



INRAE



Etat des connaissances sur les tendances climatiques en montagne et impact sur l'enneigement des domaines skiables

L'outil ClimSnow

Xavier TRANCHANT
ABEST Horizons

Jean-Michel SOUBEYROUX
METEO-FRANCE

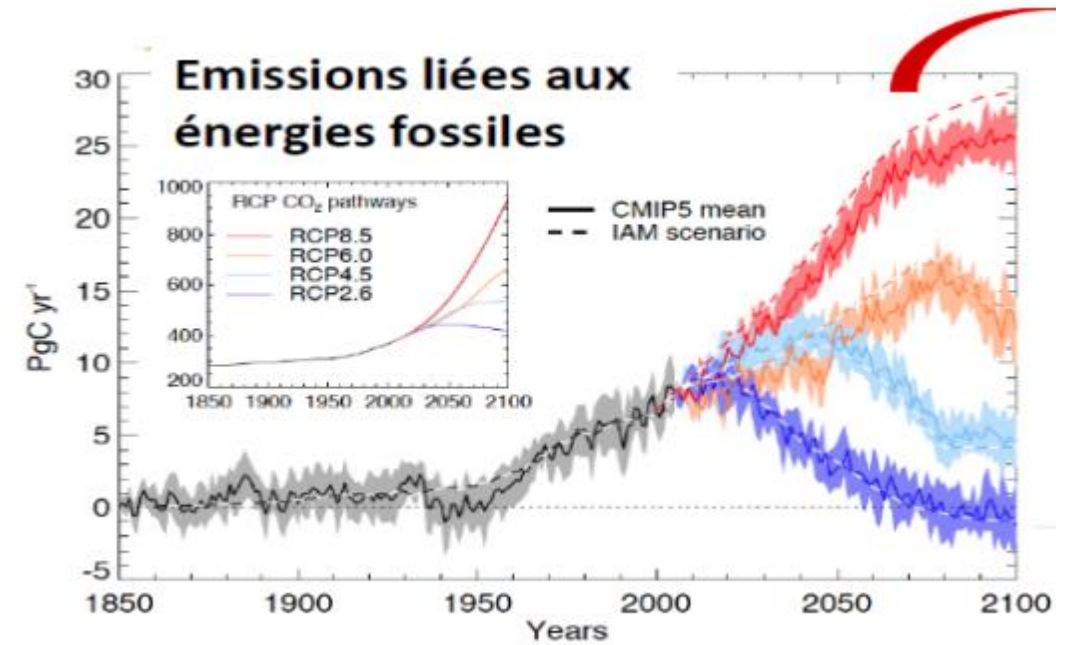
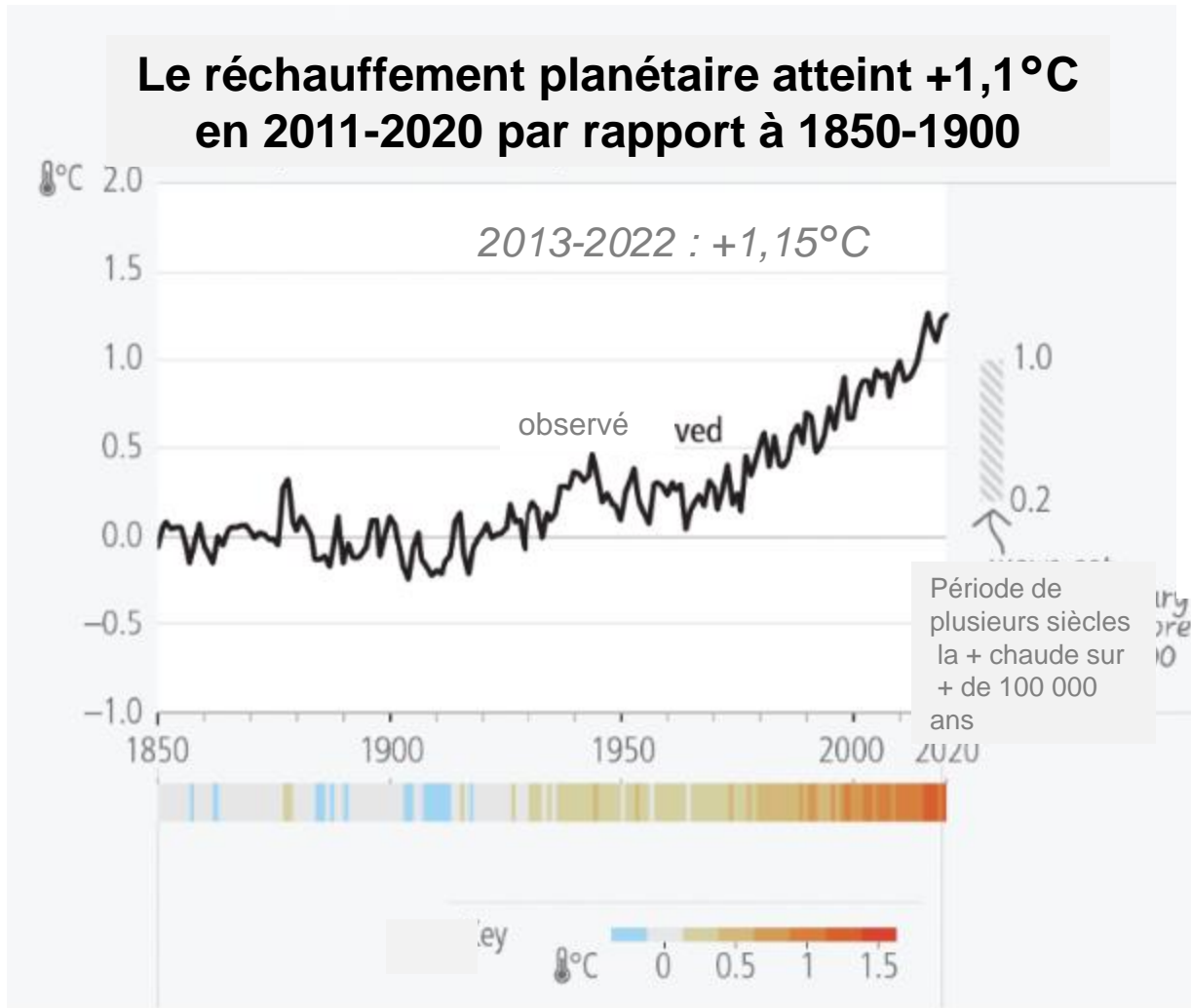


Partie 1 :

Tendances climatiques en montagne

Les activités humaines, responsables du réchauffement planétaire

GIEC, Rapport de synthèse, 2023

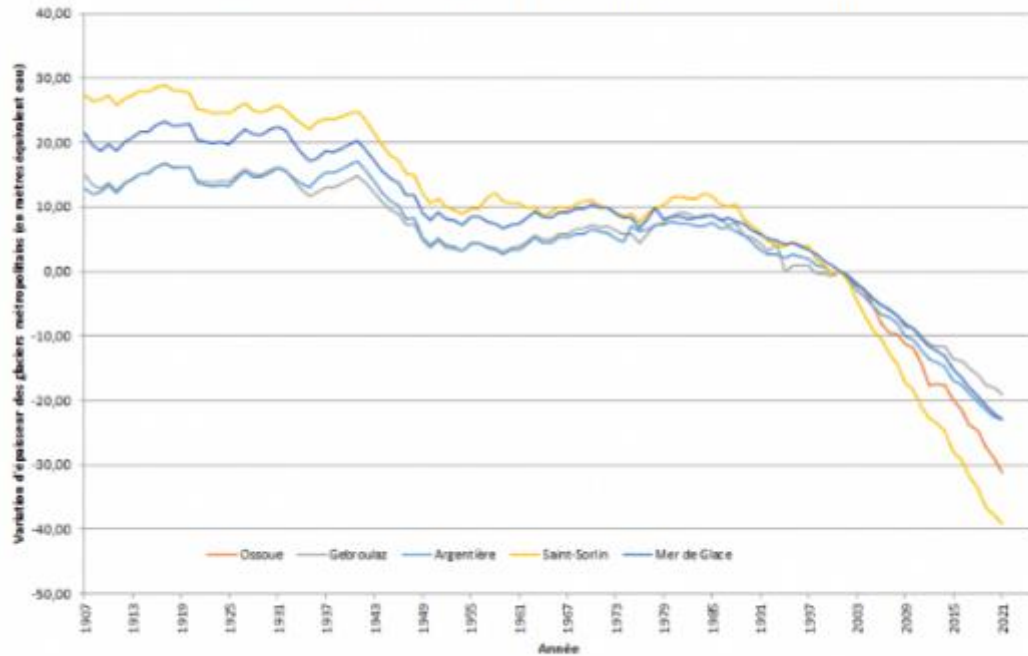


- **RCP8,5** : le scénario business as usual, où les émissions annuels ne baisse pas, l'augmentation de la température globale terrestre pourrait atteindre **+4°C en 2100** par rapport à l'aire préindustrielle
- **RCP6** : avec une stabilisation des émissions autour de 2100
- **RCP4,5** : correspond à un respect des accords de la COP21
- **RCP2,6**: le scénario optimiste où les émissions deviendraient nulle à horizon 2050

Pour la France, les valeurs par rapport à 1900-1930 sont de **1.7°C** (actuellement), **2°C** (2030), **2.7°C** (2050) et **4°C** (2100) dans le cadre de la Trajectoire de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC).

