



Puy Saint Vincent  
9 août 2022

Carlo Maria Carmagnola

Météo-France / Centre d'Etudes de la Neige  
Dianeige



## - CLIMSNOW -

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET  
PROJECTIONS DE L'ÉVOLUTION DE L'ENNEIGEMENT  
SUR LES STATIONS DE :

- PUY SAINT VINCENT
- PELVOUX-VALLOUISE



# CONTEXTE DE L'ETUDE

1 – CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

2 – L'OUTIL CLIMSNOW

3 – L'ETUDE « REGION SUD »

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, certes 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.

Le **consortium Météo-France/Dianeige/Inrae** allie les performances de la recherche scientifique appliquée et les expertises de l'ingénierie touristique spécialisée sur les stations de montagne.

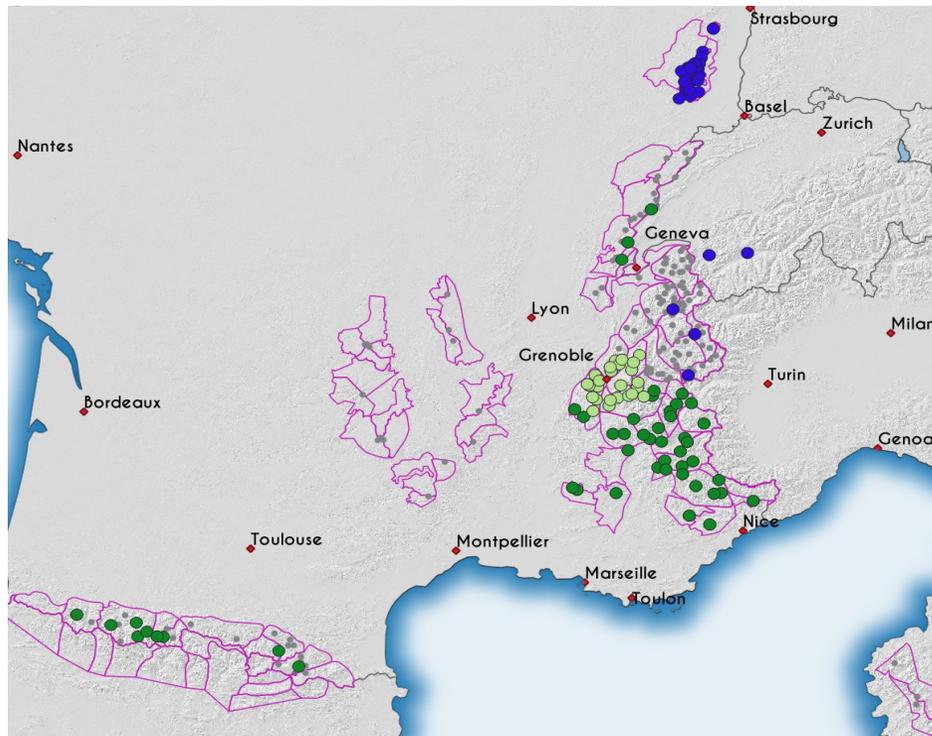
La méthodologie développée par ce consortium (service **ClimSnow**) permet :

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

Bénéfices pour les clients :

- accompagnement à la **diversification des activités touristiques**,
- appui aux **dossiers d'aménagement**,
- **fédération** des acteurs locaux

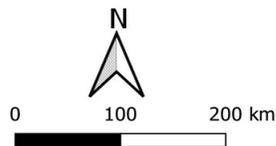
Le principal résultat de l'approche ClimSnow est de quantifier, à diverses échéances, la **fiabilité de l'enneigement** (neige naturelle damée, avec/sans neige de culture), sa variabilité et la capacité de chacune des stations à maintenir son exploitation selon quels efforts, selon quelles modalités et ce, à différentes échéances.



**Stations de sports d'hiver**

- Réalisé
- Stations pilotes (mise à jour 2021)
- En cours de réalisation
- En projet
- Autres stations

SAFRAN-Crocus areas



117 stations françaises étudiées ou en cours d'étude

ClimSnow cité dans le dossier de presse du Plan Avenir Montagne (Mai 2021, pag. 14)

**Exemple d'intervention :** Afin d'éclairer les acteurs locaux sur les perspectives d'enneigement et leur permettre des choix d'investissement éclairés, Avenir Montagnes Ingénierie cofinancera la réalisation de diagnostics (Dianeige Météo France INRAE) permettant de quantifier à diverses échéances la fiabilité et la variabilité de l'enneigement. La station de Métabief dans le Jura a ainsi pu sur la base d'un diagnostic cartographié de son domaine skiable adapter ses projets en faveur d'un développement touristique tenant compte du changement climatique.

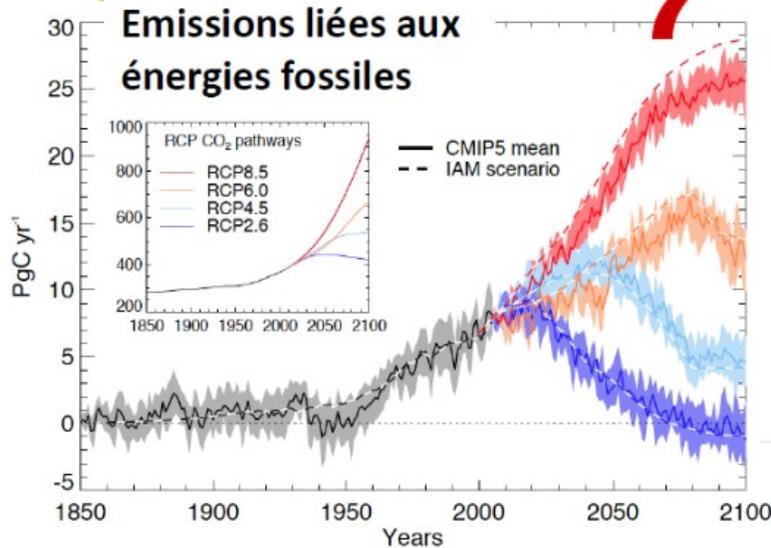


# OUTILS ET METHODES

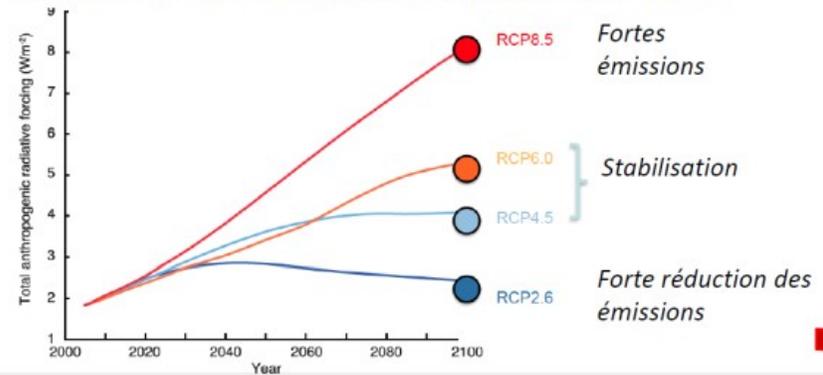
## 4 – TERMINOLOGIE ET METHODOLOGIE



Les projections climatiques dépendent des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP)



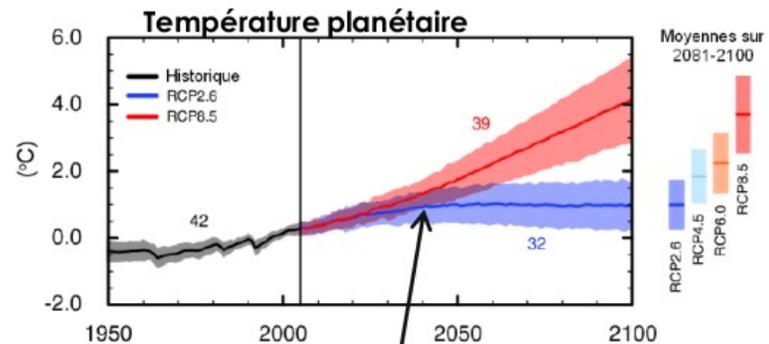
RCP : « Representative concentration pathways » ( en W/m²)



Scénarios:

- ✓ RCP2.6 - neutralité carbone à partir de 2050
- ✓ RCP4.5 - baisse des émissions à partir de 2050
- ✓ RCP8.5 - poursuite de fortes émissions de GES

