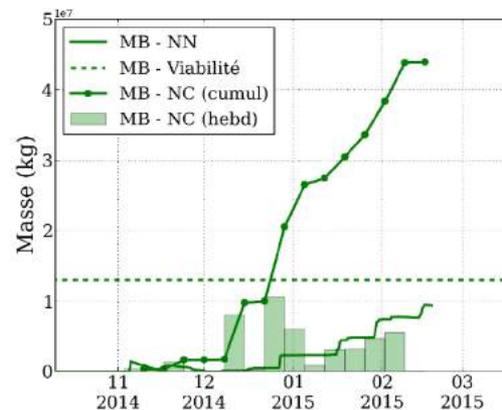
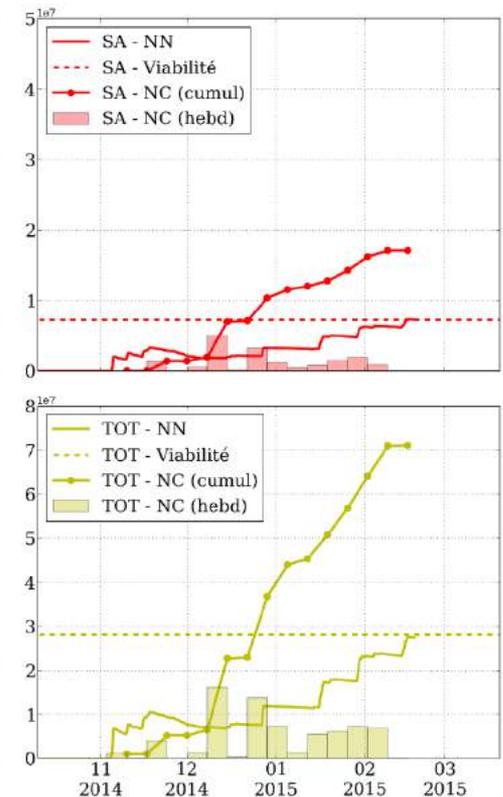
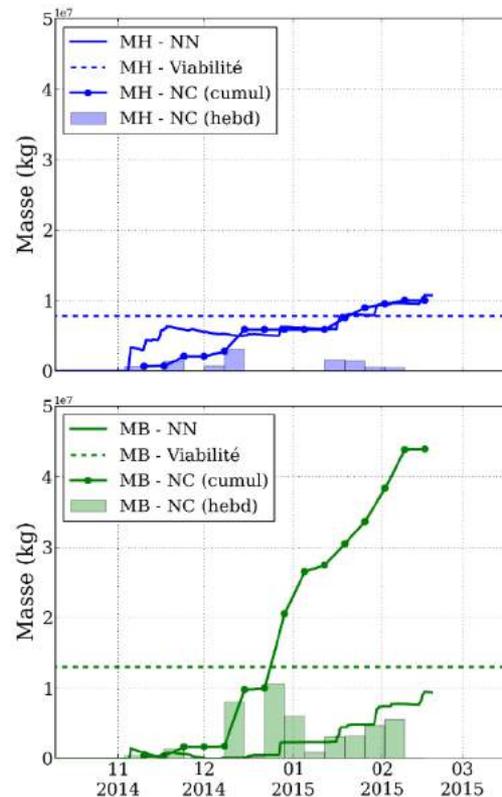
Spandre et al., 2016

Masses de neige produites

- Surface couverte = 3300 m² par enneigeur (soit 3 enneigeurs/ha)
- 1 ha de piste enneigé nécessite l'apport d'environ 4000 m³ d'eau
- Durée de fonctionnement (moyenne) = 150 hr/an
- Masse produite par enneigeur par an (moyenne) = 800 t

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

Exemple :
Serre Chevalier
Piste Marteau



Surfaces équipées

Resorts categories	Small resorts (S)	Medium resorts (M)	Large resorts (L)	Very Large resorts (XL)
Ski slopes surface equipped with snowmaking facilities (%)	18 ± 25	34 ± 16	35 ± 21	34 ± 24
Number of air/water guns per surface of equipped ski slopes (ha⁻¹)	3.1 ± 2.5	2.5 ± 1.1	2.6 ± 1.7	3.0 ± 0.8
Number of fan guns per surface of equipped ski slopes (ha⁻¹)	0.4 ± 0.3	0.2 ± 0.3	0.2 ± 0.2	0.1 ± 0.1
Total reservoirs capacity per surface of equipped ski slopes (m³ ha⁻¹)	1450 ± 2350	1800 ± 1650	1700 ± 1600	1500 ± 1300

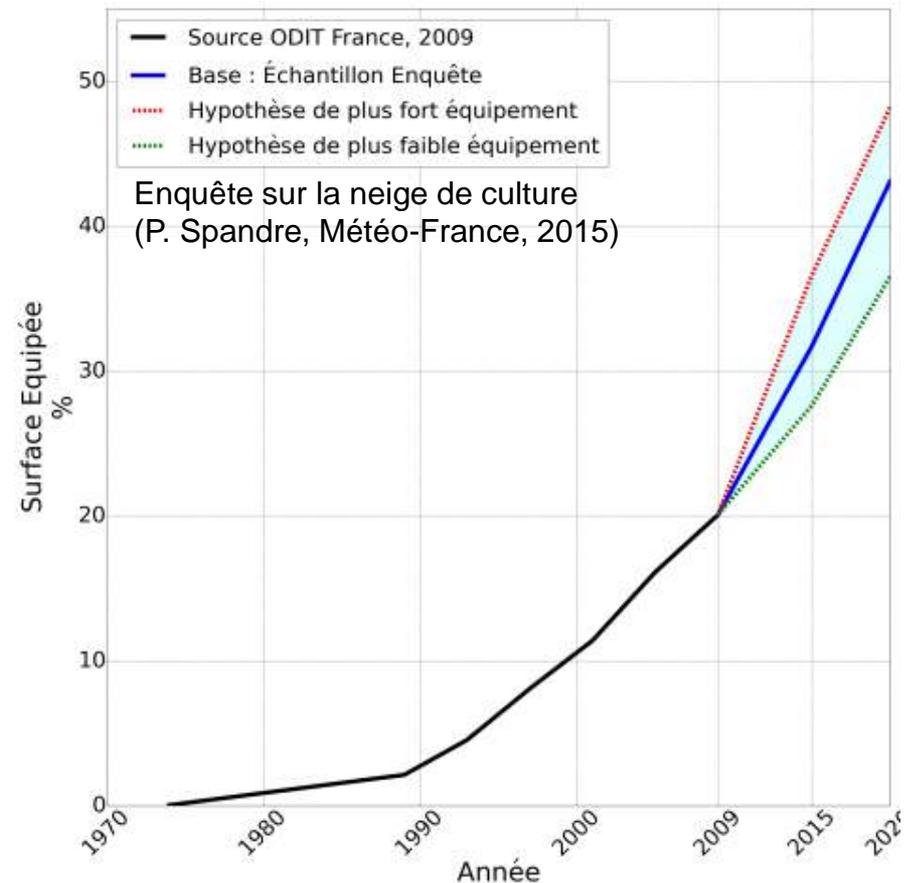
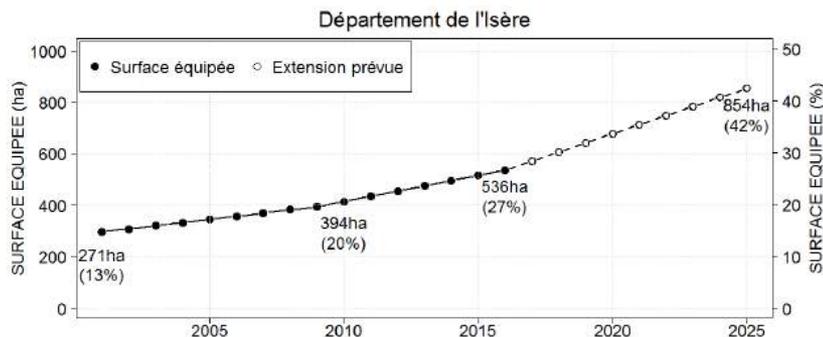
Surfaces équipées