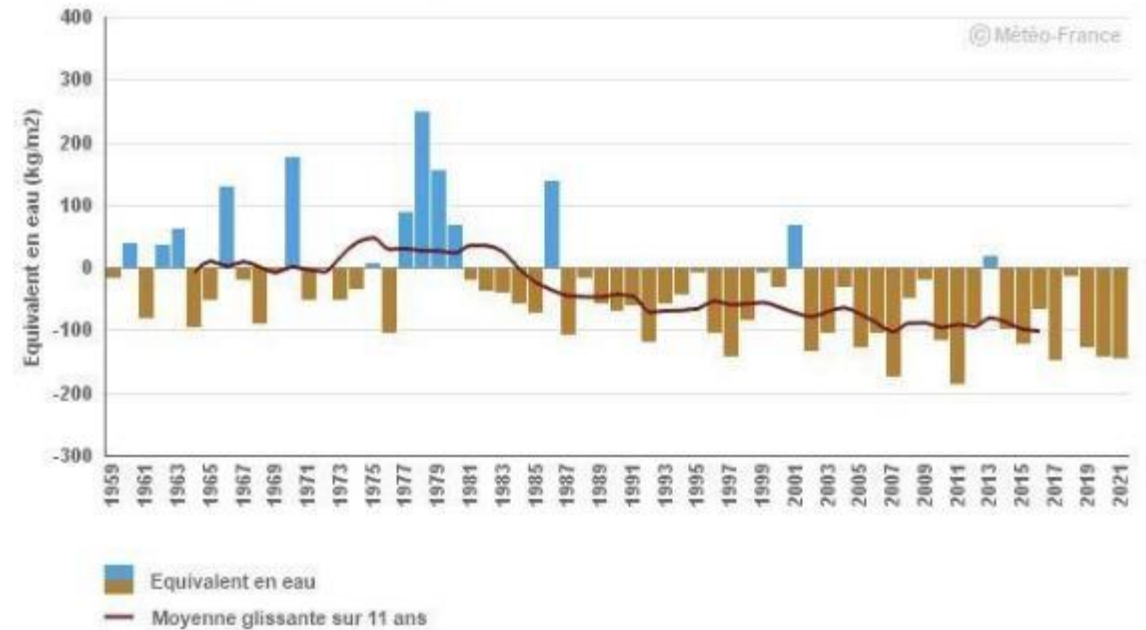
Effets du réchauffement passé sur les conditions en montagne

Variation d'épaisseur des glaciers métropolitains (en m)



Crédits : ONERC / Sources : Association Moraine et IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement)

Equivalent en eau du manteau neigeux au 1er mai : écart à la référence 1961-1990
Massifs français de haute montagne



En 2022, le glacier d'Ossoue (Massif du Vignemale, Pyrénées) a connu une perte record de -4,5 mètre d'épaisseur. En moyenne et en 20 ans (entre 2021 et 2002), les cinq glaciers suivis ont perdu -25 mètres équivalent eau.

Réduction significative du stock nival le 1er mai sur tous les massifs :

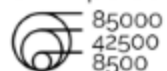
-20 kg/ m² par décennie sur l'ensemble des massifs, soit -12 % par décennie par rapport à la normale 1981-2010

(-34 kg/m² par décennie dans les Alpes du Nord, soit -12 % par décennie, -16 kg/m² par décennie dans les Alpes du Sud, soit -20 % par décennie, -8 kg/m² par décennie dans les Pyrénées, soit -7 % par décennie)

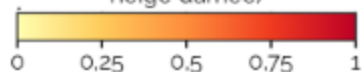
Résultats par massif dans les Pyrénées

■ Massif des Pyrénées (France)

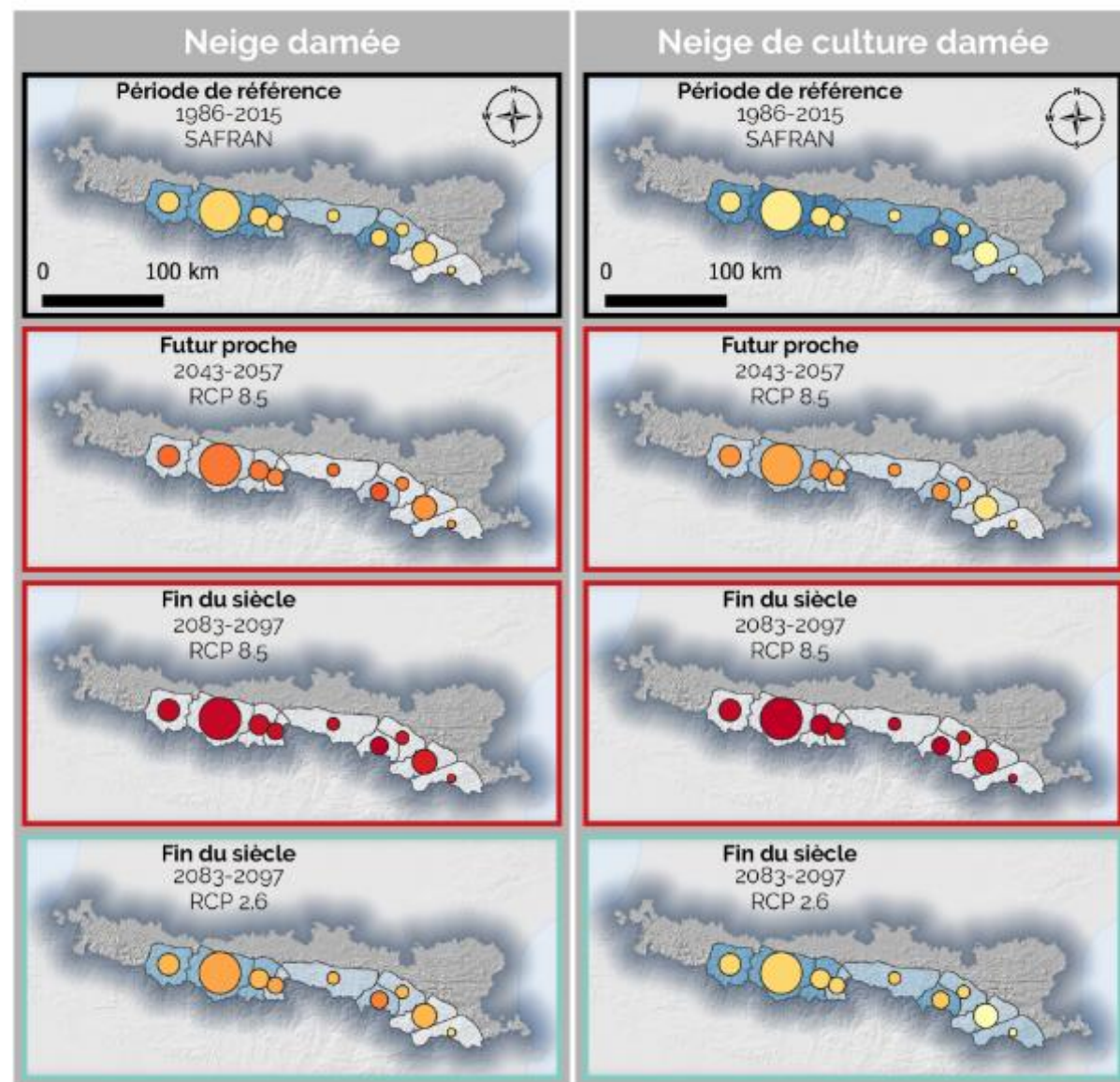
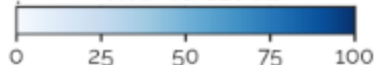
Moment de puissance
(km² * personnes / heure)



Fréquence de retour du Q20
(référence 1986-2015
neige damée)



Valeur du Q20 (%)



Synthèse générale



Poursuite du réchauffement tant que la neutralité carbone planétaire n'est pas atteinte (au mieux 2050 d'après Accord de Paris et COP27)

Augmentation de la fréquence de retour des mauvaises saisons, dans les Alpes et Pyrénées :

- de 1 année sur 5 sur la période 1986 -2015,
- à 1 année sur 2 d'ici le milieu du 21^{ème} siècle.