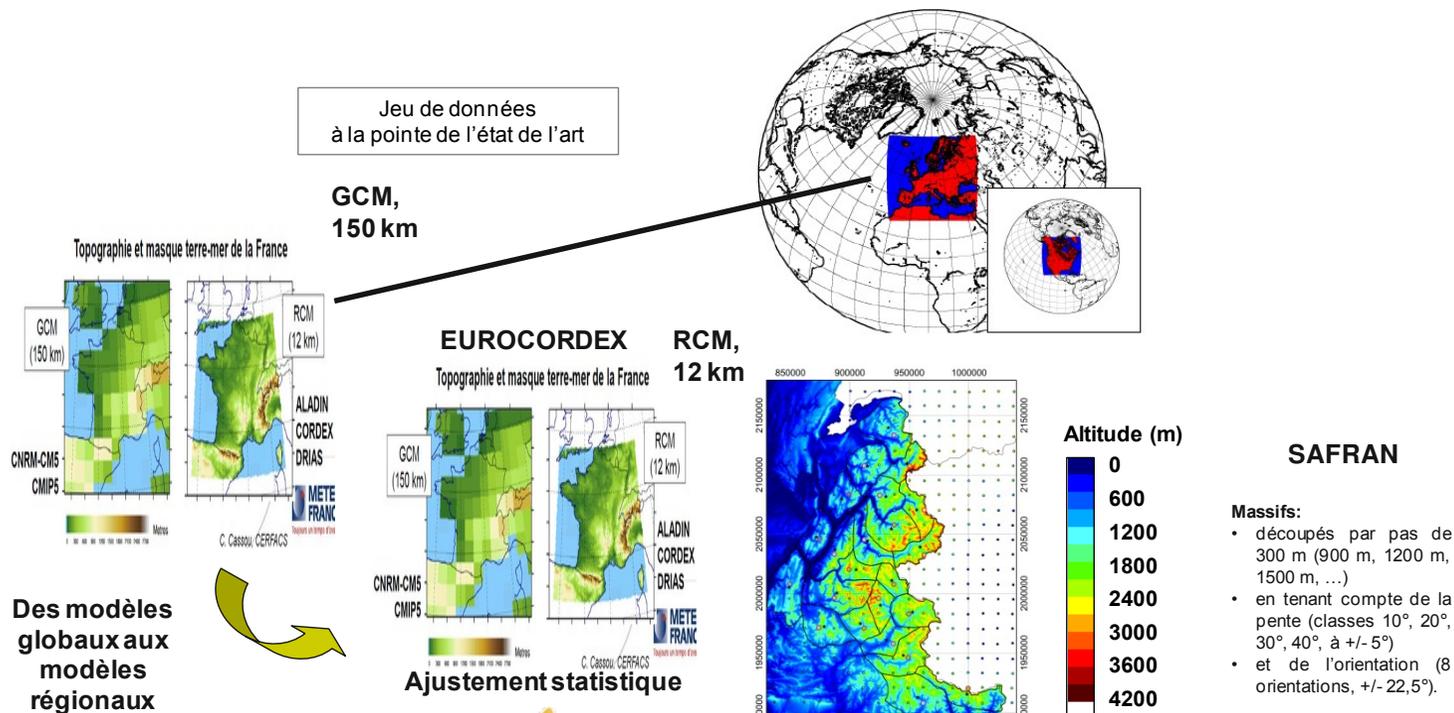
**NOTE 1:** dans les analyses, on se focalise surtout sur le **RCP8.5**, car ce scénario, bien qu'improbable, reste tout à fait possible et permet de définir une référence « pessimiste » qui minimise le risque dans la prise de décision.



**NOTE 2:** jusqu'à 2040-2050, faibles différences entre les scénarios en termes d'impact sur l'évolution des températures (à cause de l'inertie du système).

Projections climatiques, avec méthode de descente d'échelle adaptée aux zones de montagne françaises

La chaine 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-météorologiques à différentes échéances.



Des modèles globaux aux modèles régionaux

Ajustement statistique

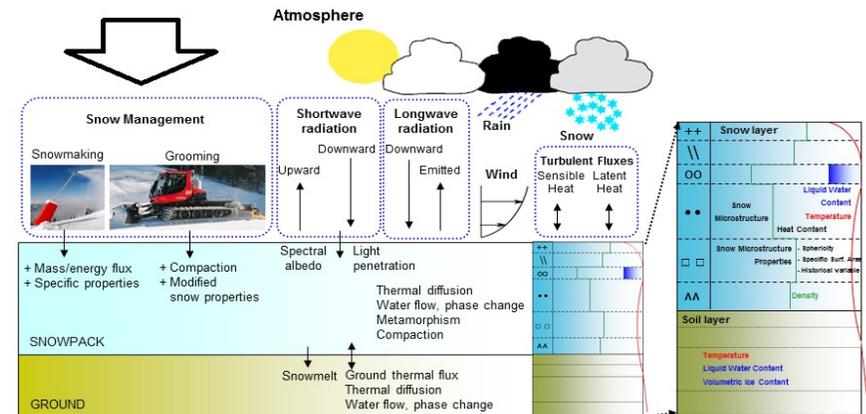
SAFRAN

Massifs:

- découpés par pas de 300 m (900 m, 1200 m, 1500 m, ...)
- en tenant compte de la pente (classes 10°, 20°, 30°, 40°, à +/- 5°)
- et de l'orientation (8 orientations, +/- 22,5°).

## 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) et la production de neige de culture (en fonction de la période de la saison, du type d'enneigreur, de la température humide, de la vitesse du vent et de l'objectif de production).



**Masse volumique de la neige de culture produite:**  $600 \text{ kg m}^{-3}$

**Schéma de production de neige:**

- À partir du 1er novembre, sous contrainte des seuils de vent et de température humide différents, sans limite sur la disponibilité de la ressource en eau et avec des objectifs de production différents en fonction des périodes. Entre le 1/11 et le 15/12 : constitution d'une sous-couche avec une phase de production correspondant à  $150 \text{ kg m}^{-2}$  d'eau convertie en neige de culture, soit 15 cm de neige de culture à  $600 \text{ kg m}^{-3}$  en tenant compte de 40% de pertes d'eau.
- Entre le 15/12 et le 31/03 la production dès lors que l'épaisseur de neige devient inférieure à 60 cm, et ce jusqu'au 31/03.
- A partir du 31/03: plus de production.

**Seuil de vitesse du vent pour la production:** 4,2 m/s (environ 15 km/h)

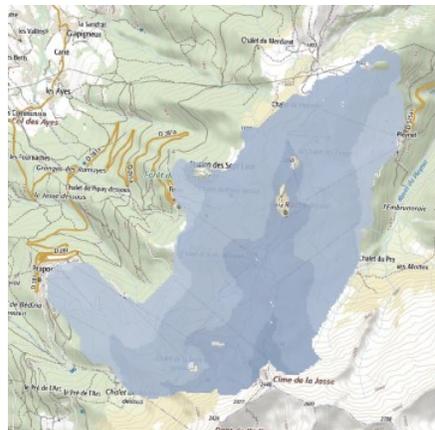
**Seuil de température humide:** inférieur ou égal  $-2^\circ\text{C}$  pour les mono-fluides et  $-6^\circ\text{C}$  pour les bi-fluides



## Représentation des domaines skiables

Représentation spatiale des stations par pas de 300 m (900 m, 1200 m, 1500 m etc.), en tenant compte de la pente (classes 10°, 20°, 30°, 40°, à +/- 5°) et de l'orientation (8 orientations, +/- 22,5°).

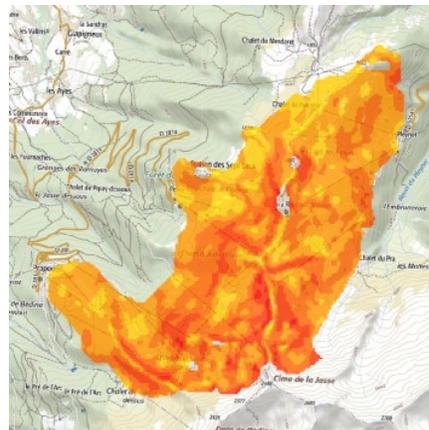
Altitudes



Plages d'altitude

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

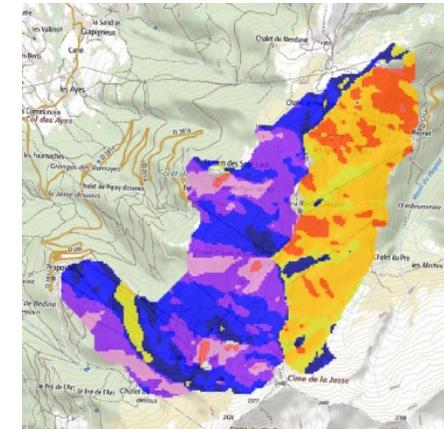
Pentes



Pentes

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

Orientations

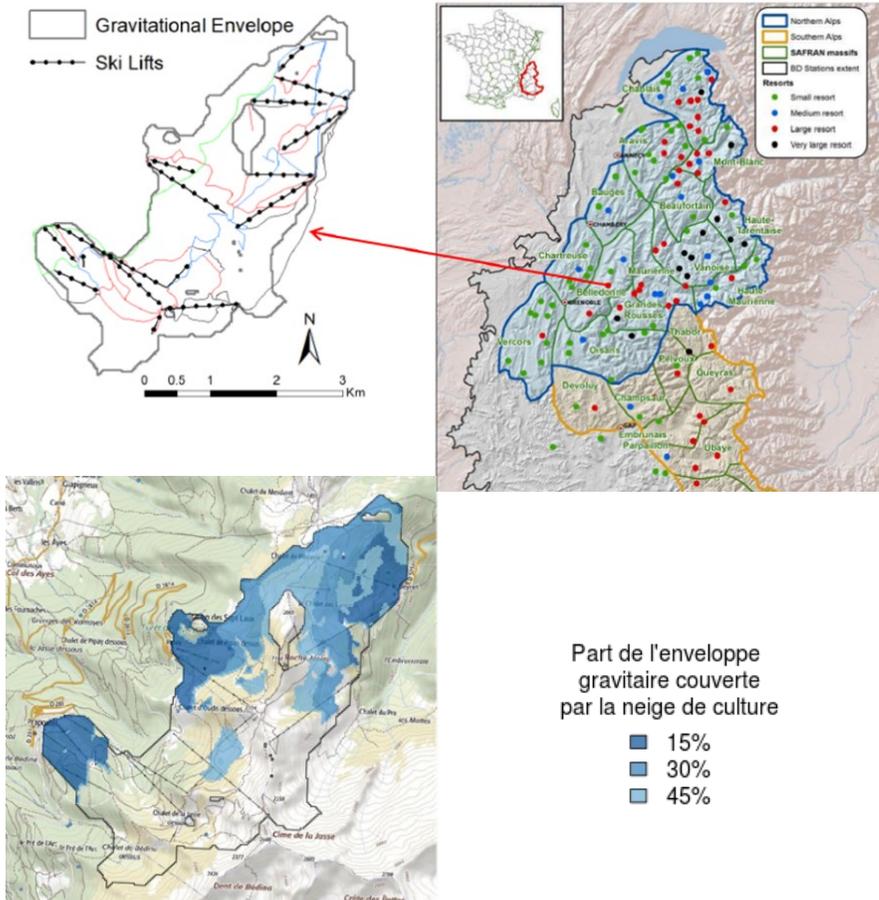


Orientations

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

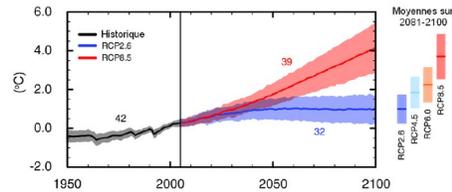
## Représentation des domaines skiables

Prise en compte des données cartographiques des stations, incluant le récolement des remontées mécaniques, les tracés de pistes et le réseau de neige de culture.