La France présente un **faible taux de couverture** en neige de culture (source DSF) :

- France = 32%
- Suisse = 55%
- Autriche = 65%
- Italie = 70 à 80%

Augmenter les surfaces équipées en neige de culture. En 2020 :

- Très grandes stations = 49%
- Grandes stations = 47%
- Moyennes stations = 39%
- Petites stations = 34%



Coûts

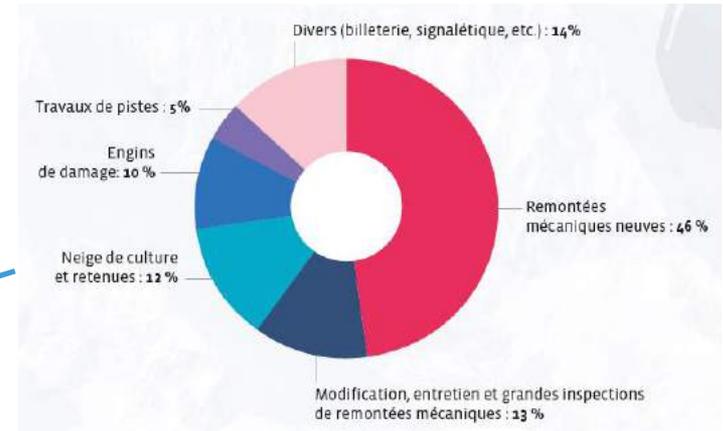
Investissement

150 000 € pour enneiger 1 ha de piste (extension)

En fonction des modes de gérance, l'amortissement se fait entre 10 et 25 ans

300-400 millions d'euros ont été investis par an sur les domaines skiables français, tous aménagements confondus

La part de la neige de culture pèse 12% de l'investissement

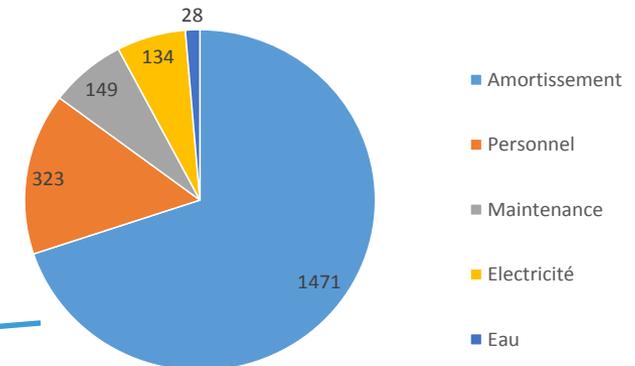


Exploitation

- **1 m3 de neige** consomme entre **2,00 et 3,00 kWh**
Consommation divisée par 2 en 10 ans
- **1 m3 de neige** coûte à l'exploitant environ **1,5 €**, produit et travaillé

70% du coût va au remboursement de l'investissement

Coûts du service neige de culture (k€)



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.

- Production de neige en température marginale production
- Augmentation du point de nucléation de l'eau jusqu'à environ -3°C
- 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).

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

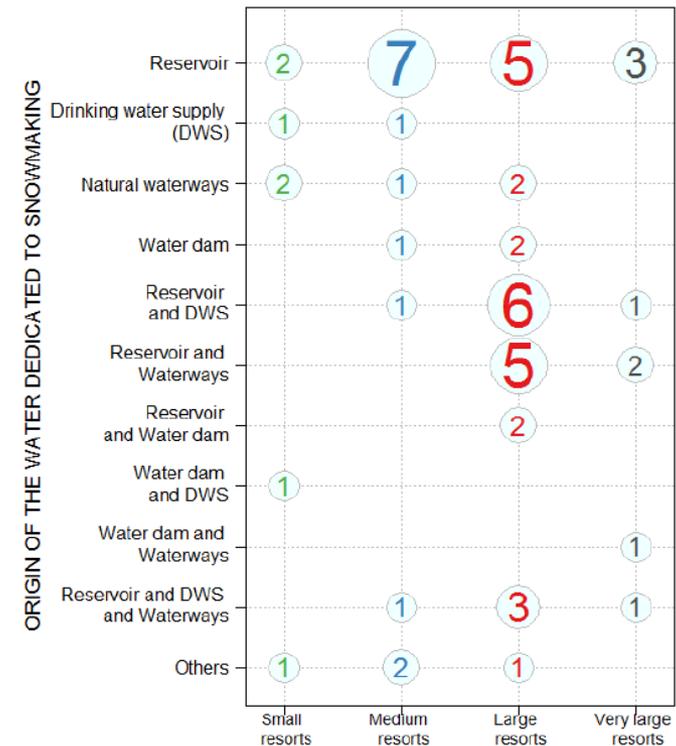


Prélèvement temporaire et non consommation :
 Eau restituée entièrement à la nature au printemps
 (70-90% par infiltration d'eau liquide dans le sol,
 10-30% par évaporation)

17 millions de m³

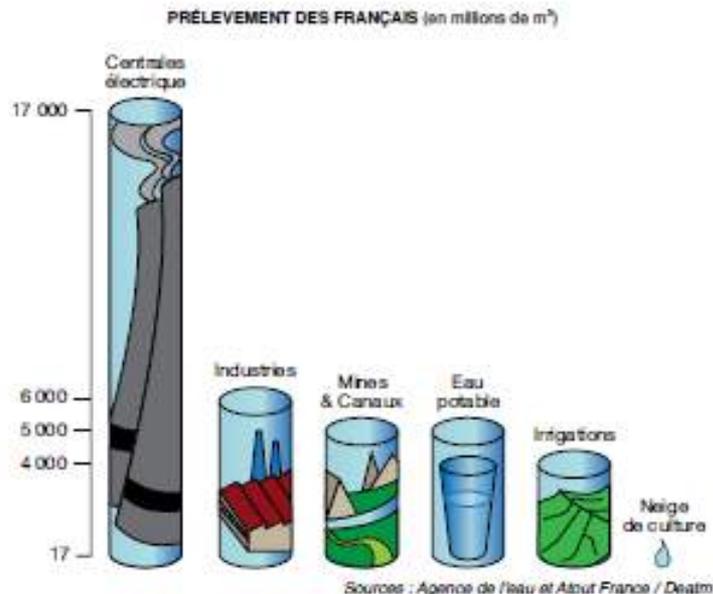
Eau propre entièrement restituée au milieu naturel
 Pour fixer les idées :

- 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



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

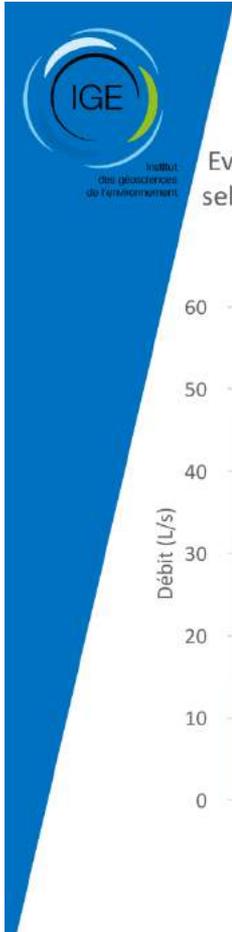
- Reçoit 2 000 000 000 de m³ de précip. annuelles
- EDF turbine 400 000 000 de m³
- La population consomme 20 000 000 de m³
- La neige de culture consomme 3 000 000 de m³