Avec une grande variabilité selon les stations.

Impact de la production de neige sur la fiabilité de l'enneigement

- Amélioration relative des conditions d'exploitation,
- Grande variabilité des capacités de production.

En fin de siècle, les scénarii d'émission de gaz à effet de serre sont déterminants

- Croissance du besoin de production et limites de la technique (température),
- Seule RCP2.6 - neutralité carbone - permettrait de retrouver des conditions d'exploitation comparables à celles en milieu de XX^{ème} siècle

Fortes différences entre les stations - généralisation impossible.

SCET, Rapport du 01/03/2021

Partie 2 :

Impact sur l'enneigement des domaines skiables Etudes ClimSnow

Les territoires de montagne n'échappent pas à l'**évolution climatique** qui influe directement sur la durabilité de l'enneigement.

Il importe d'en mesurer rigoureusement les valeurs afin d'en tirer les conséquences et d'**adapter les stratégies touristiques** des territoires et des stations.

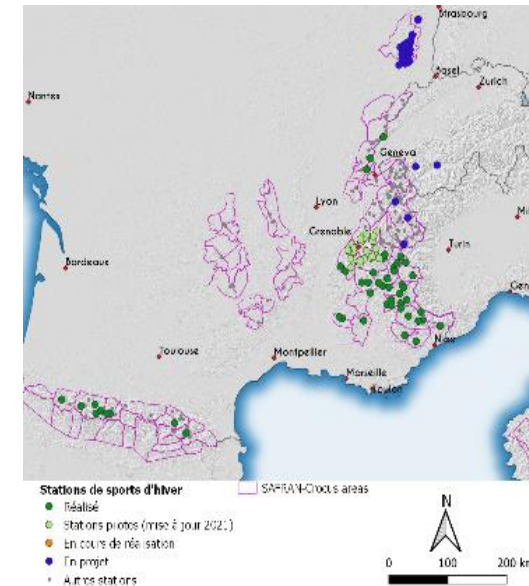
- **Quel sera à court et long terme le poids des activités liées directement à la neige dans les économies des massifs montagneux?**
- **Quelles orientations pour l'évolution des produits touristiques?**
- **Quel sera le prix du confortement des activités 'neige' ? Sur quel périmètre?**
- **Comment aborder des périodes de transition?**

Autant de questions qui se posent, à des degrés divers, à l'ensemble des espaces valléens dont les économies et la vie sociale sont du ressort de l'enneigement, qu'il soit naturel ou de culture.

Consortium Météo-France / INRAE / Dianeige - ABEST Horizons

La performances de la recherche scientifique appliquée
alliée à l'expertises de l'ingénierie touristique de montagne,
au service des territoires de montagne.

- ✓ octroyer des résultats sur les conditions météorologiques et l'enneigement des stations de ski à diverses échéances du 21ème siècle,
- ✓ identifier l'impact des techniques de gestion de la neige : damage, production de neige de culture,
- ✓ analyser les conséquences de ces changements sur les choix stratégiques et les investissements futurs, comme guides de la stratégie de développement de l'offre touristique des territoires.



200 stations étudiées ou en cours d'étude depuis 2020



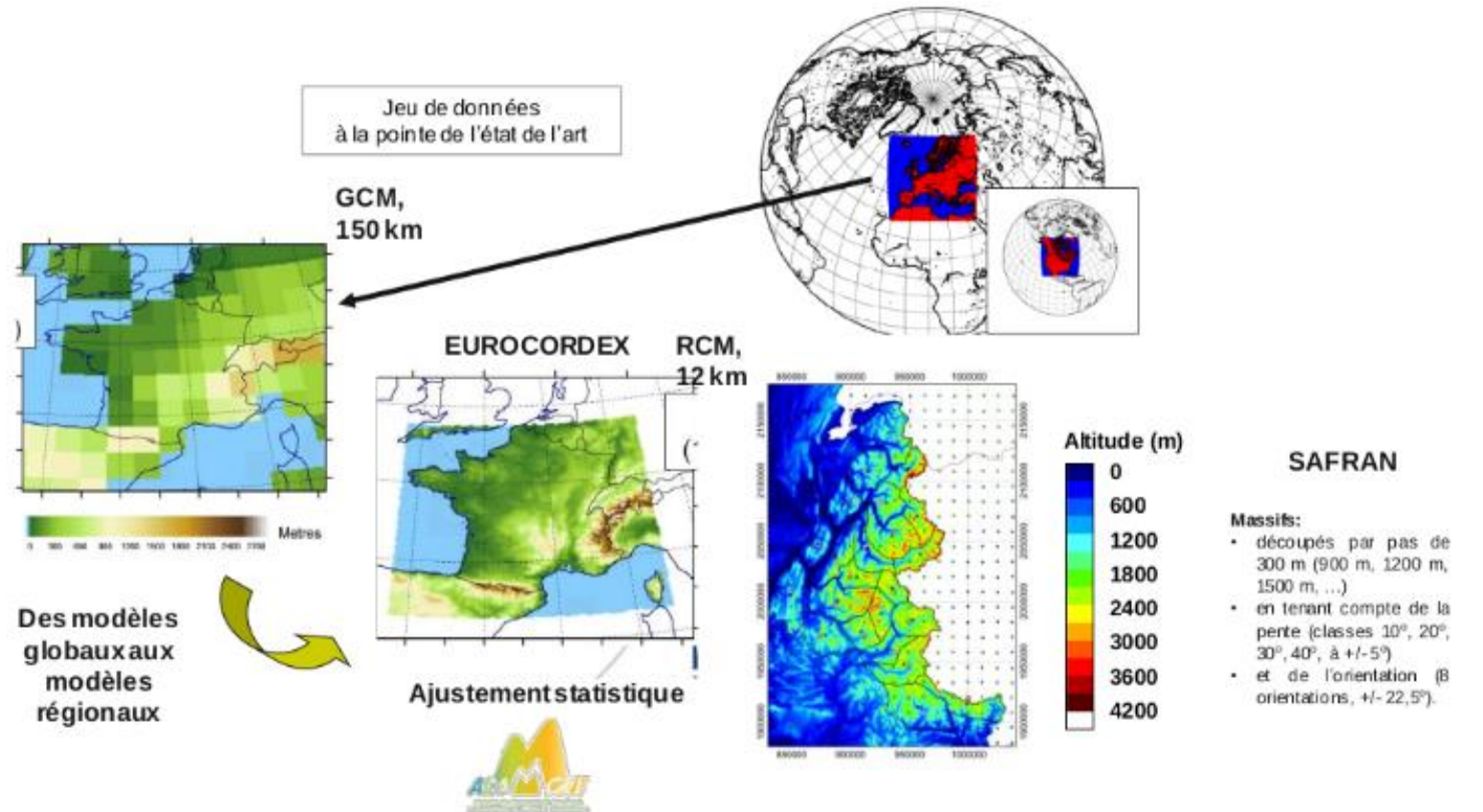
INRAE



3.1 Projections climatiques

La chaîne de modélisation de CLIMSNOW se sert des observations nivo-météorologiques et du réseau de mesures de Météo-France pour fournir un état historique, à partir duquel l'évolution future est calculée, en exploitant les dernières projections climatiques du GIEC, pour permettre d'estimer les évolutions nivo-n

Projections climatiques, avec méthode de descente d'échelle adaptée aux zones de montagne (France et Europe)



3.2

Représentation cartographique

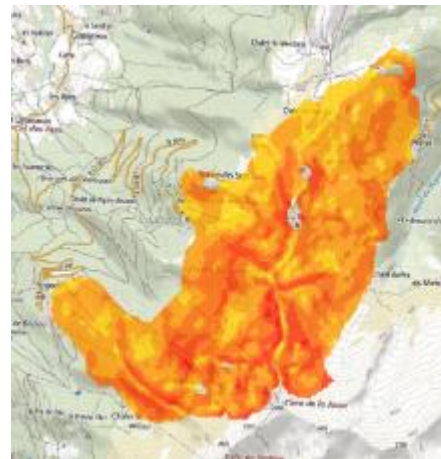
Représentation spatiale des stations :

- par pas de 300 m (SAFRAN),
- selon les pentes : classes 10°, 20°, 30°, 40° +/- 5°
- selon l'orientation : 8 orientations +/- 22,5°.