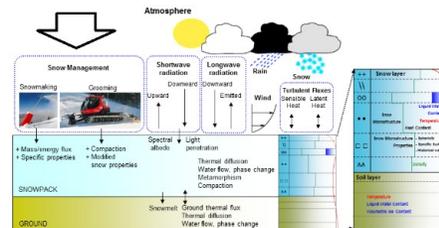


- Collecte de données auprès des opérateurs (récolement des remontées mécaniques, tracés de pistes et de neige de culture, unités de stockage d'eau)
- Modélisation des enveloppes gravitaires (ensemble des points accessibles depuis le sommet des remontées mécaniques permettant de rejoindre le pied d'un appareil dans la même station)
- Modélisation explicite de la couverture en neige de culture

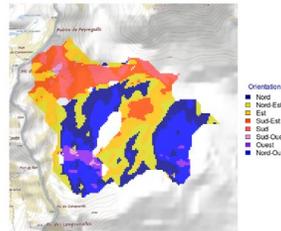
Scénarios climatiques  
« zoomés »



Modélisation de la  
neige (naturelle et  
gérée)



Représentation de la  
topographie



Prise en compte des  
caractéristiques locales  
(emplacement des  
enneigeurs, dialogue  
technique)



**Traitement statistique de  
l'indice de fiabilité de  
l'enneigement. Focus sur  
la fréquence de retour des  
années « délicates » (Q20)  
plutôt que la moyenne  
multi-annuelle**

# **RESULTATS**

## **Puy Saint Vincent**

### **Pelvoux-Vallouise**

**5 – LA COLLECTE DE LA BASE DE DONNEES**

**6 – LES INDICATEURS CLIMATIQUES**

**7 – LES VOLUMES D'EAU**

**8 – LES DUREES D'ENNEIGEMENT**

**Station : PUY SAINT VINCENT**

Synthèse pistes		
Surface de pistes	171	ha
Longueur de pistes	35	km
Synthèse remontées mécaniques		
Longueur de RM	12	km
Dénivelée cumulée	3 420	m
Moment de puissance	6 520	km*pers./h
➤ couvert en neige de culture à :	55%	
Capacité totale du DS (en situation de confort)	7 020	pers.
Synthèse neige de culture		
Volume d'eau disponible dans les retenues	58 000	m <sup>3</sup>
Consommation moyenne par saison (2012 – 2020)	102 000	m <sup>3</sup>
Surface de pistes couverte en neige de culture	49	ha
➤ proportion de pistes avec neige de culture	29%	

**Station : PELVOUX VALLOUISE**

Synthèse pistes		
Surface de pistes	49	ha
Longueur de pistes	16	km
Synthèse remontées mécaniques		
Longueur de RM	4	km
Dénivelée cumulée	1 310	m
Moment de puissance	1 720	km*pers./h
➤ couvert en neige de culture à :	69%	
Capacité totale du DS (en situation de confort)	2 140	pers.
Synthèse neige de culture		
Volume d'eau disponible dans les retenues	3 000	m <sup>3</sup>
Consommation moyenne par saison (2012 – 2020)	47 000	m <sup>3</sup>
Surface de pistes couverte en neige de culture	29	ha
➤ proportion de pistes avec neige de culture	59%	

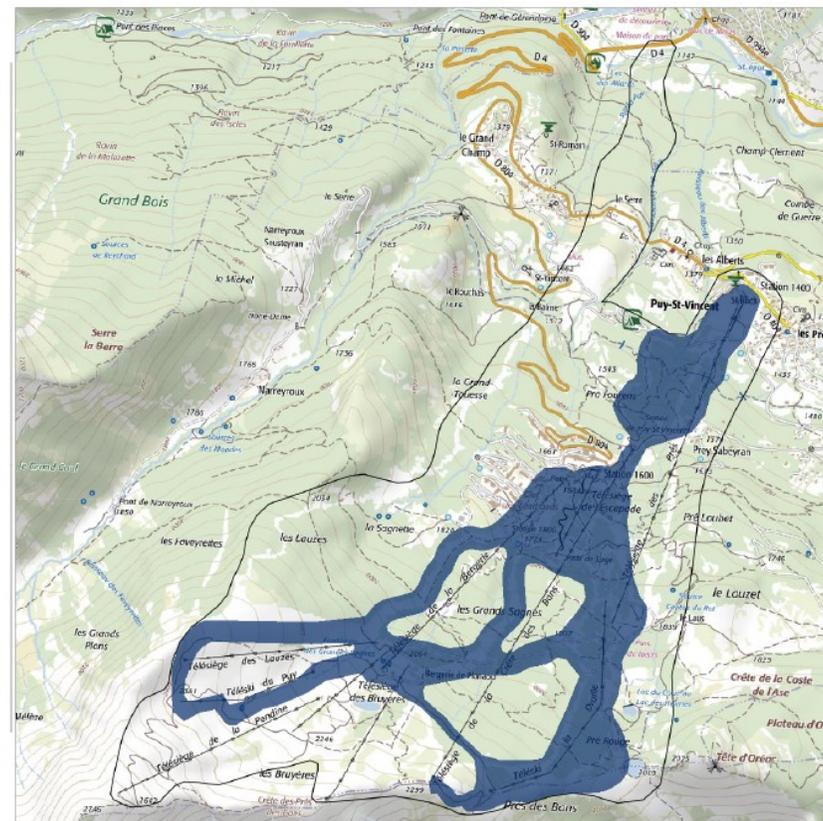
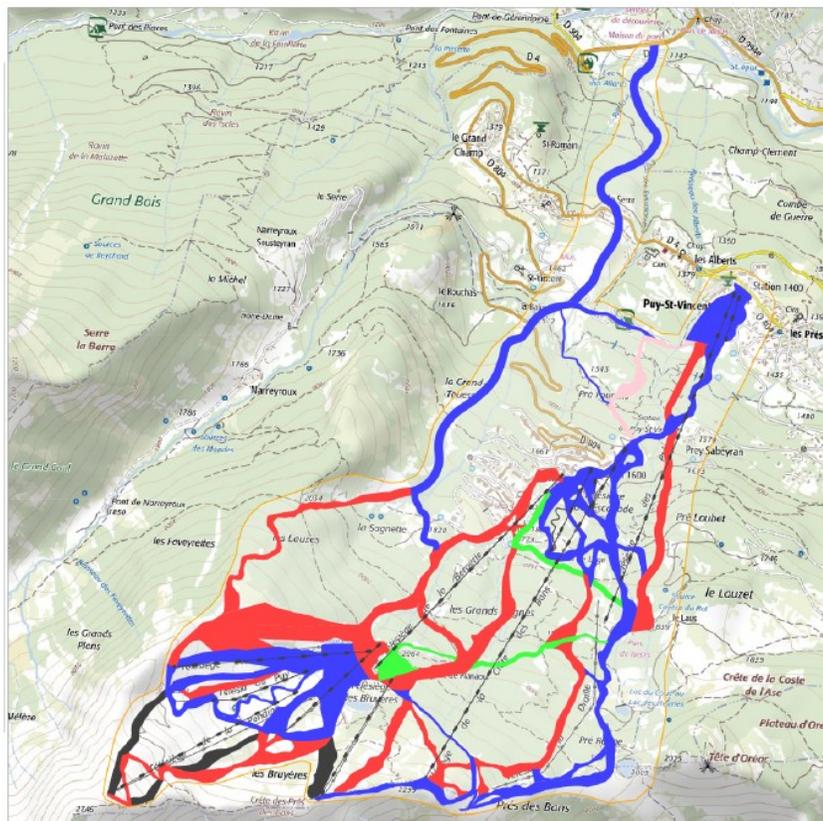


FIGURE 197 – A gauche : carte de la station, avec ses remontées mécaniques et ses pistes (si présentes, les couleurs correspondent aux niveaux de difficulté). A droite : zones couvertes par la neige de culture (état actuel).