France

Parc de barrages EDF = plus de 7 milliards de m³

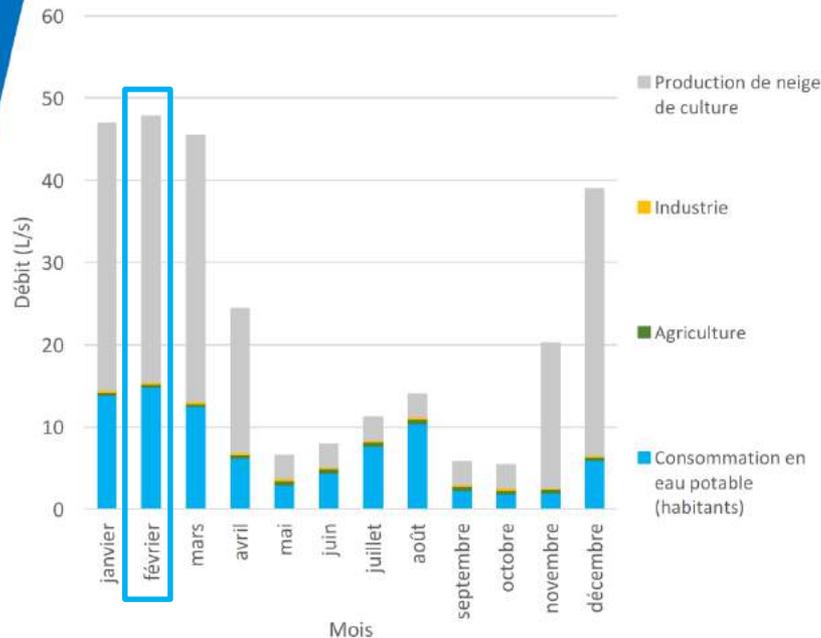
15 à 20 millions de m³ par an pour la neige de culture
(l'équivalent de la consommation d'eau de Grenoble)

Ressource en eau



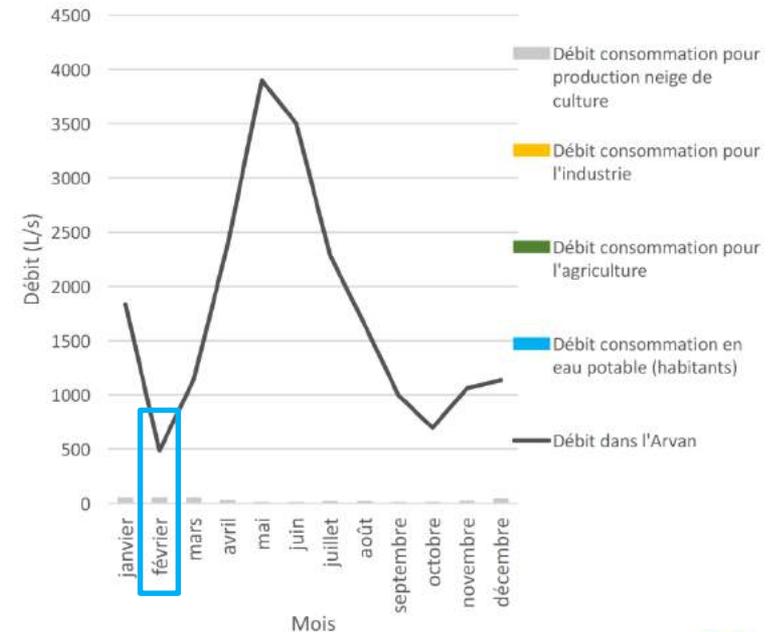
Consommation mensuelle d'eau selon les différents usages et ressource en eau disponible

Evolution mensuelle du débit de consommation en eau selon les usages dans le bassin versant de l'Arvan (2010-2012)



Bassin versant de l'Arvan

Comparaison mensuelle du débit dans l'Arvan et des débits de consommation de 2010 à 2012



Antoinette Jestin. *Estimation spatialisée et saisonnalisée des prélèvements anthropiques sur le bassin versant de l'Arvan à St Jean d'Arves : implications pour la ressource en eau.* Rapport de stage de fin d'études, 2018, 56p.

Consommation en eau

Épaisseur de neige minimale pour skier avec sécurité:

- 30 cm sur une piste bien nivelée,
- 60 cm sur un terrain rocheux ou parsemé de souches,
- 1 m si on additionne la surproduction.

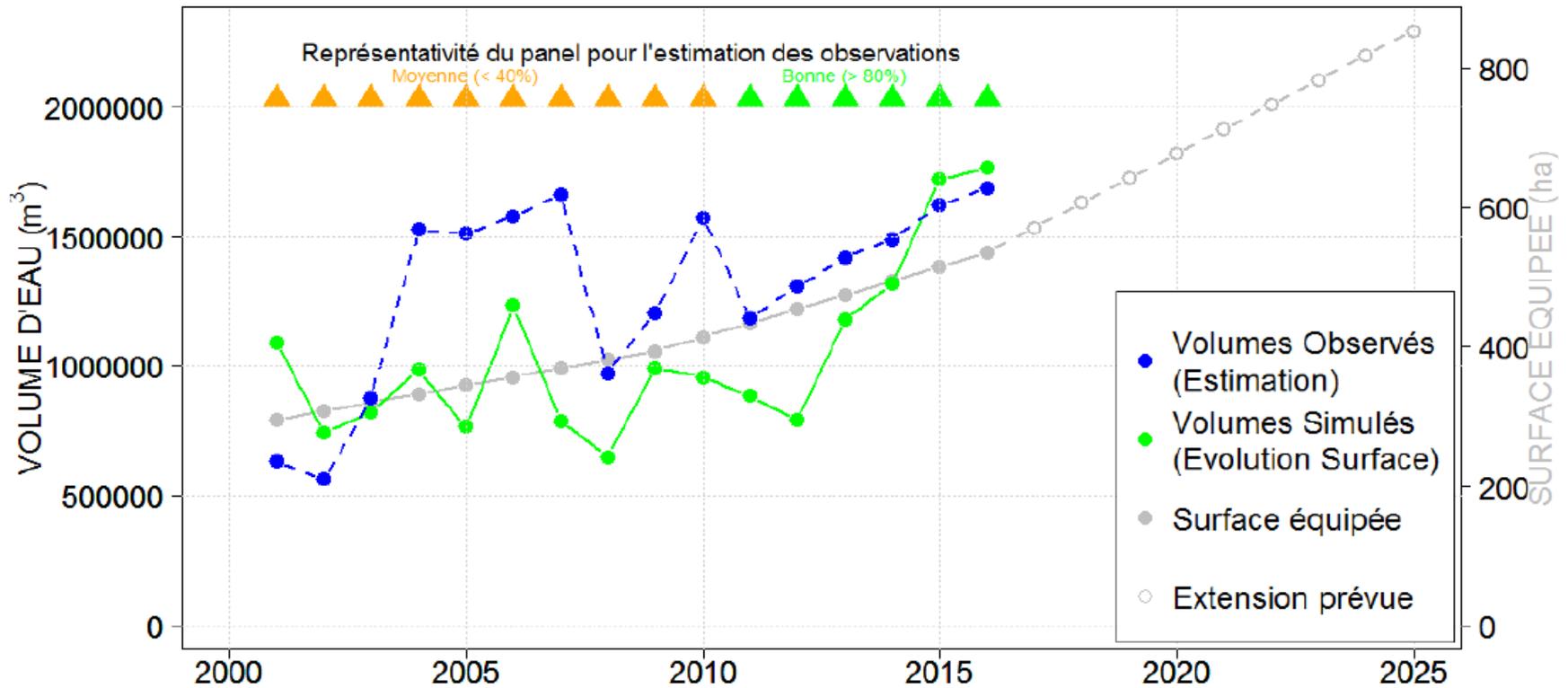
Si on considère qu'il faut $0,5 \text{ m}^3$ d'eau pour fabriquer 1 m^3 de neige (pas de pertes), cela correspond à une consommation de **5000 m^3 d'eau par hectare** (besoin ponctuel maximum).