Altitudes

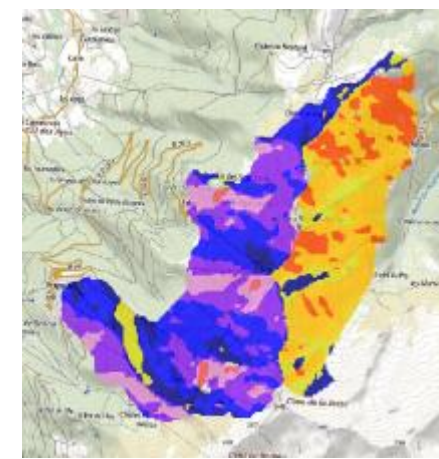
Plages d'altitude

- 1200 masl
- 1500 masl
- 1800 masl
- 2100 masl
- 2400 masl

Pentes

Pentes

- Moins de 5°
- 5-15°
- 15-25°
- 25-35°
- 35-45°
- Plus de 45°

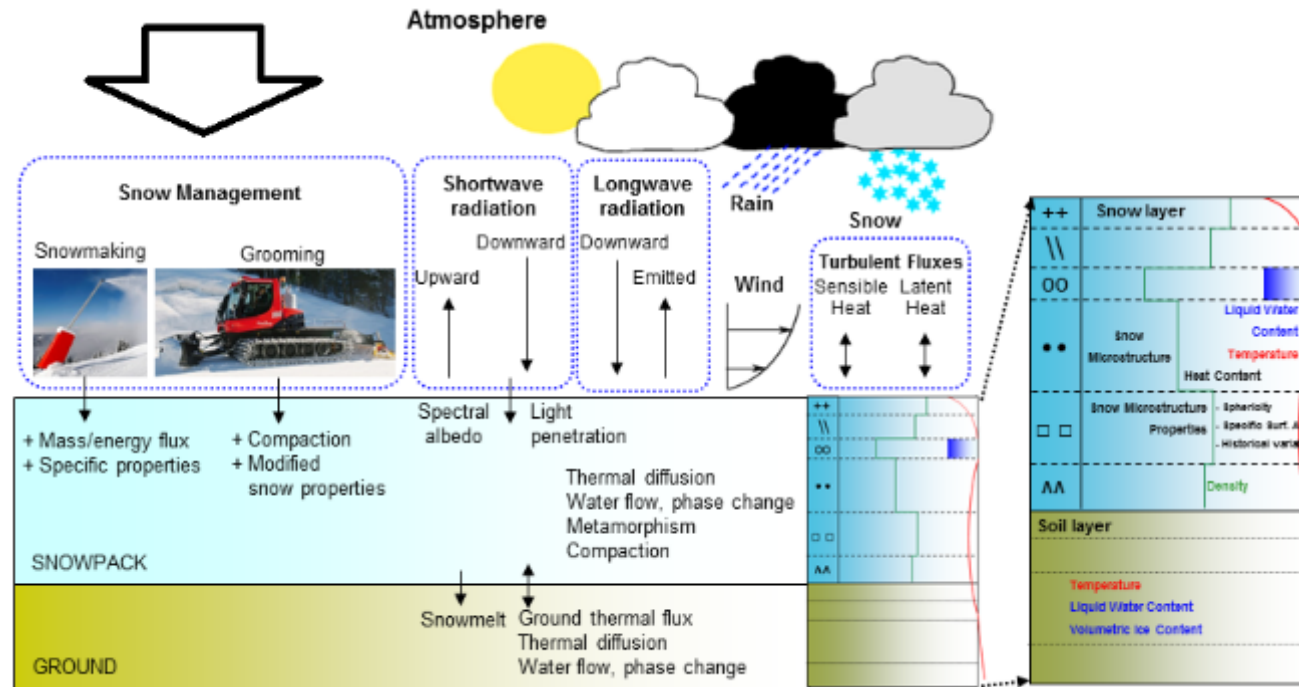
Orientations

Orientations

- Nord
- Nord-Est
- Est
- Sud-Est
- Sud
- Sud-Ouest
- Ouest
- Nord-Ouest

3.3

Modélisation de l'enneigement

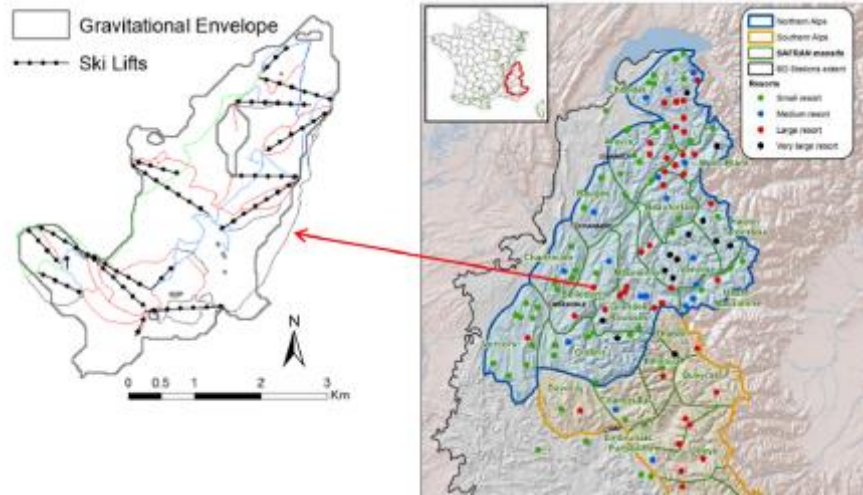


Pour la modélisation de la neige, CLIMSNOW se sert de la dernière version du modèle Crocus-Resort, développé par Météo-France, permettant de simuler ;

- l'évolution de la neige naturelle,
- les effets du damage - compactage et fraisage,
- la production de neige de culture selon la période de la saison, la génération d'enneigeur, la température humide, la vitesse du vent et les objectif de production.

3.4

Représentation des domaines skiables



- Collecte de données auprès des opérateurs :
récollement des remontées mécaniques, tracés de pistes et de neige de culture, unités de stockage d'eau, prise en compte des projets d'aménagement

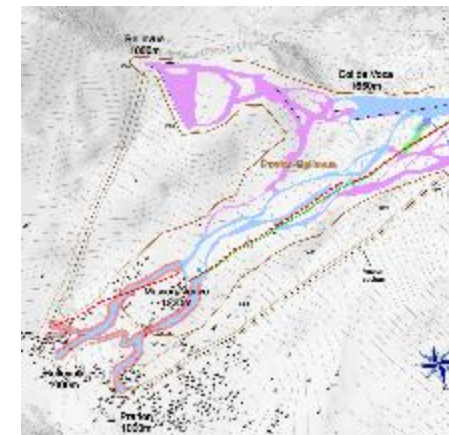
- Modélisation des enveloppes gravitaires :
ensemble des points accessibles depuis le sommet des remontées mécaniques permettant de rejoindre le pied d'un appareil dans la même station.

- Modélisation explicite de la couverture en neige de culture et neige naturel



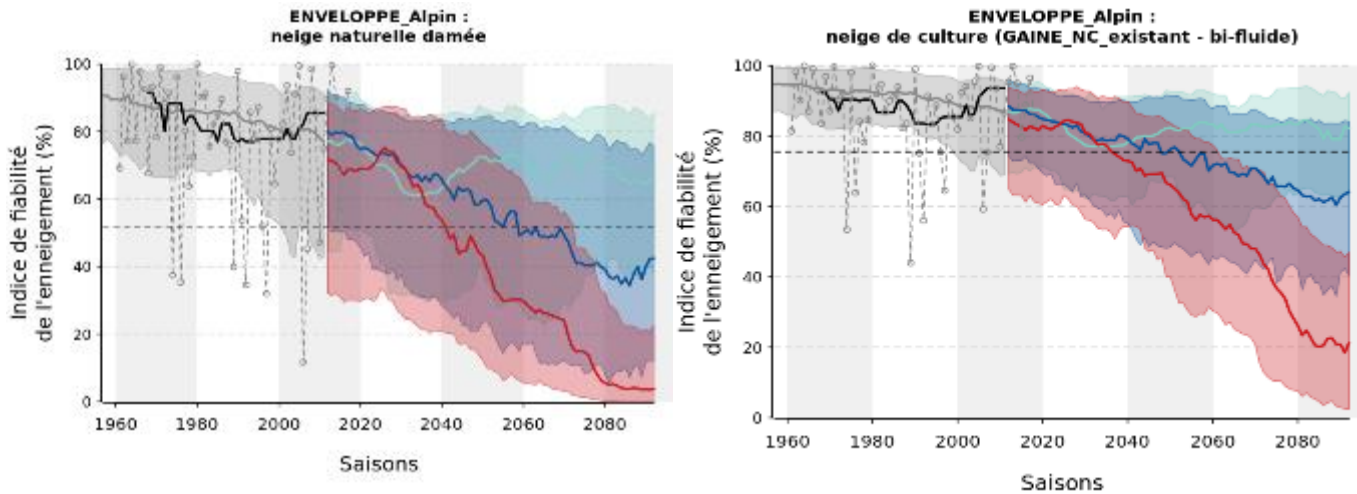
Part de l'enveloppe gravitaire couverte par la neige de culture