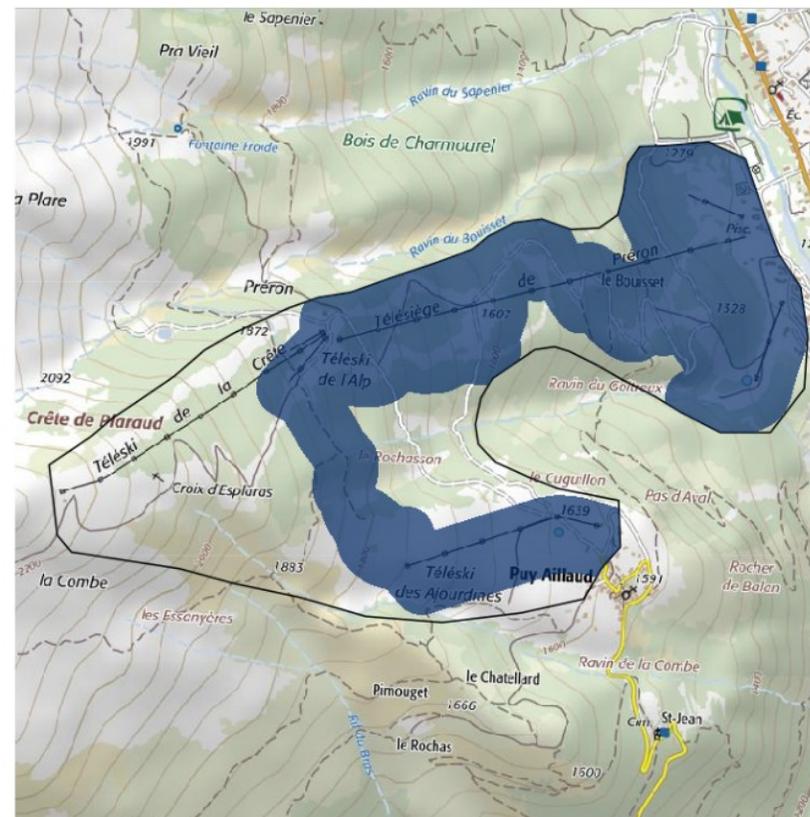
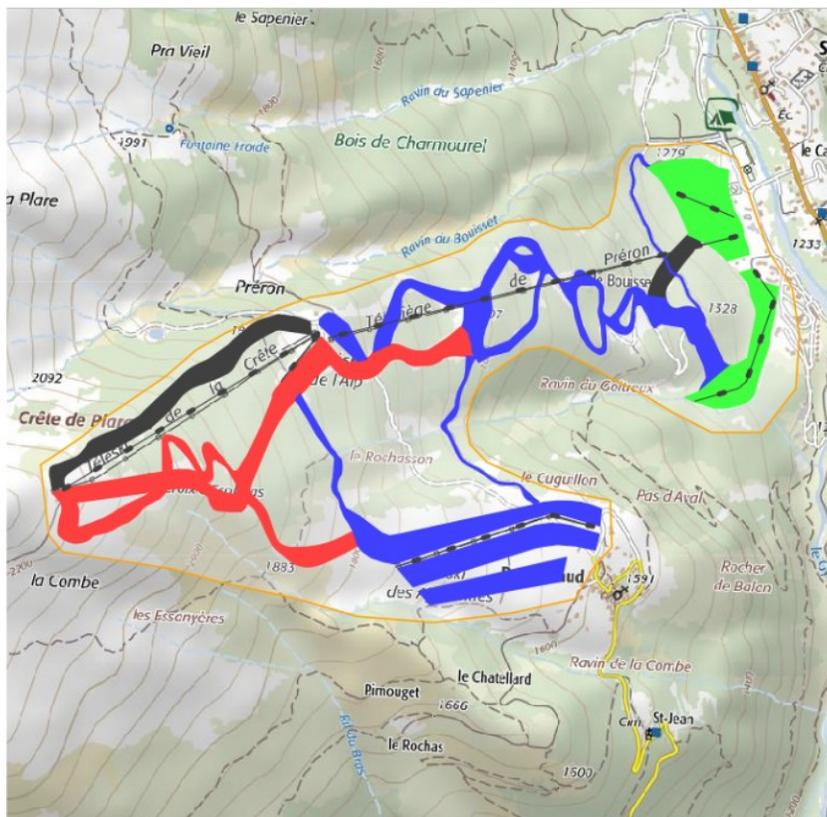
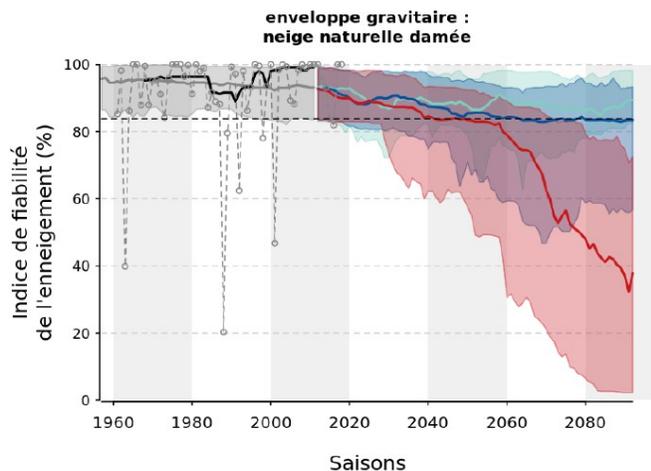
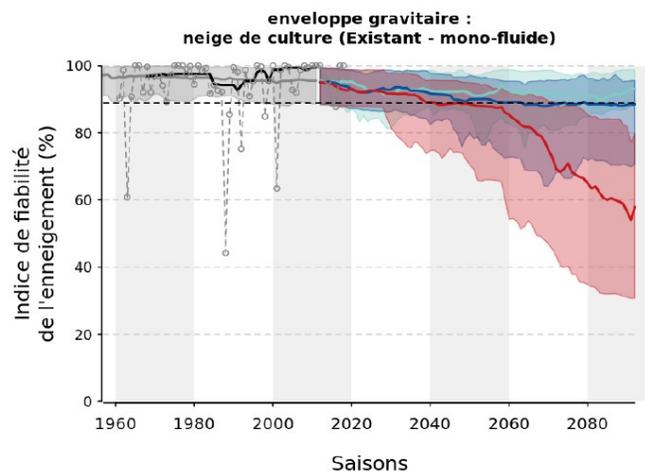
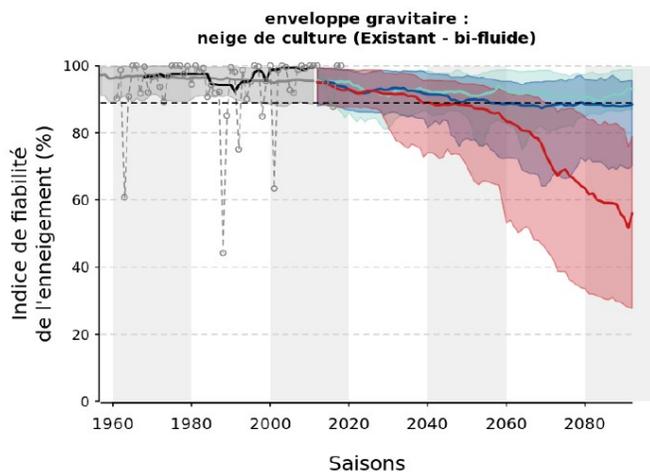


FIGURE 187 – A gauche : carte de la station, avec ses remontées mécaniques et ses pistes (si présentes, les couleurs correspondent aux niveaux de difficulté). A droite : zones couvertes par la neige de culture (état actuel).



- 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)

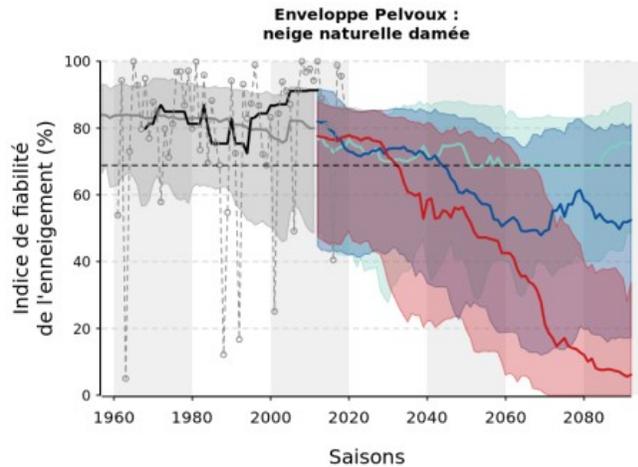
FIGURE 200 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement en neige naturelle damée.



Indice de fiabilité de l'enneigement

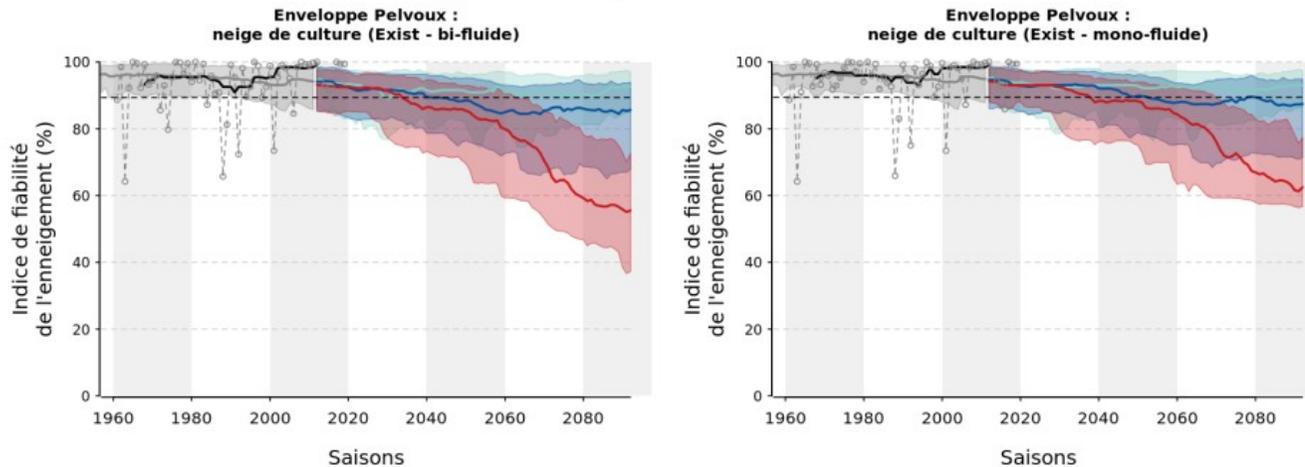
FIGURE 201 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement avec les équipements actuels de type "perches" (à gauche) et "ventilateurs" (à droite).