La consommation d'hiver est comprise pour la plupart des stations entre **2000 et 4000 m^3/ha** , avec une moyenne de **$3000 \text{ m}^3/\text{ha}$** .

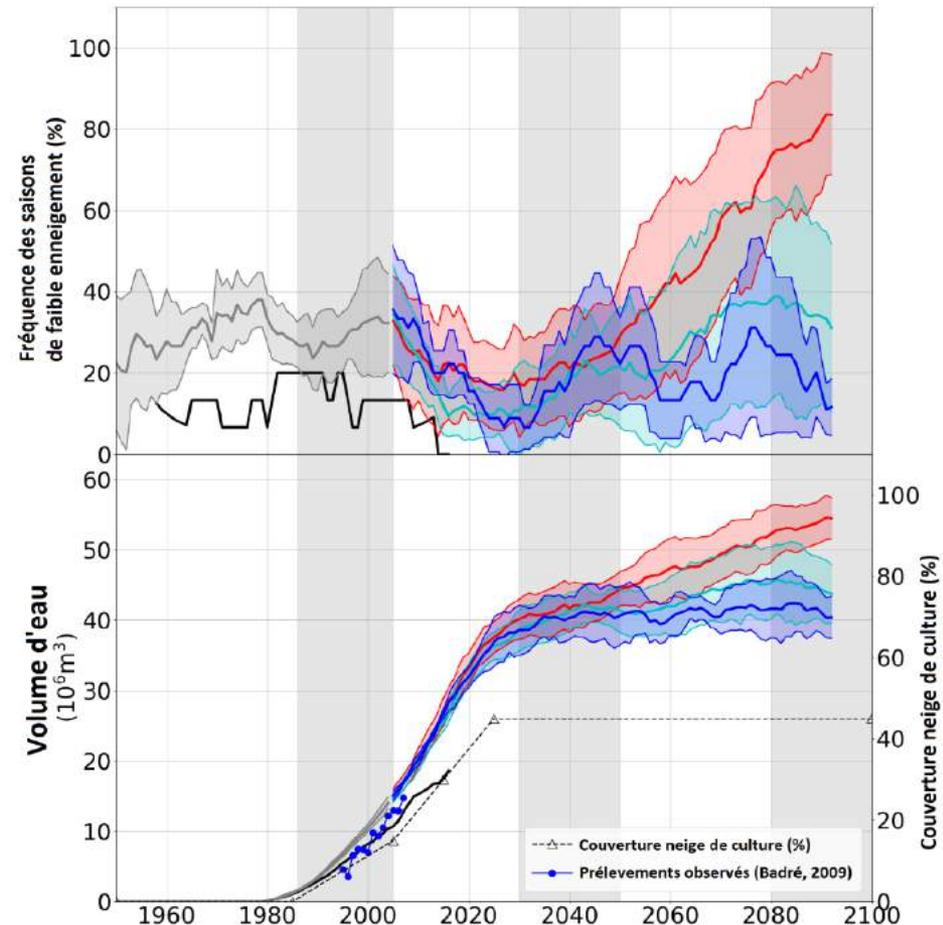
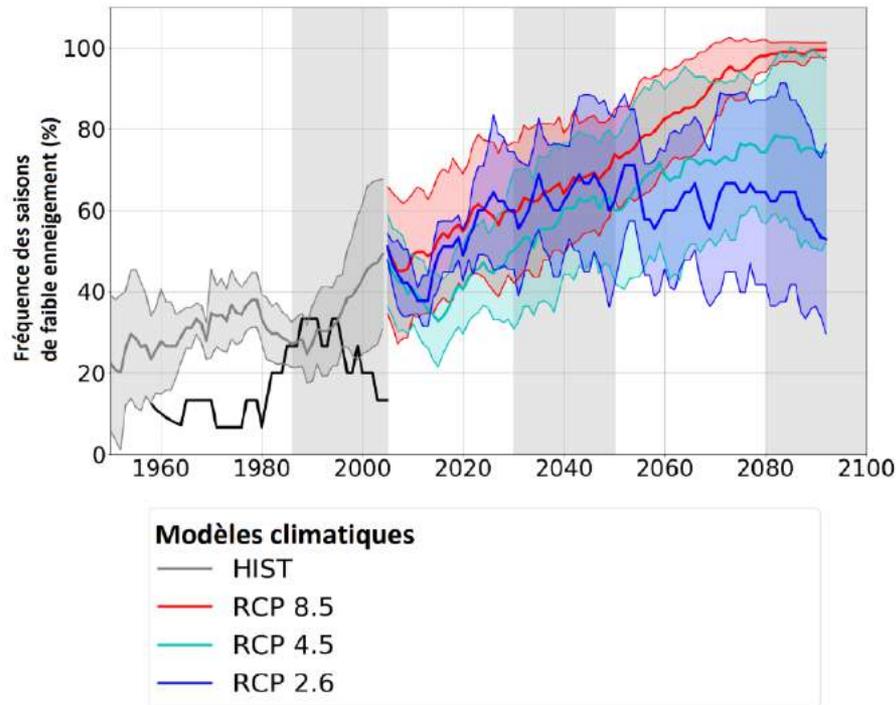
La capacité moyenne de stockage des retenues d'altitude des stations françaises est de **$1500\text{-}1800 \text{ m}^3/\text{ha}$** . Ces retenues, qui peuvent souvent être réalimentées au cours de la saison, fournissent aujourd'hui 65 % de l'eau utilisée pour la production de neige de culture en France.