- 15%
- 30%
- 45%



4.1

L'indice de fiabilité de l'enneigement



Légende :

- Courbes grises : analyses historiques
- Courbes noires : observations
- Courbes en couleurs : projections (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)
- Traits en gras : 1 chance sur 2
- Enveloppes : 1 chance sur 5 (meilleures et pires saisons)

Indice de fiabilité de l'enneigement

=

Variabilité de l'enneigement sur les pistes
soit

La fraction de surface de domaine skiable (entre 0% et 100%)
disposant d'une quantité suffisante de neige pour la pratique du ski,
avec pondération du moment de puissance et des périodes stratégiques

- neige naturelle, neige naturelle damée
- systèmes de production de neige d'ancienne génération
- systèmes de production de neige de nouvelle génération
- état existant / état projet
- intégralité du domaine skiable / chaque secteur

Station	Indice de fiabilité de l'enneigement, en % (RCP8.5 - Q20)		
	1986-2015	2028-2042	2043-2057
	89	78	73
	90	83	76
	87	78	72
	90	82	77
	89	77	68

Le Taux de retour des saisons défavorables

Taux de retour
des saisons défavorables

=

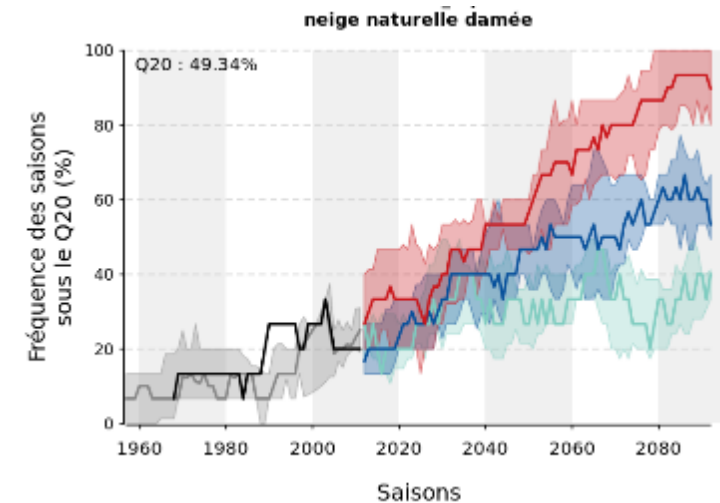
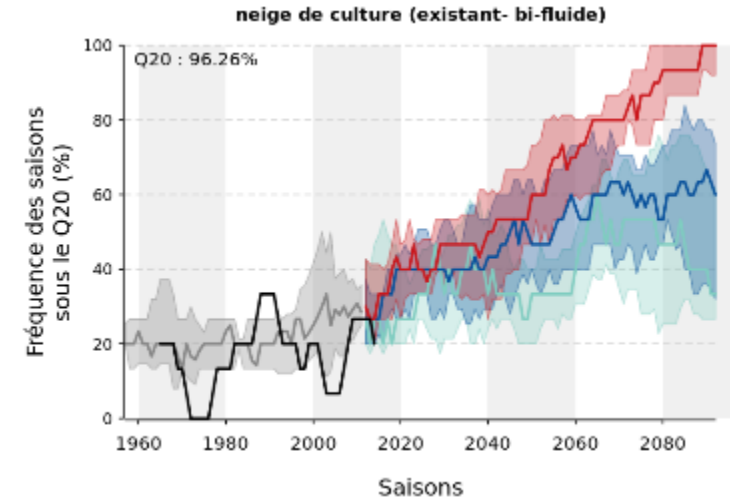
Fréquence de retour des hivers défavorables
en termes d'enneigement,
définis par le Q20 - 1 année sur 5
sur la période historique

Par exemple:

taux de retour en 2100 = 100%

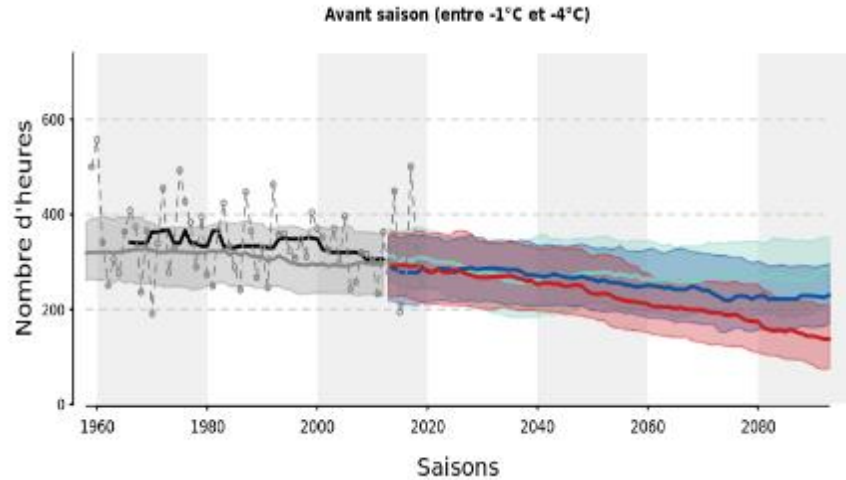
>> conditions défavorables historiquement d'une année sur 5 (20%)
arriveront tous les ans (100%) à la fin du siècle

- neige naturelle, neige naturelle damée
- systèmes de production de neige d'ancienne génération
- systèmes de production de neige de nouvelle génération



4.3

Les fenêtres de froid / Consommation en eau théorique

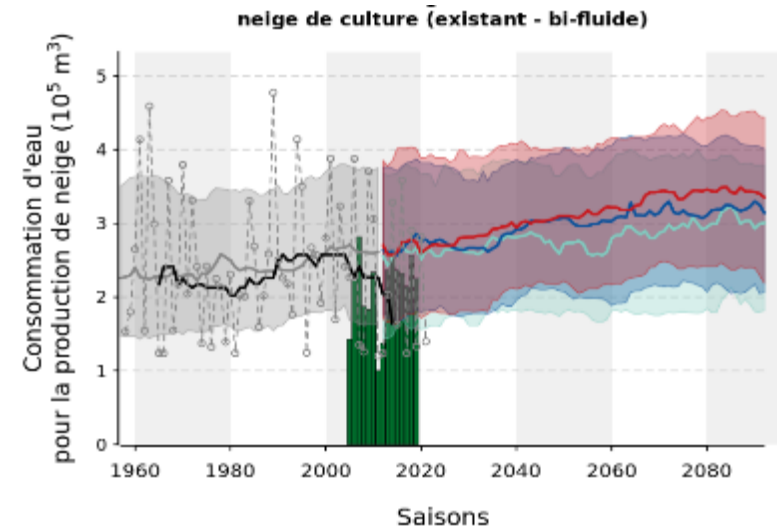


Consommations en eau pour la neige de culture

- neige naturelle, neige naturelle damée
- systèmes de production de neige d'ancienne génération
- systèmes de production de neige de nouvelle génération

Fenêtres de froid, selon :

- Les altitudes
- Les différents intervalles de températures
 - -1°C à -4°C
 - -4°C à -6°C
 - < -6°C
- Les différentes périodes de la saison
- Les influences locales

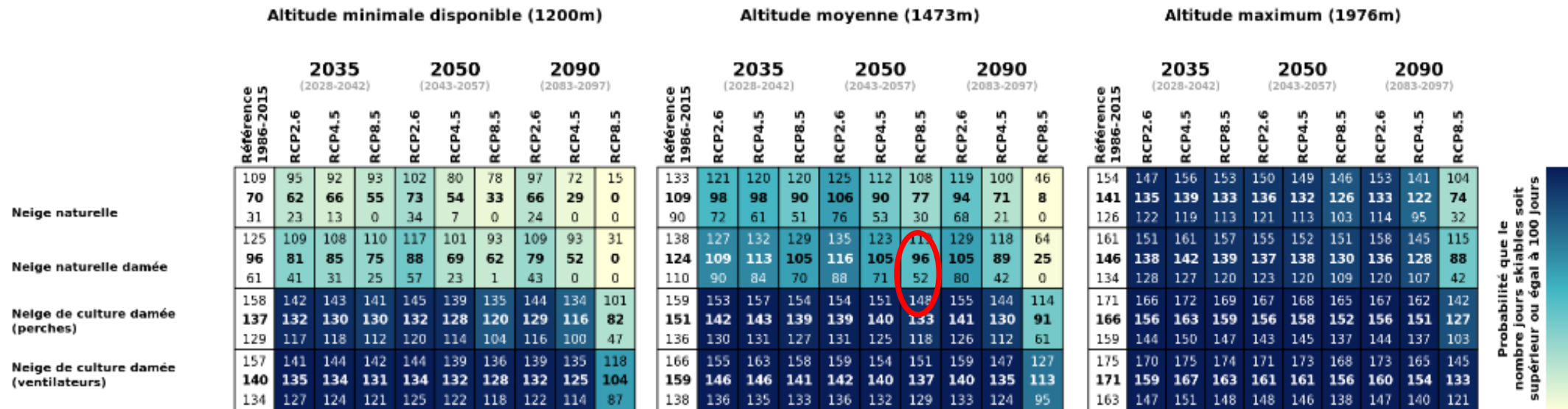


4.4 Les durées d'enneigement

Étude de l'évolution des durées d'enneigement pour des altitudes stratégiques de chaque station