- 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)

FIGURE 190 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement en neige naturelle damée.

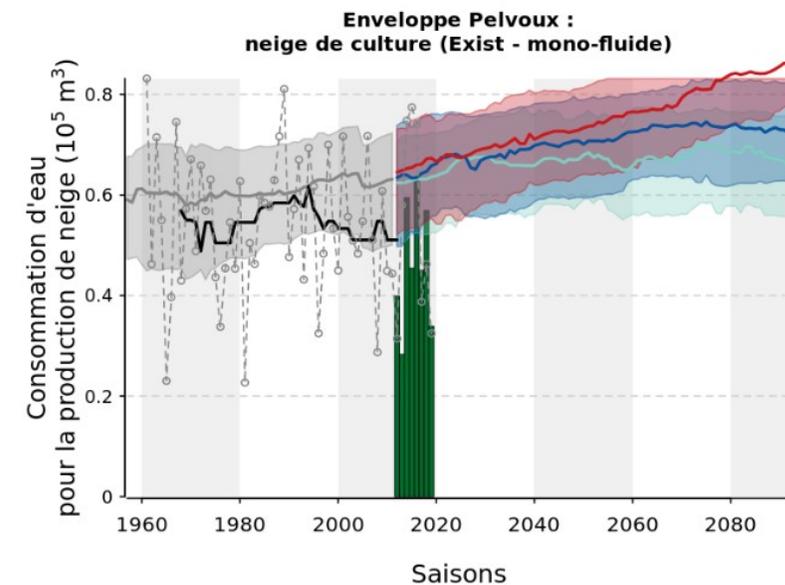
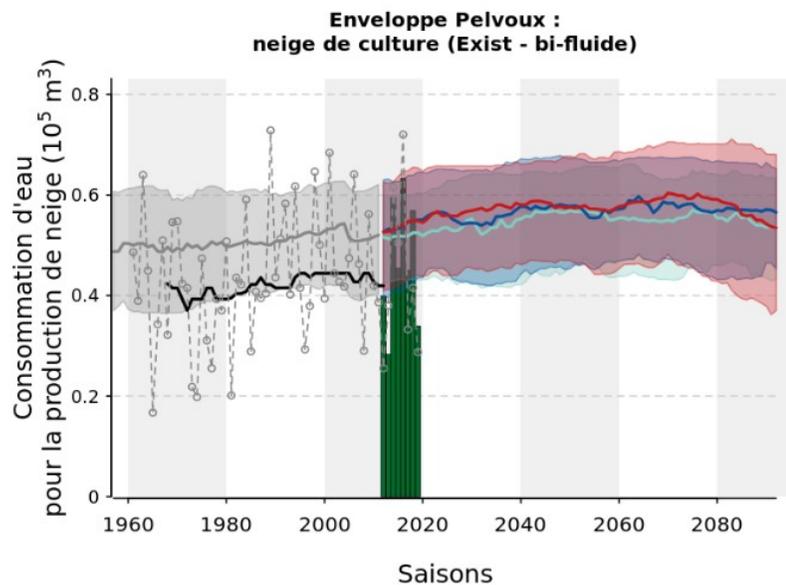
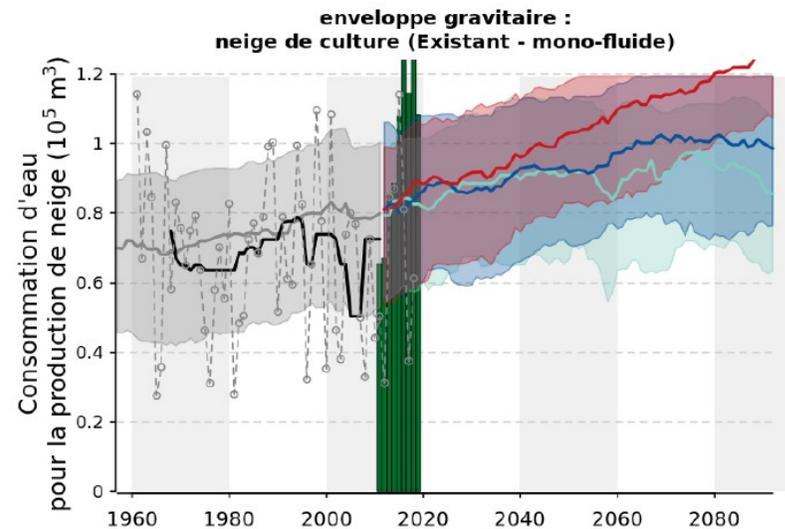
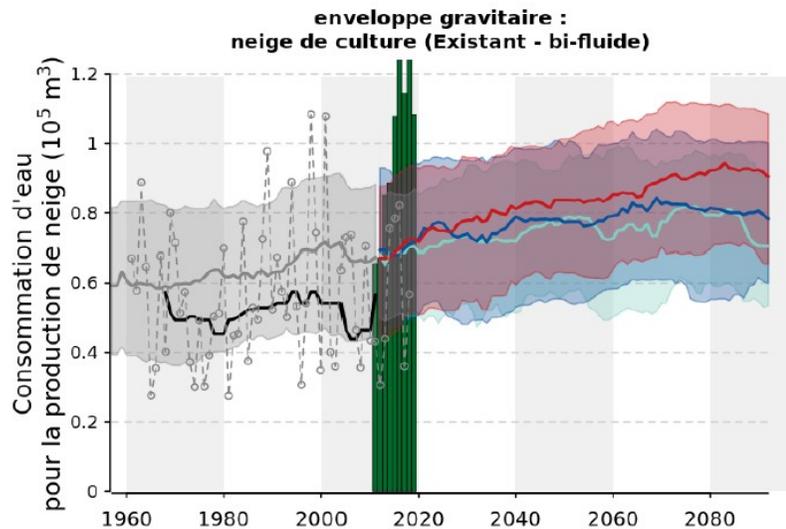


Indice de fiabilité de l'enneigement

FIGURE 191 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement avec les équipements actuels de type "perches" (à gauche) et "ventilateurs" (à droite).



Consommation en eau pour la production de neige de culture



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

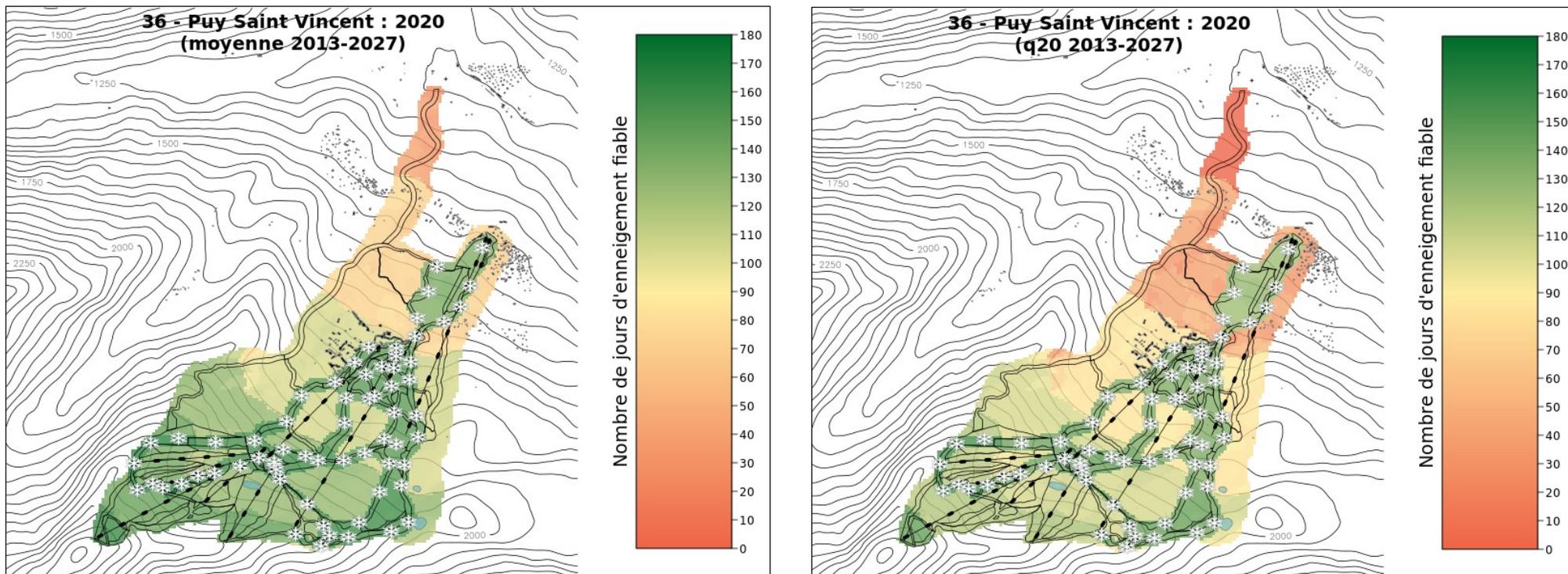


FIGURE 206 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte les équipements actuels et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons mauvaises (Q20).