Consommation en eau

Département de l'Isère



Consommation en eau



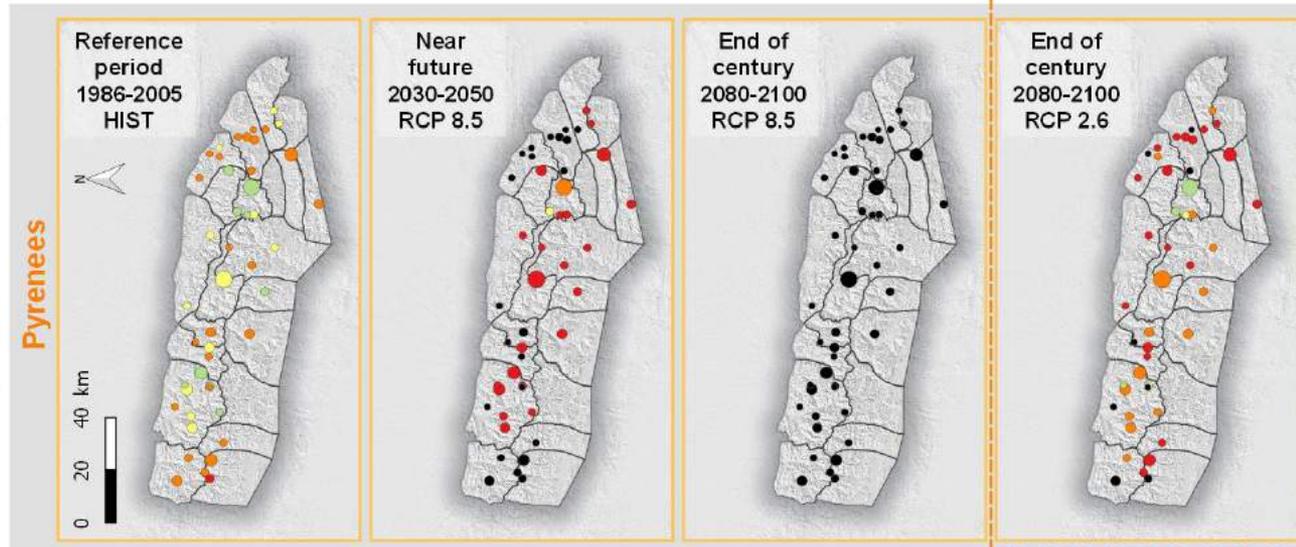
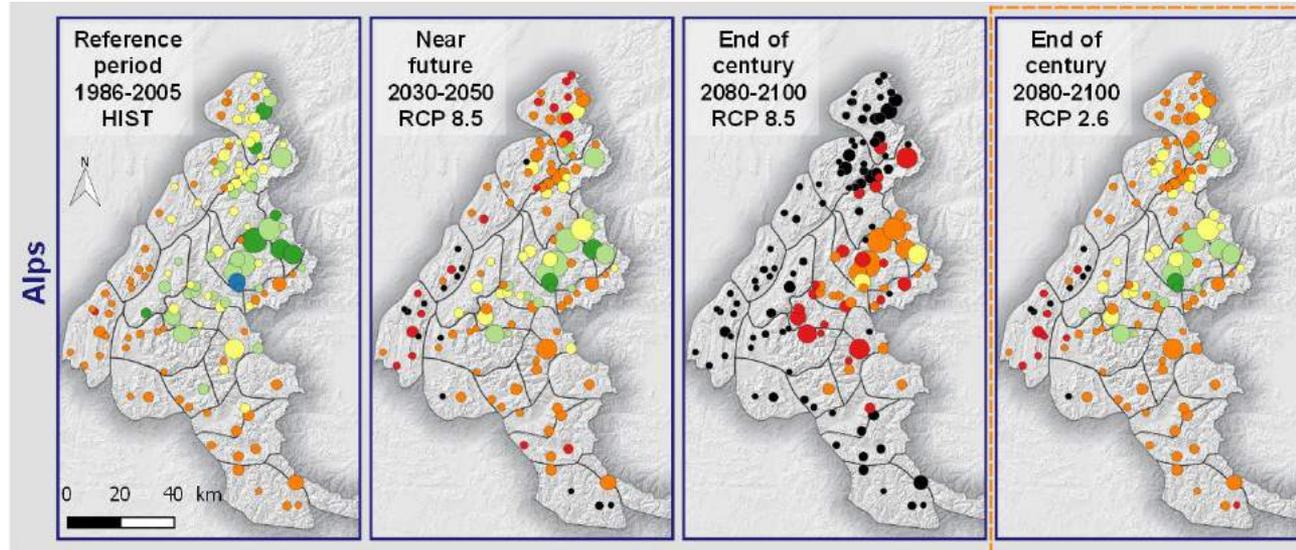
- ⇒ Neige naturelle damée (gauche) et Avec neige de culture (droite)
- ⇒ Consommation d'eau: fortement liée à l'évolution de surface équipée...
... et au besoin à l'hectare (augmentation de 10 à 20% en milieu de siècle)

Consommation en eau

Snow Reliability Alps - Pyrenees

Categories

- 1 ■
- 2 ■
- 3 ■
- 4 ■
- 5 ■
- 6 ■
- 7 ■





LE PROJET PROSNOW

Mais ce résultat est difficile à atteindre !

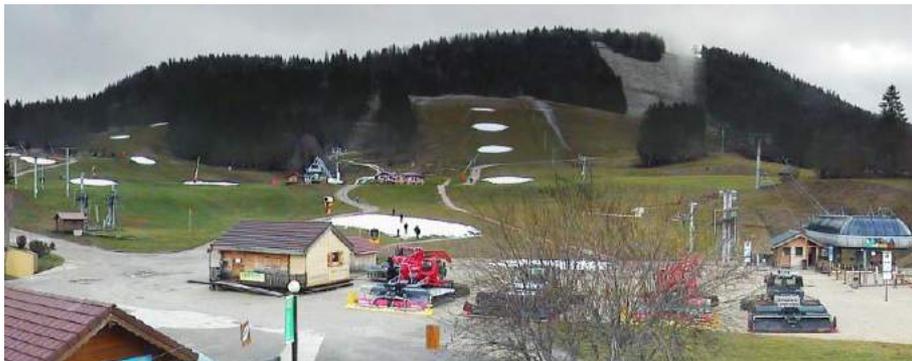
Manque de neige en début de saison
(production trop tôt, stock d'eau épuisé)
-> mauvais timing de production

Super-Besse (France), décembre 2017



Excès de neige en fin de saison
(trop de production)
-> mauvais objectif de production

Killington (US), juin 2017



Est-ce qu'on peut faire mieux ?

PROSNOW (2017-2020)

Prévisions des conditions nivo-météorologiques
pour optimiser la gestion de la neige sur les pistes de ski