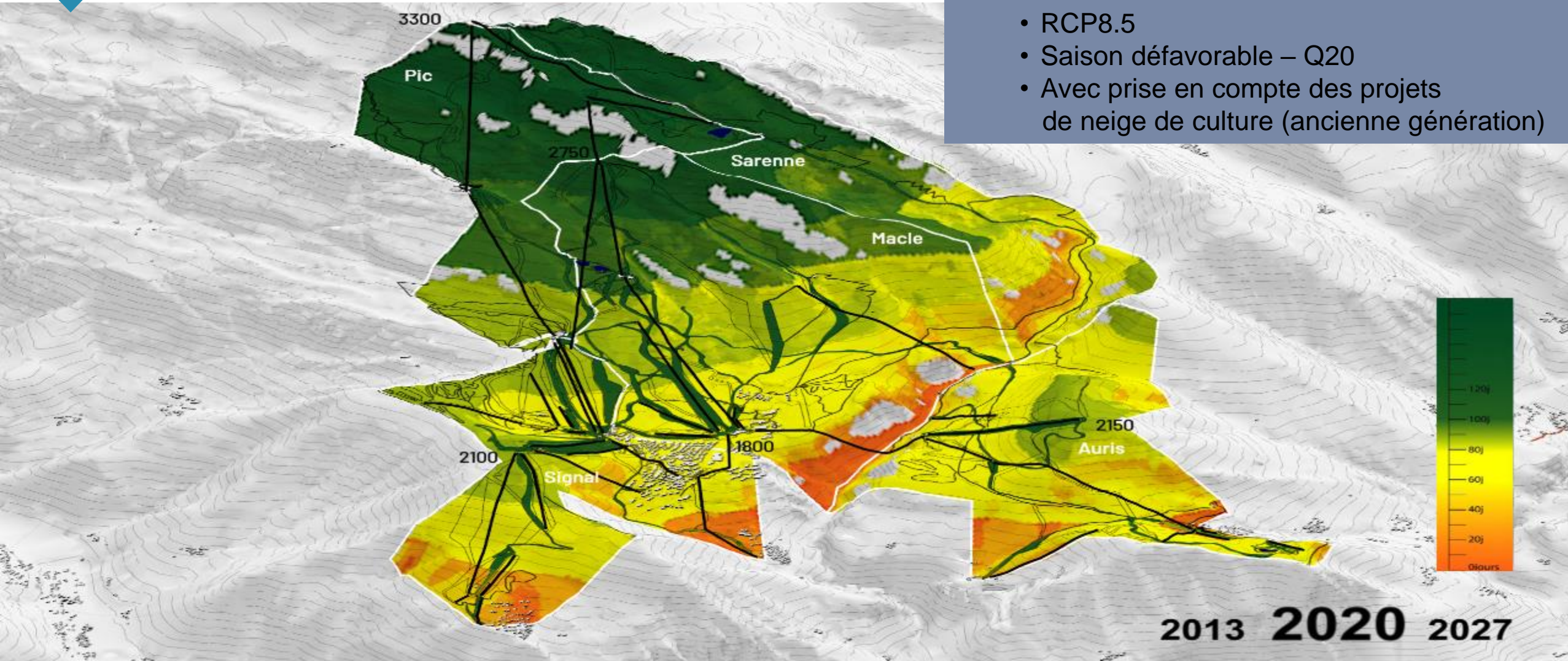
=

Nombre de jours avec un enneigement suffisant pour permettre la pratique du ski



Exemple : en 2050, selon le scénario RCP 8.5, le nombre de jours présentant une épaisseur de neige suffisante variera de 52 à 119 j à 1473 m d'altitude, en neige naturelle damée (en prenant ou non en compte les prospects d'aménagement).

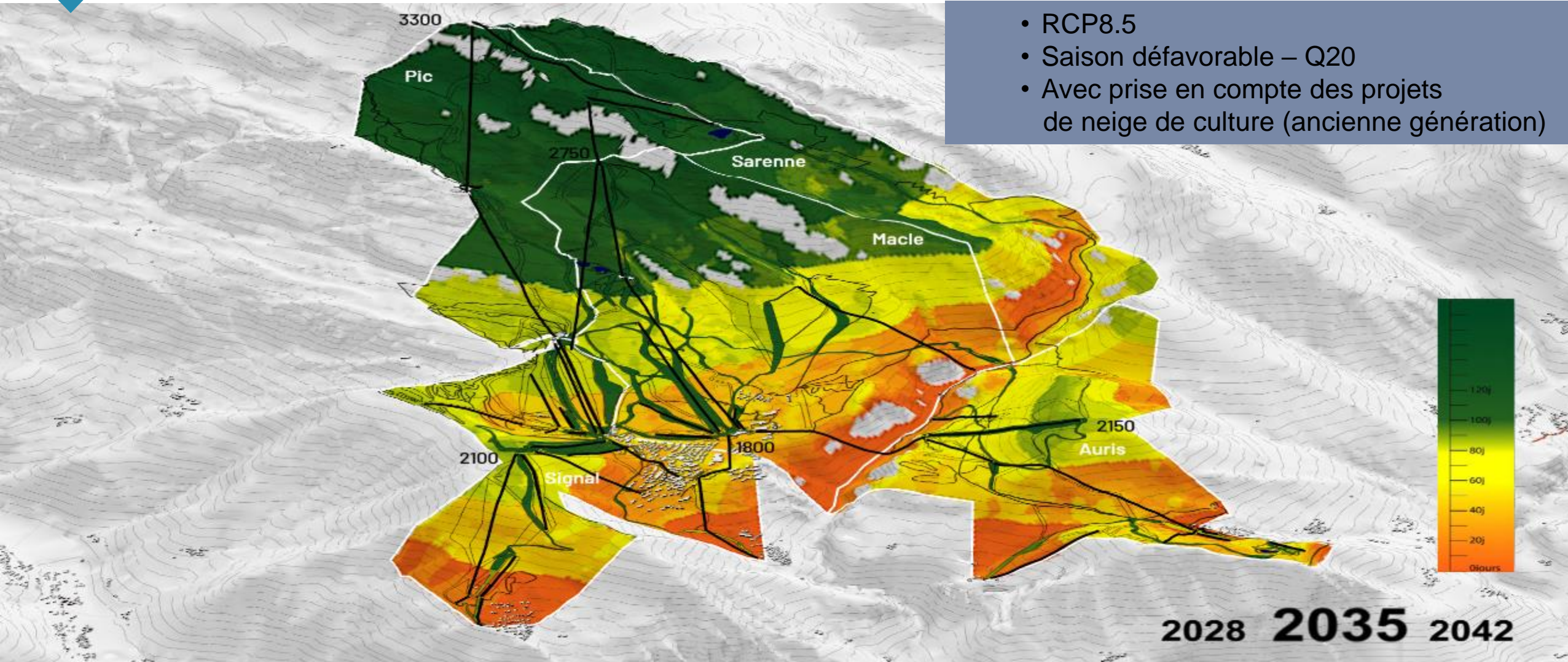
4.4 Les durées d'enneigement



- RCP8.5
- Saison défavorable – Q20
- Avec prise en compte des projets de neige de culture (ancienne génération)