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

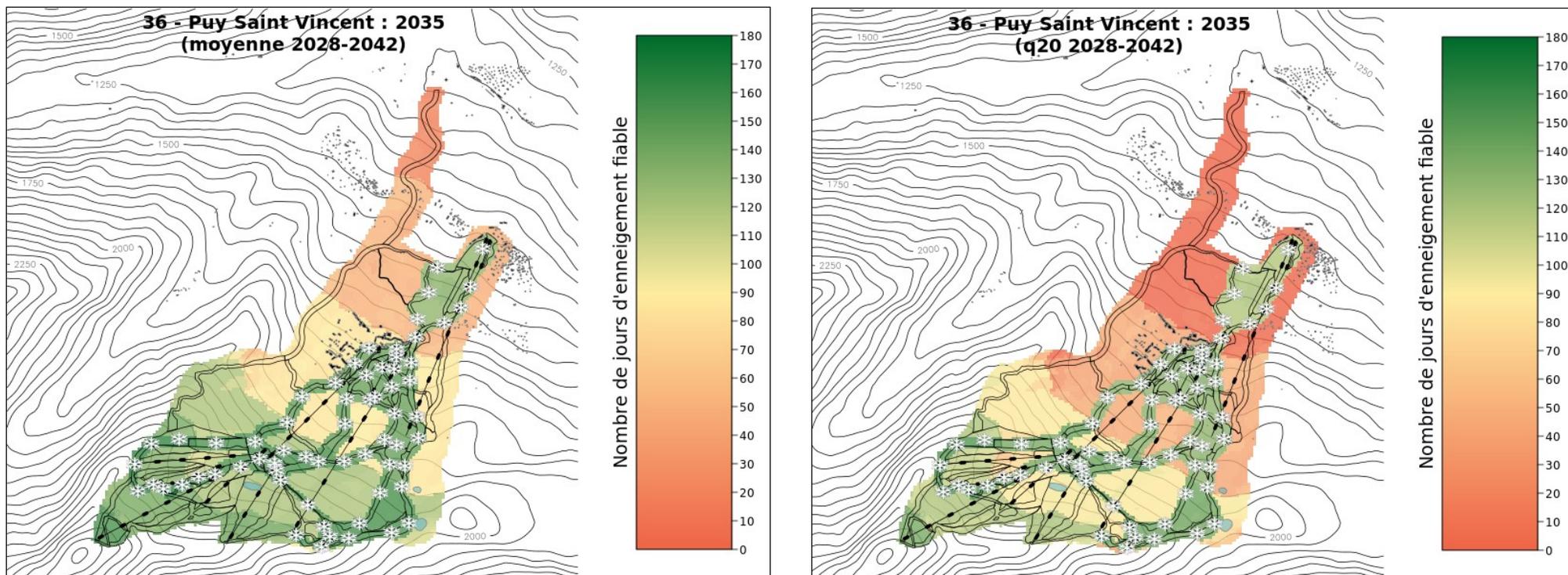


FIGURE 206 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte les équipements actuels et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons mauvaises (Q20).

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

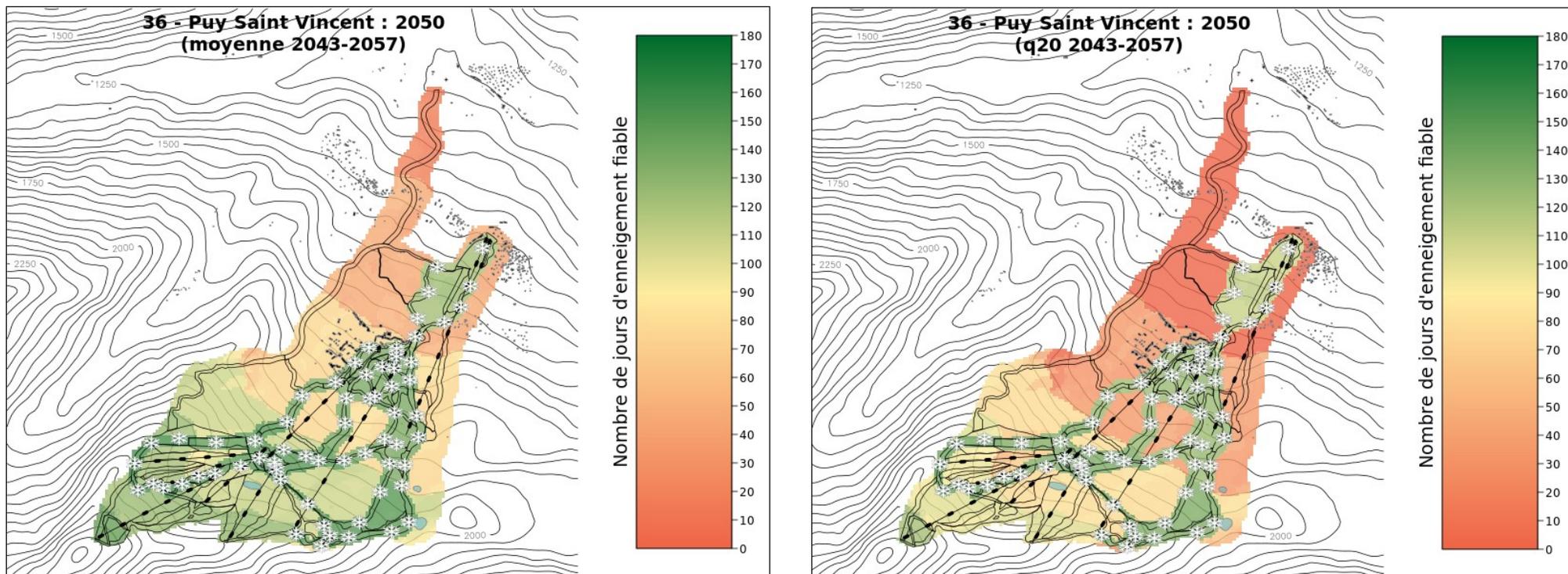
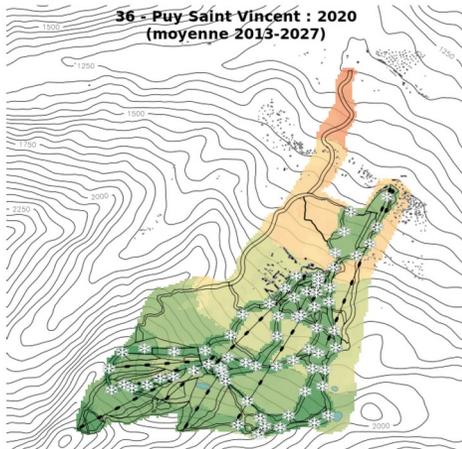
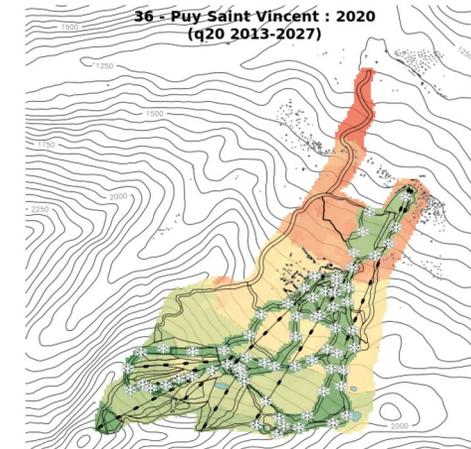
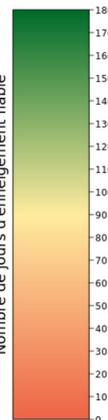


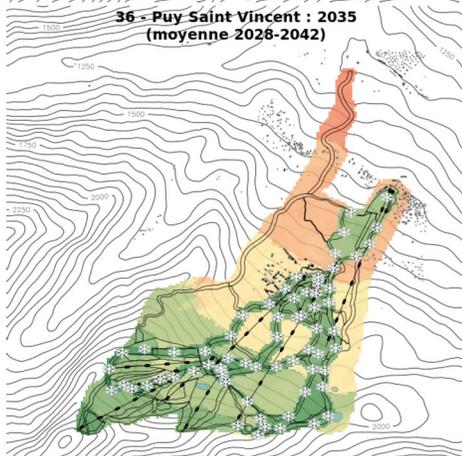
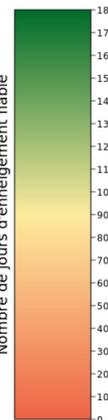
FIGURE 206 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte les équipements actuels et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons mauvaises (Q20).