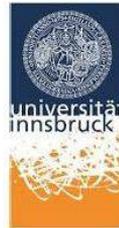


Projet financé par l'Union Européenne

Le consortium de PROSNOW

Un ensemble de compétences diverses

- Partenaires scientifiques / recherche



- Partenaires industriels



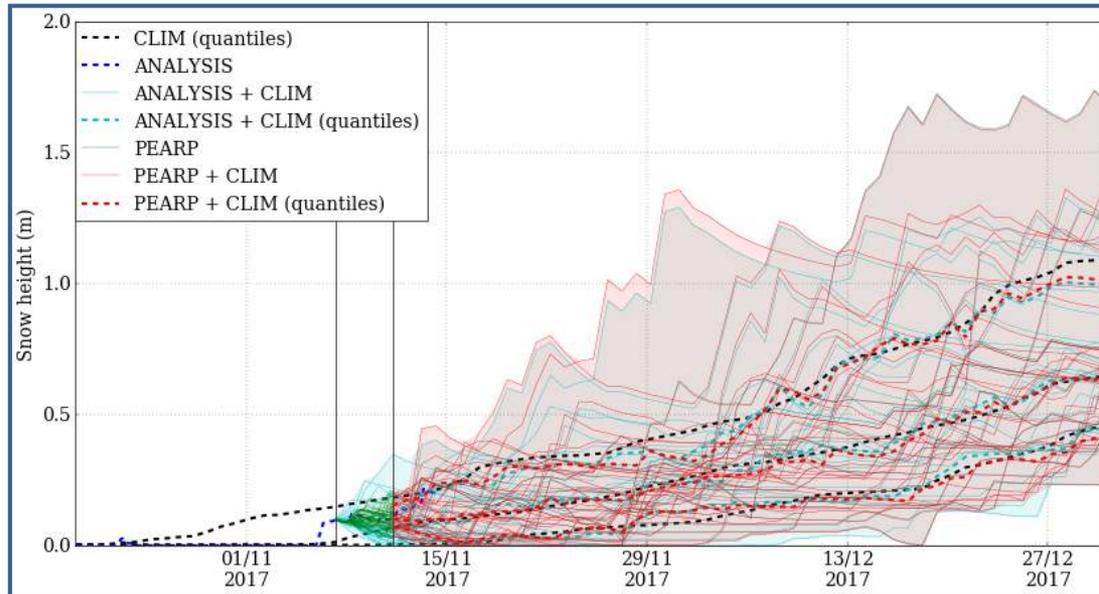
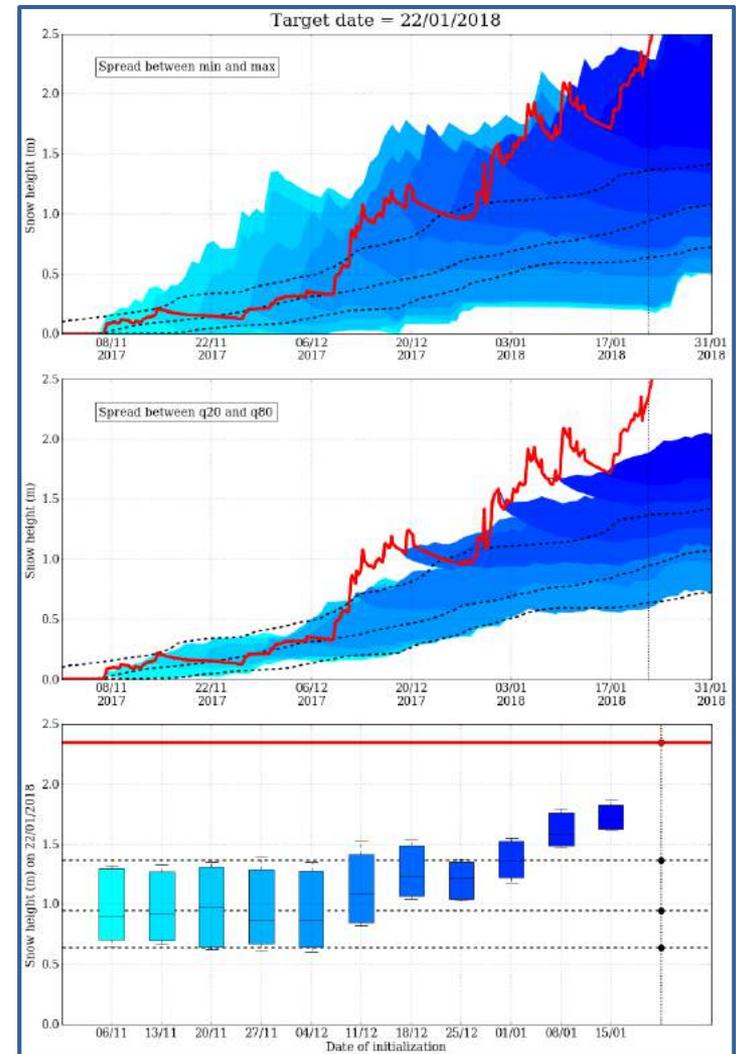
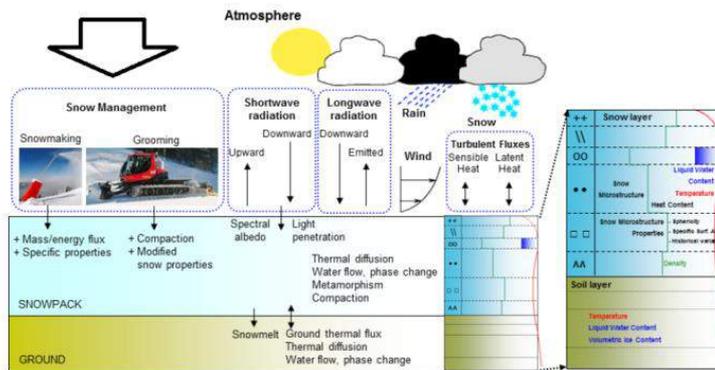
- Partenariat avec 8 stations de sport d'hiver

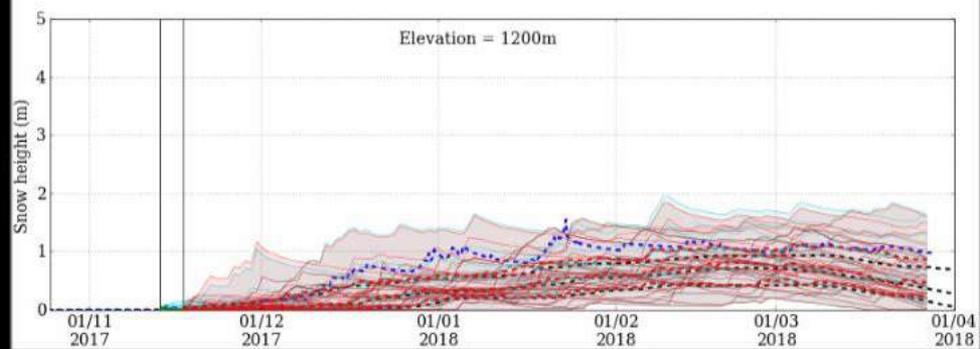
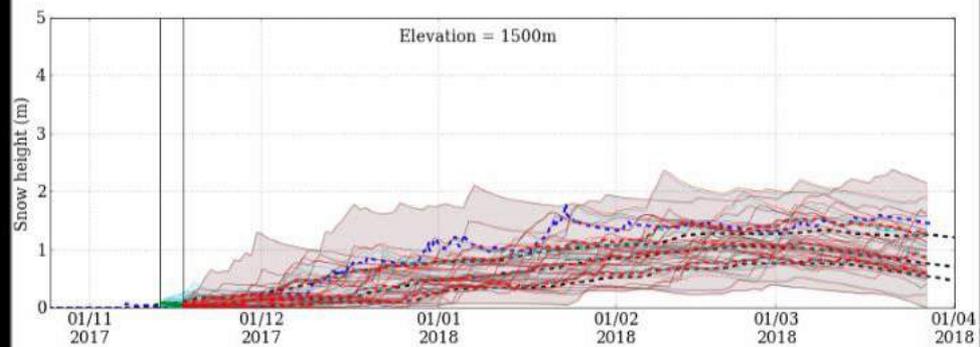
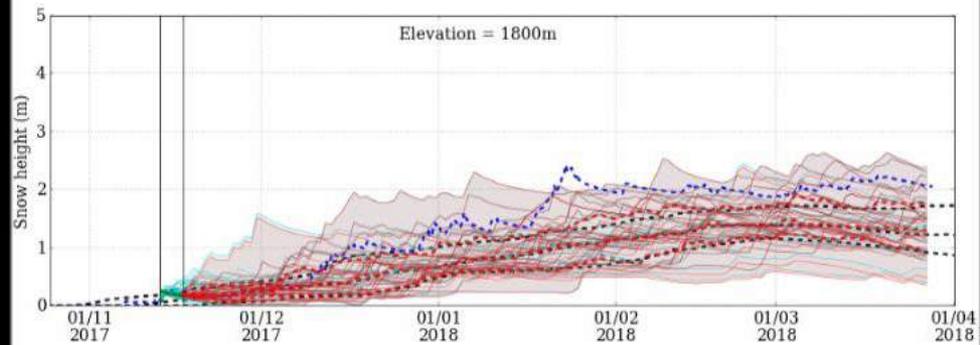
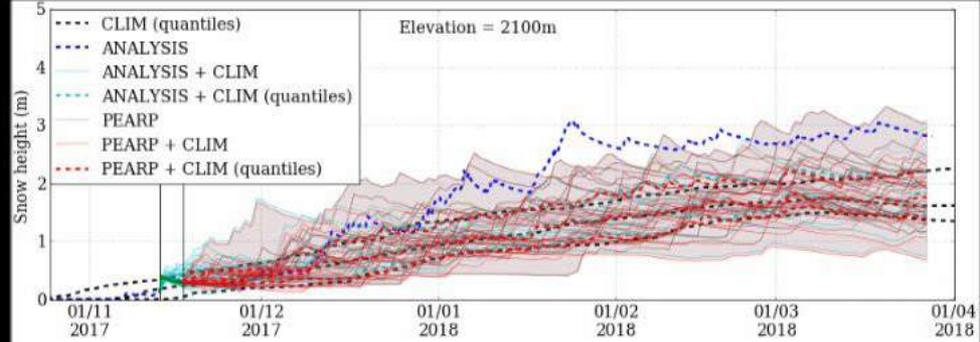