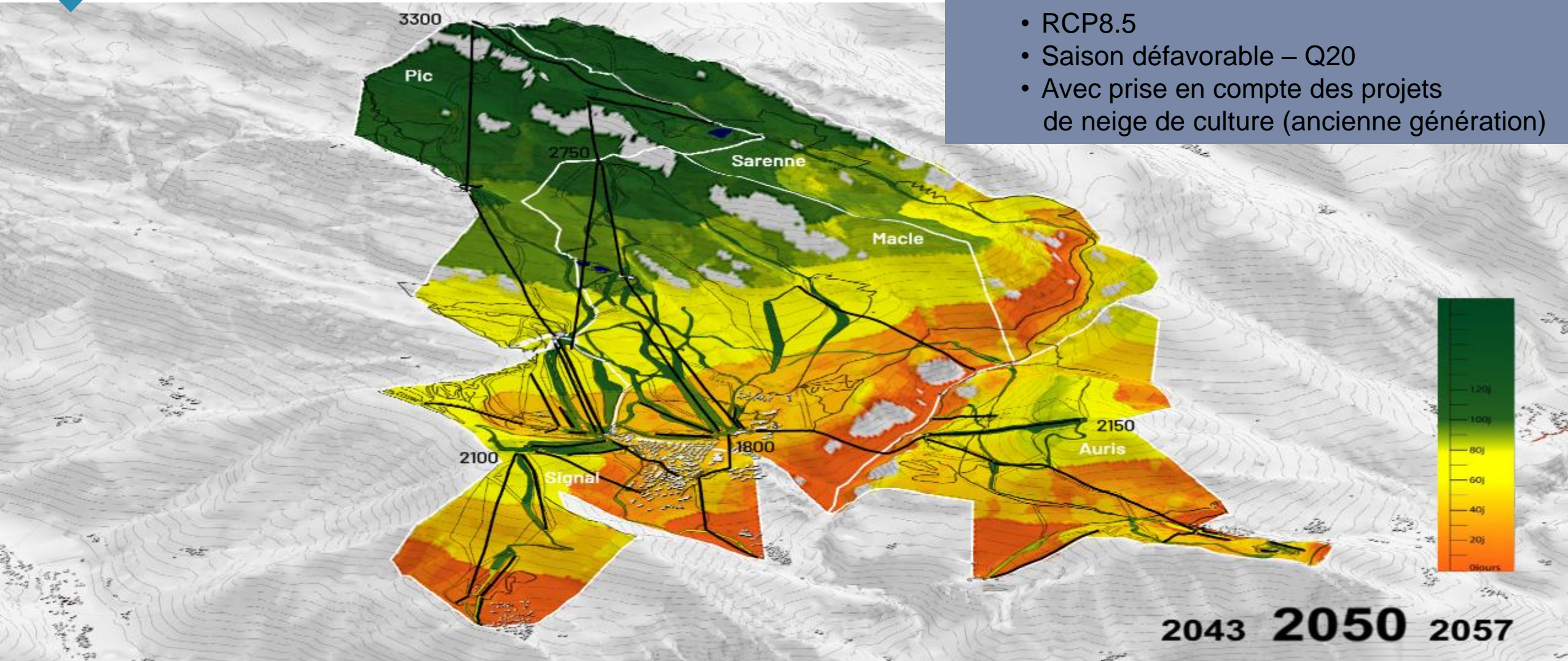
4.4

Les durées d'enneigement



4.4

Les durées d'enneigement



4.5 Analyses et préconisations

Tous les résultats de ClimSnow sont commentés et analysés dans les rapports d'études, qui comprennent :

- une analyse des **caractéristiques topographiques** de chaque site et des **données fournies par les exploitants**,
- les **résultats de l'étude** sous forme de tableaux, graphiques, cartes 2D et 3D,
- un ensemble d'**éléments pédagogiques** nécessaires pour comprendre les données scientifiques,
- des **préconisations personnalisées** sur les stratégies d'adaptation aux évolutions climatiques.

Facteurs liés aux **activités et à la capacité à s'affranchir des aléas météos** : altitude, flux, enneigement, diversification et image

Facteurs indiquant les **marges de manœuvre** en exploitation et investissement et l'intérêt

Station	Altitude du domaine skiable	Importance de la saison hiver	Capacité à produire de la neige	Niveau de diversification	Identité de la station	Degré d'attractivité de la station	Marges de manœuvre de l'exploitation
<i>Vulnérabilité du modèle économique</i>	Quelle altitude du domaine ?	Quel poids de la saison hivernale ?	Quelle garantie neige ?	Quel avancement dans la diversification ?	Quel positionnement assumé de la station ?	Quel rayonnement de la station ?	Quelles marges de manœuvre financières et d'exploitation ?



INRAE



**Etat des connaissances
sur les tendances climatiques en montagne
et impact sur l'enneigement des domaines skiables**

L'outil ClimSnow

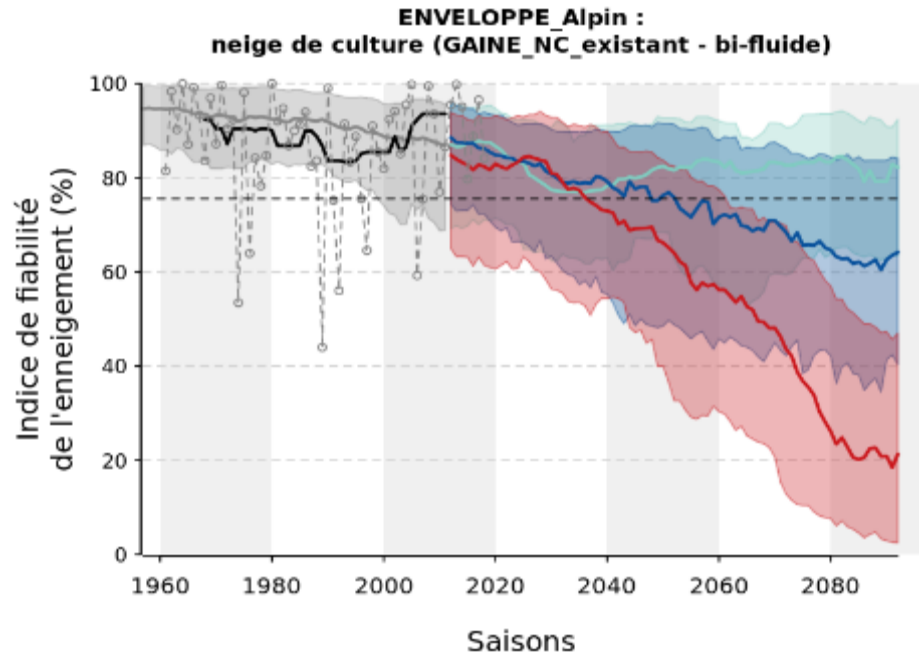
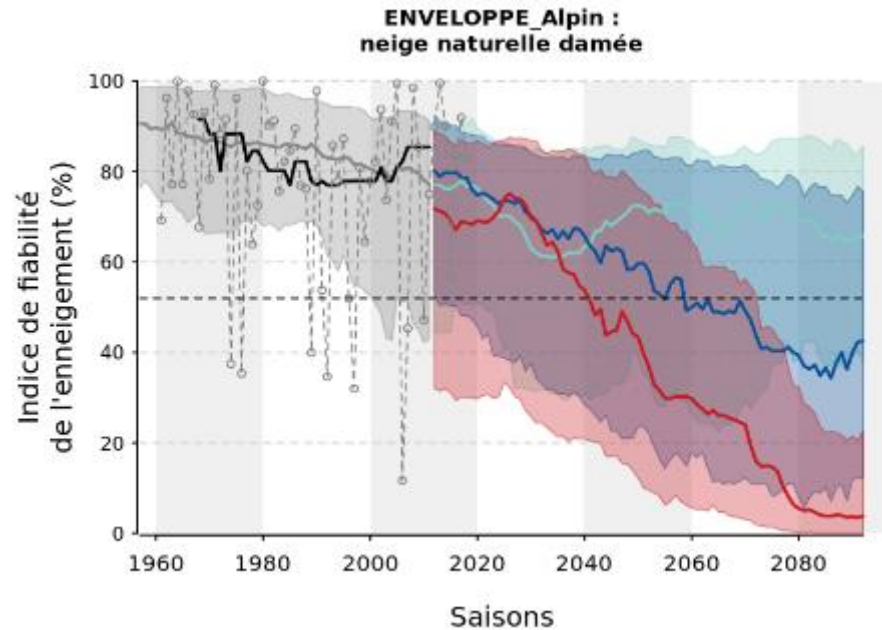