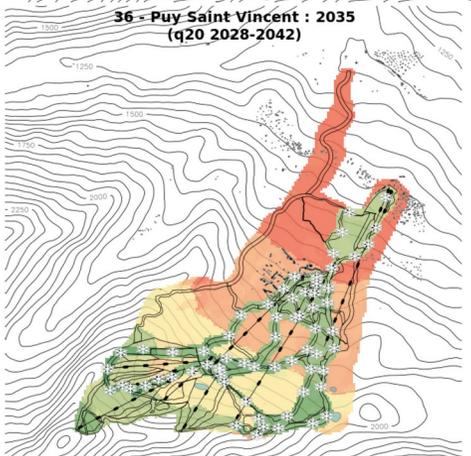
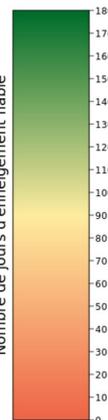
Nombre de jours d'enneigement fiable



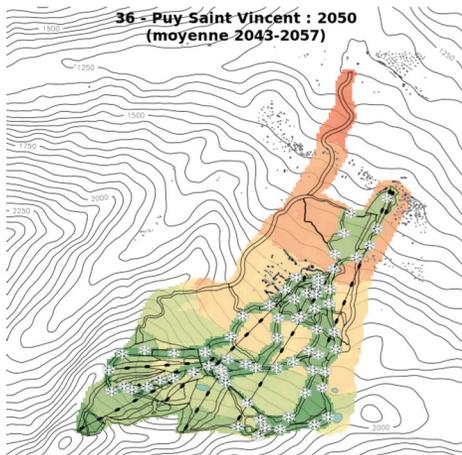
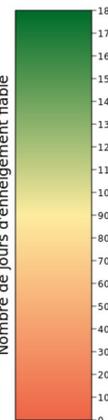
Nombre de jours d'enneigement fiable



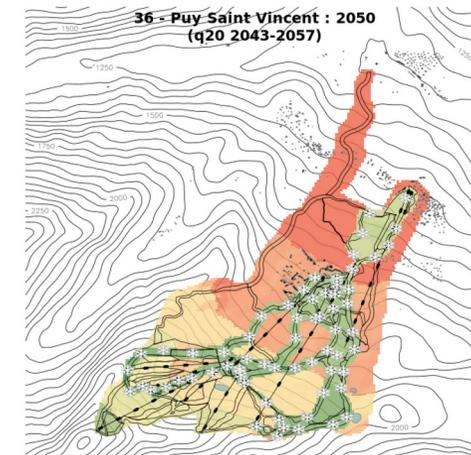
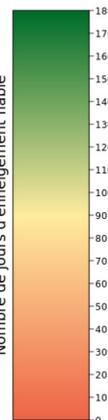
Nombre de jours d'enneigement fiable



Nombre de jours d'enneigement fiable



Nombre de jours d'enneigement fiable



Nombre de jours d'enneigement fiable





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

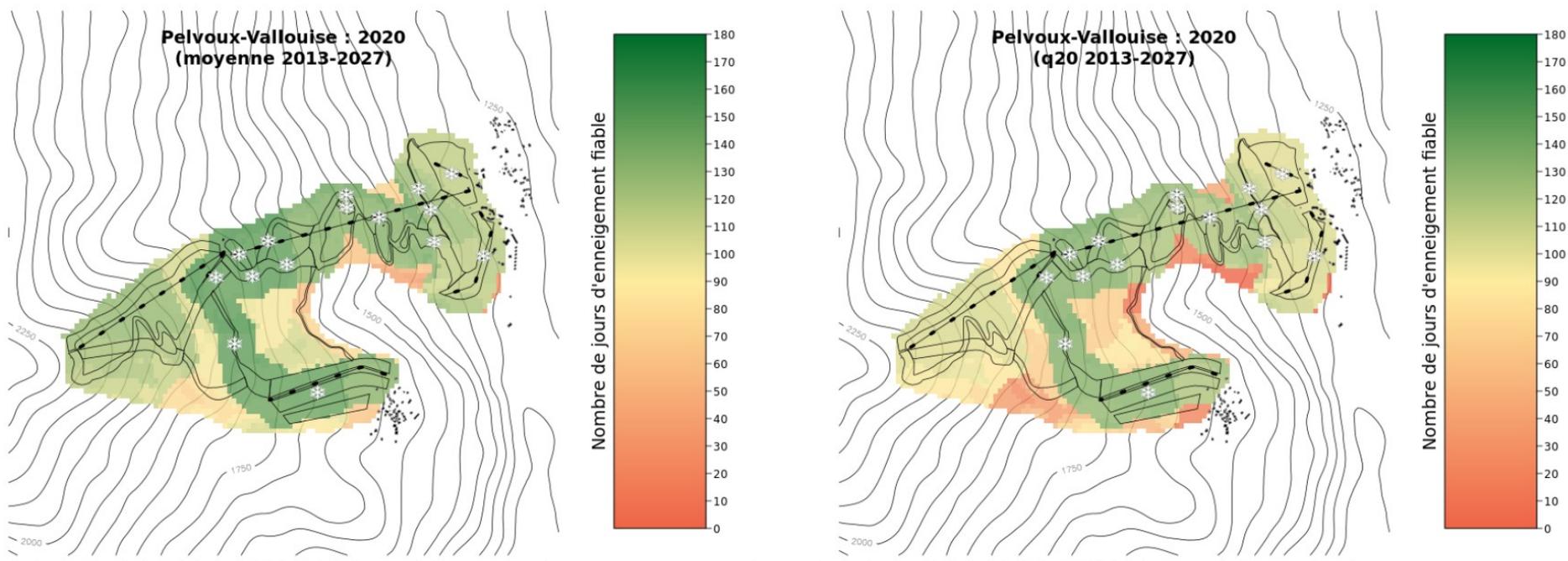


FIGURE 206 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte les équipements actuels et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons mauvaises (Q20).



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

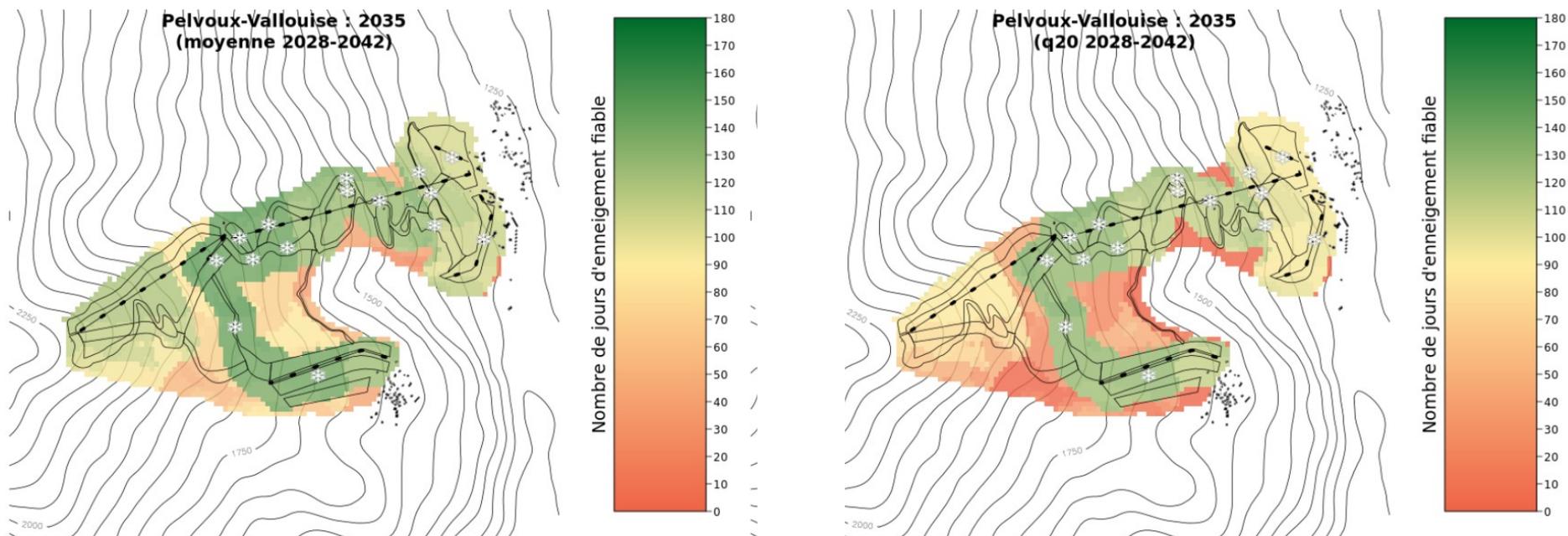


FIGURE 206 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte les équipements actuels et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons mauvaises (Q20).