Les nouveautés de PROSNOW

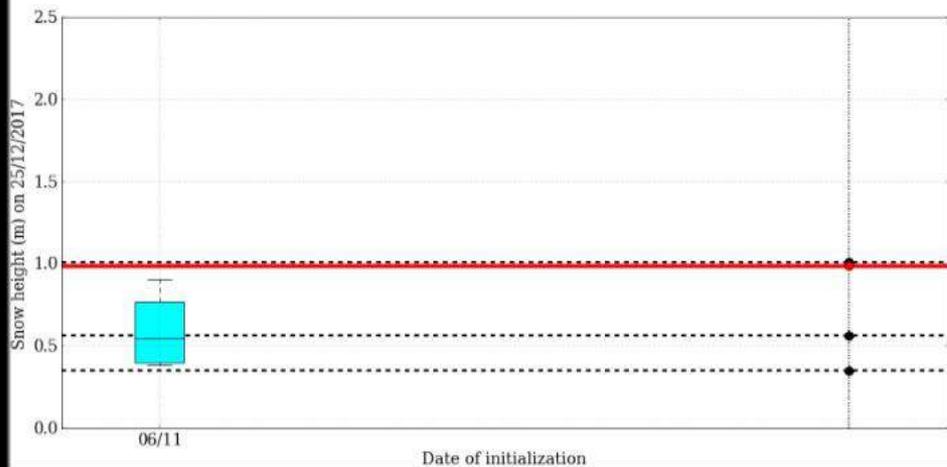
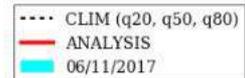
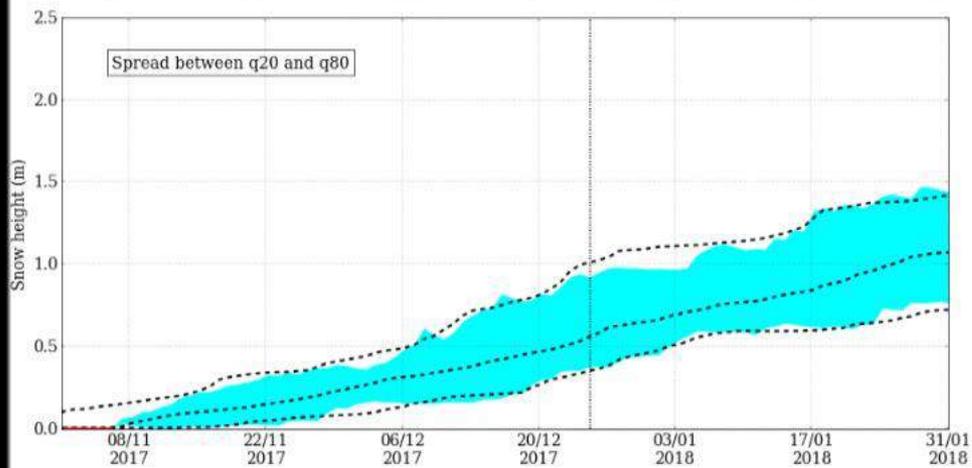
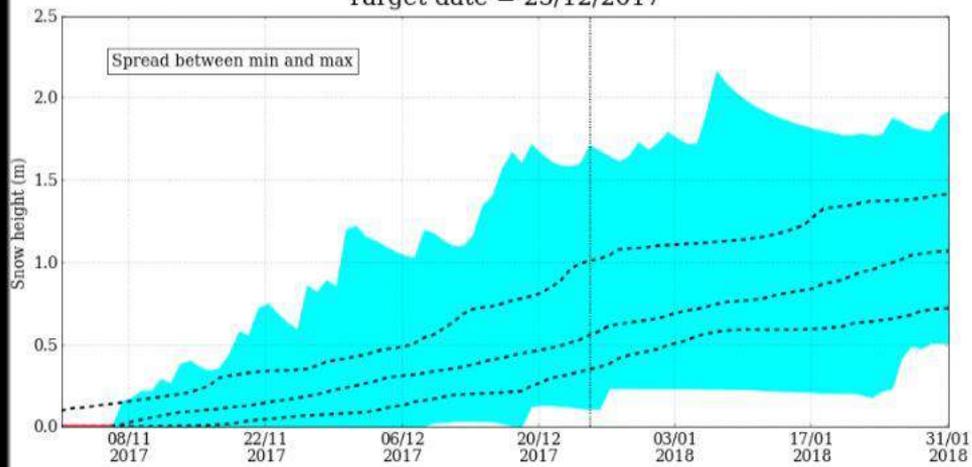
Simulations des conditions d'enneigement (hauteur et stock de neige):

- a - pilotées par les forçages prévisionnels





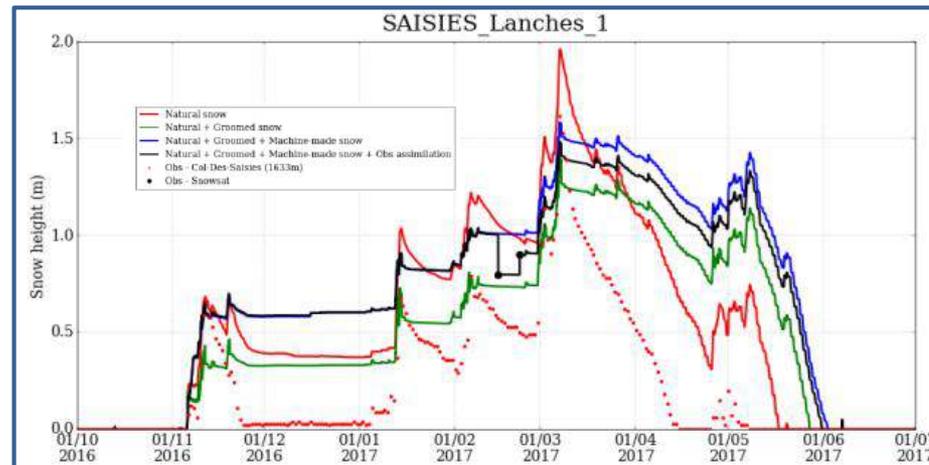
Target date = 25/12/2017



Les nouveautés de PROSNOW

Simulations des conditions d'enneigement (hauteur et stock de neige):

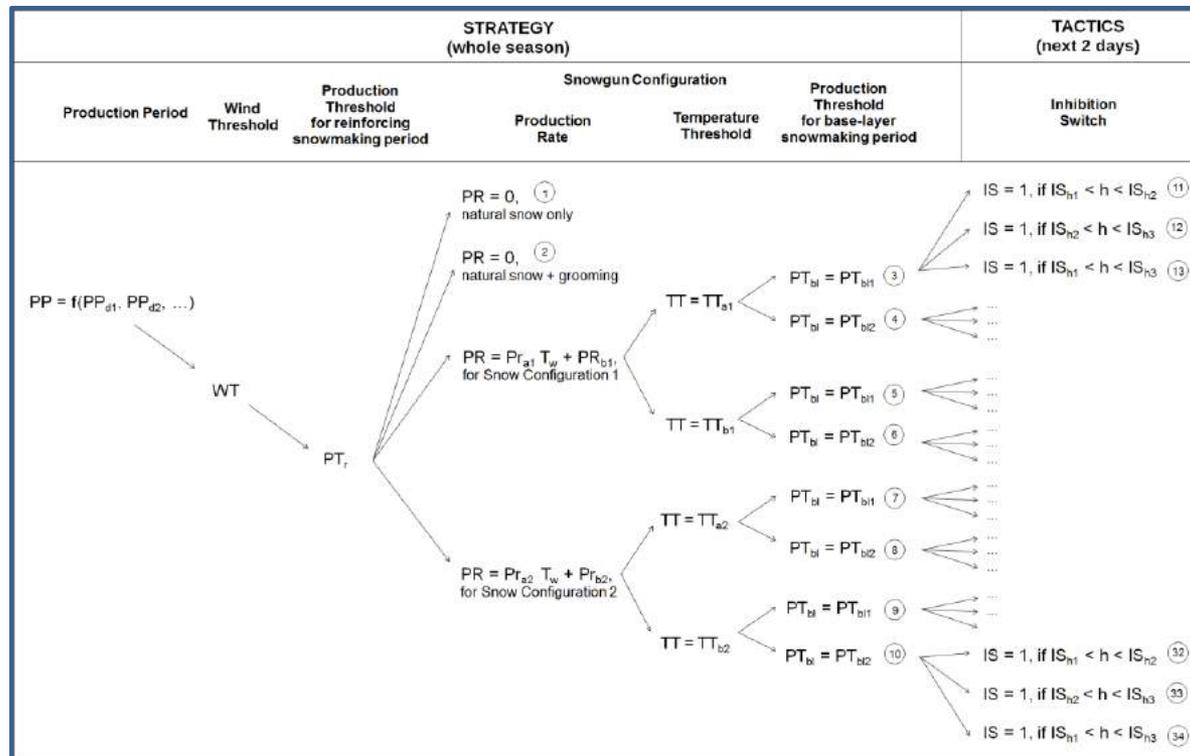
- a - pilotées par les forçages prévisionnels
- b - initialisées avec mesures in-situ
(volumes d'eau consommés, hauteur de neige sur les pistes)