**MERCI
POUR VOTRE ATTENTION !**

4.1

Les indicateurs climatiques

Indice de fiabilité de l'enneigement



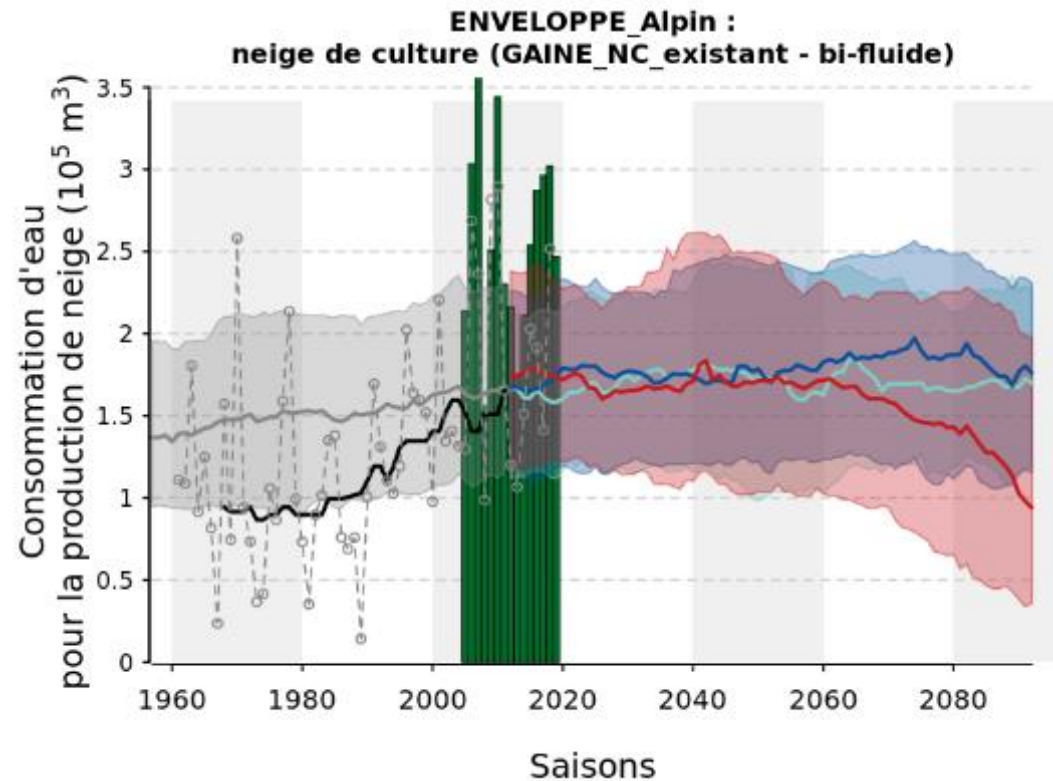
Il représente la **variabilité de l'enneigement sur les pistes** et caractérise la **fraction de surface de domaine skiable (entre 0% et 100%) disposant d'une quantité suffisante de neige pour la pratique du ski** (20 cm de neige damée). Pour obtenir une valeur annuelle, les valeurs quotidiennes sont d'abord agrégées à l'échelle de la station en pondérant le poids de chaque secteur en fonction du moment de puissance des remontées mécaniques associées, et ensuite moyennées au cours de la période de vacances de fin d'année (du 20 décembre au 5 janvier, 15% du poids) et d'hiver (du 5 février au 5 mars, 85% du poids). Par défaut, cet indicateur est calculé en considérant un manteau neigeux constitué de neige naturelle damée. Pour les stations qui disposent d'un réseau de neige de culture, un deuxième indicateur est calculé en prenant en compte la production de neige de culture sur les secteurs concernés.

A partir de l'indice de fiabilité de l'enneigement calculé pour chaque saison du passé, il est possible d'identifier les conditions d'enneigement correspondant aux saisons défavorables (niveau typique d'enneigement défavorable rencontré une année sur cinq). Ce paramètre, appelé **Q20**, identifie le pourcentage d'un domaine skiable qui a pu être ouvert aux clients lors des conditions les plus défavorables rencontrées dans le passé.

4.1

Les indicateurs climatiques

Consommation en eau pour la production de neige de culture



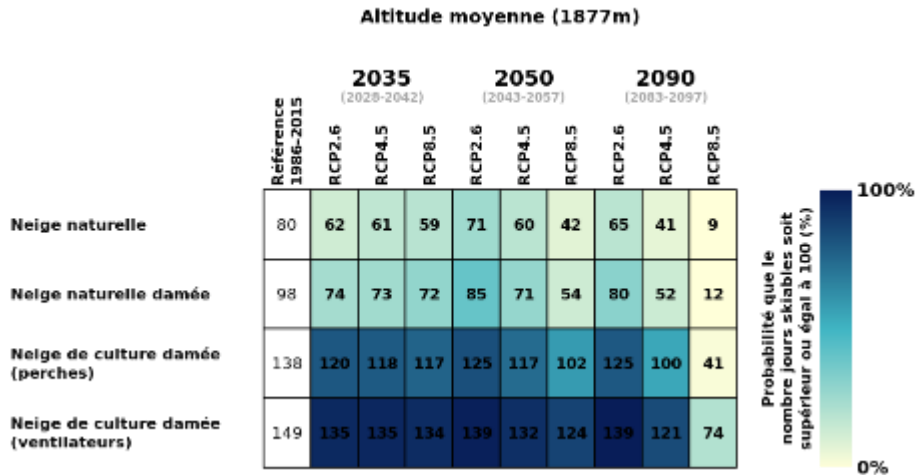
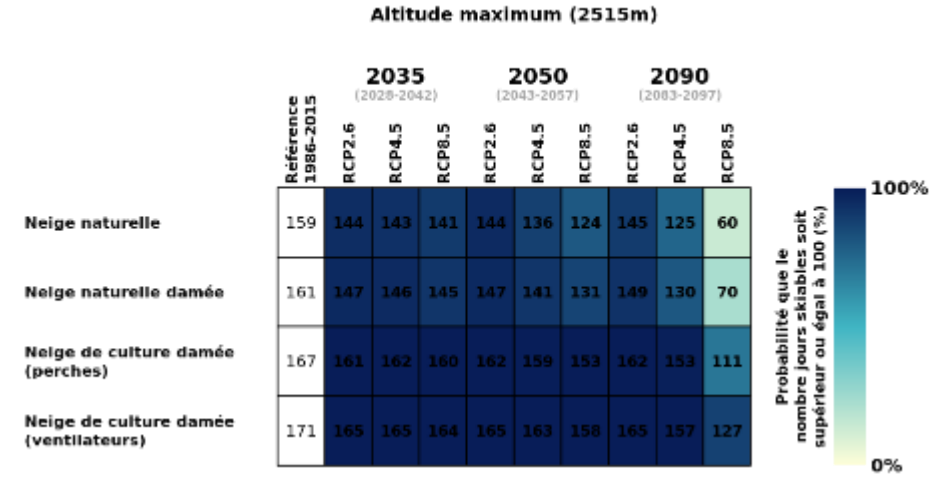
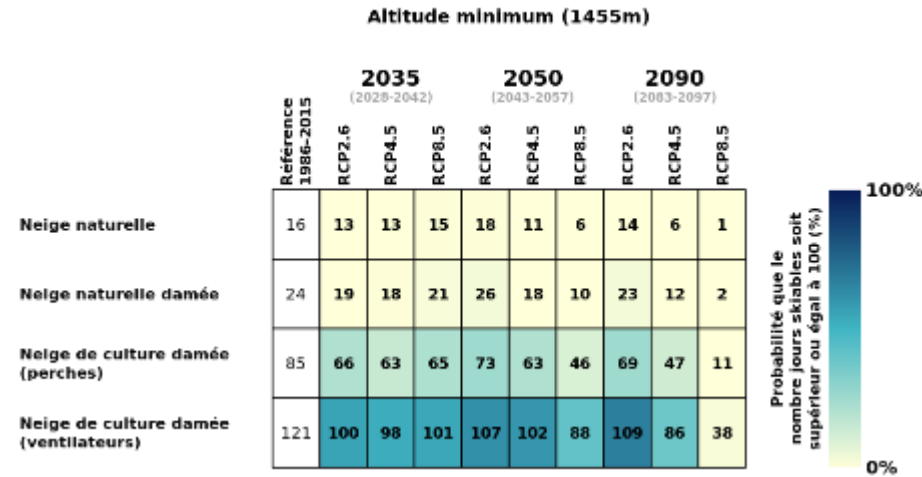
Légende :

- Courbes grises : analyses historiques
- Courbes noires : observations
- Courbes en couleurs : projections (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)
- Traits en gras : 1 chance sur 2
- Enveloppes : 1 chance sur 5 (meilleures et pires saisons)

Cet indicateur montre les volumes d'eau qu'il serait nécessaire de consommer sur les secteurs équipés en neige de culture, afin de faire face au manque de neige naturelle.

4.2 Les durées d'enneigement

Nombre de jours avec un enneigement suffisant pour permettre la pratique du ski



Étude de l'évolution des durées d'enneigement pour des altitudes stratégiques de la station.

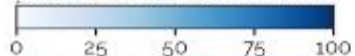
Nombre de jours où l'épaisseur de neige dépasse un certain seuil (20 cm de neige damée), en fonction de l'horizon temporel, de la présence de neige de culture et des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.

RESULTATS PAR MASSIF DANS LES ALPES

Moment de puissance
(km² personnes / heure)



Valeur du Q20 de référence (%)



Fréquence de retour du Q20
(référence 1986-2015
neige damée)



■ Massif des Alpes (France)

■ Massifs SAFRAN

● Domaines skiables