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

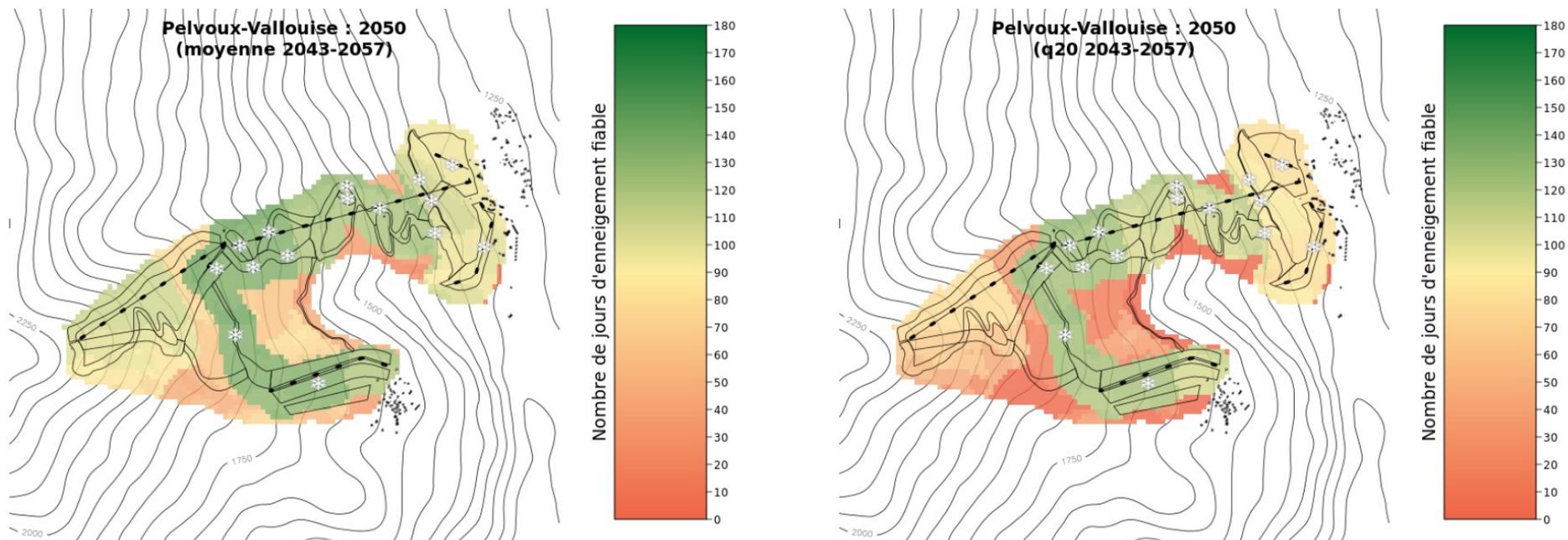
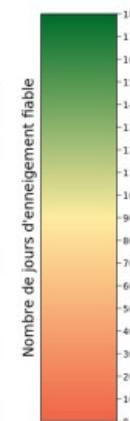
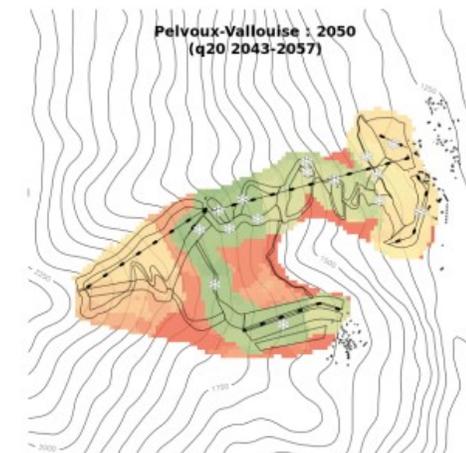
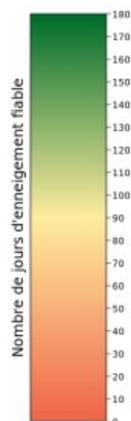
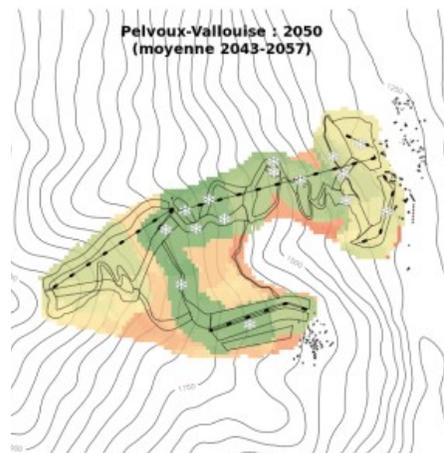
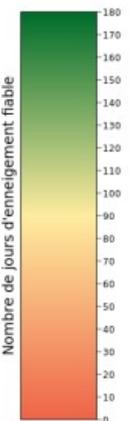
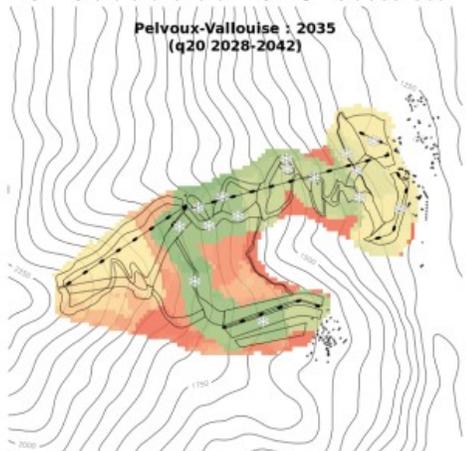
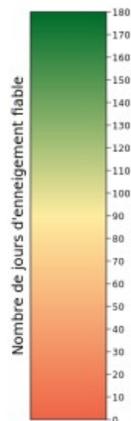
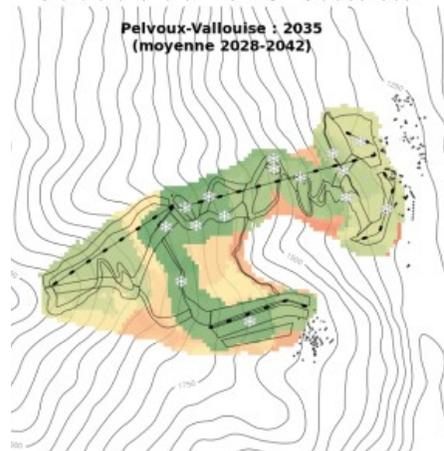
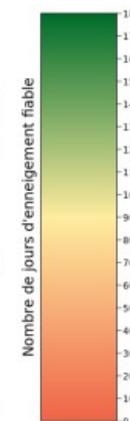
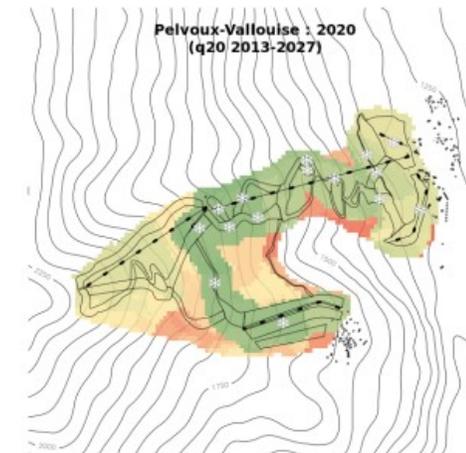
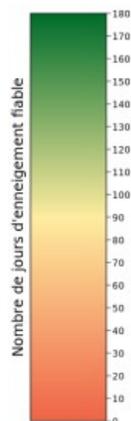
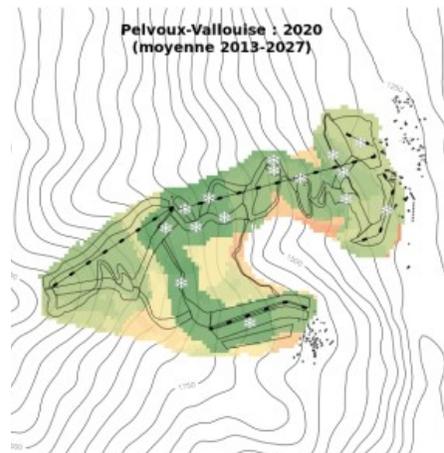


FIGURE 206 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte les équipements actuels et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons mauvaises (Q20).



# CONCLUSION

9 – SUITE DE L'ETUDE

Possibilité d'un **accompagnement encore plus spécifique** à l'interprétation et à l'utilisation des résultats, personnalisé à chaque station, qui permettra d'analyser les conséquences des changements dans les conditions nivo-météorologiques sur les choix stratégiques et les programmes d'investissements structurants (types d'investissement, temps d'amortissement, renforcement du réseau de neige de culture, diversification et activités 4 saisons, etc.). Ce contenu, à discuter avec le Maître d'Ouvrage dans le but de le façonner au mieux de ses attentes, pourrait comprendre :

- l'animation de tables de travail et d'ateliers sur site, au niveau d'un territoire ou d'une station, avec élus, techniciens, socio-pro, public élargi, etc,
- l'organisation de séances techniques visant à faciliter la compréhension et l'appropriation des résultats,
- la coordination des échanges sur les orientations stratégiques les plus adaptées par rapport aux effets du changement climatique,
- le consulting sur la diversification des activités touristiques et/ou à l'appui des dossiers d'aménagement, dans une démarche fédératrice des acteurs locaux,
- l'analyse des projets des schémas directeurs,
- la caractérisation des points forts issus des indicateurs ClimSnow,
- l'évolution du périmètre du domaine d'activités (été/hiver), l'évolution de la capacité d'accueil et l'évolution des liens entre pôles urbains et domaines d'activités,
- les dimensionnements de l'activité 'ski', des activités liées à la neige, des autres activités (été/hiver).

Pour ce faire, nous proposons une **méthode d'animation**, de co-construction, pour chaque station ou groupement si souhait de travailler en commun (par 2, par 3, au choix) :

- séance sur site pour appropriation des résultats, dégagements des grandes orientations aux principales échéances (2 x 15 ans) : 2035 – 2050,
- Intégration d'analyses à partir du plan d'amortissements des équipements structurants, planning des GI sur les remontées mécaniques, caractéristiques principales du système d'enneigement et de sa ressource en eau, analyse du registre (O/F) des pistes de ski, activités diversifiées en place,
- Séance sur site pour intégration des analyses complémentaires et dégagement des orientations – grandes lignes de programmation avec échancier,
- Mise en forme d'un document illustré avec plans topographiques présentant les intentions aux horizons 2035 – 2050.

De plus, les stations qui le souhaitent pourront obtenir des **informations encore plus complètes** et détaillées permettant de mieux identifier les effets du changement climatique sur leurs choix stratégiques et leurs investissements futurs et de définir une stratégie globale de développement de l'offre touristique. Pour ce faire, des prestations à la carte sont proposées, incluant les éléments suivants :

- analyse de la stratégie de production de la **neige de culture**, avec dimensionnement des installations en fonction des évolutions climatiques attendues,
- production de cartes 3D et/ou animations **3D** des durées d'enneigement au-delà d'un seuil de quantité de neige (moyenne et variabilité), en fonction de l'équipement et de la période temporelle future,
- étude des disponibilités en **eau** passées et futures, avec calcul de l'évolution de la demande (neige de culture, eau potable, etc.) et de l'offre (débit des rivières, stocks des barrages, etc.) - En partenariat avec EDF-DTG.



**INRAE**



## - CLIMSNOW -

**ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET  
PROJECTIONS DE L'EVOLUTION DE L'ENNEIGEMENT**

**MERCI DE VOTRE ATTENTION !**