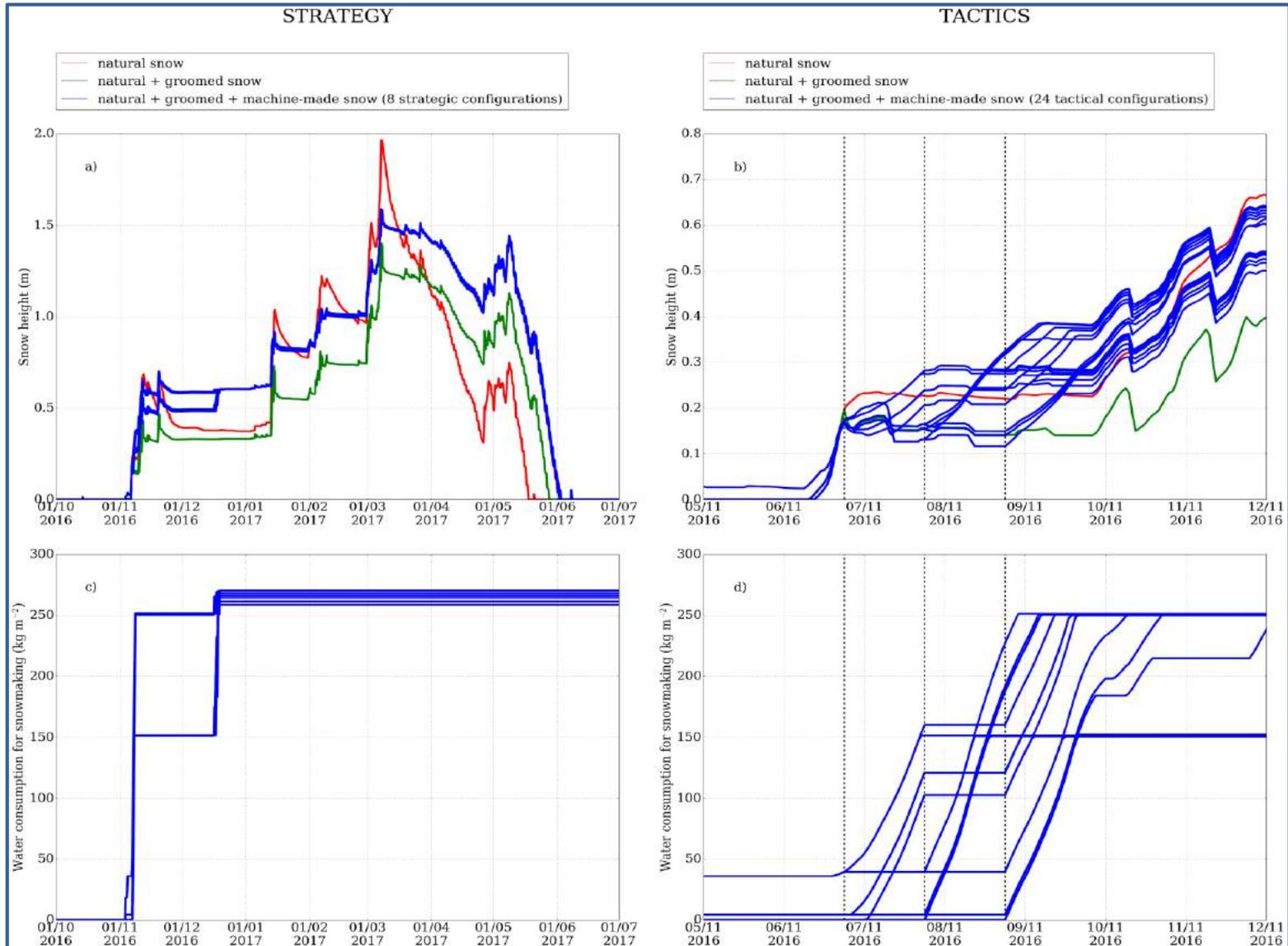
Les nouveautés de PROSNOW

Simulations des conditions d'enneigement (hauteur et stock de neige):

- a - pilotées par les forçages prévisionnels
- b - initialisées avec mesures in-situ
(volumes d'eau consommés, hauteur de neige sur les pistes)
- c - adaptées aux modes de gestion de la neige en station (*Hanzer et al. 2014, Spandre et al., 2016*)



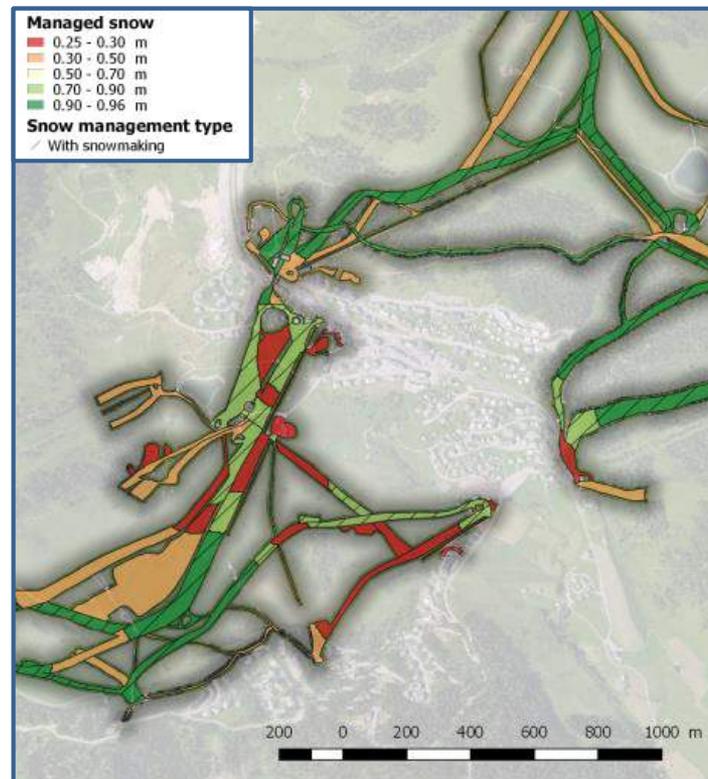
Les nouveautés de PROSNOW



Les nouveautés de PROSNOW

Simulations des conditions d'enneigement (hauteur et stock de neige):

- a - pilotées par les forçages prévisionnels
- b - initialisées avec mesures in-situ
(volumes d'eau consommés, hauteur de neige sur les pistes)
- c - adaptées aux modes de gestion de la neige en station
- d - spatialisées sur une géométrie pertinente





**BON SKI !
QUESTIONS ?**

