



ÉTUDE D'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA STATION DE : AUSOIS



Projet cofinancé par la Région Auvergne-Rhône-Alpes
dans le cadre de sa politique « Territoires Région Montagne Eté - Hiver » en faveur des Espaces Valléen

25 juin 2024

Table des matières

1	MÉTHODOLOGIE ET TERMINOLOGIE	2
1.1	Objectifs et enjeux de l'étude	3
1.2	Projections climatiques	3
1.3	Modélisation de l'enneigement	3
1.4	Représentation des domaines skiables	5
1.5	Indicateurs nivo-météorologiques	6
2	AUSOIS	8
2.1	AUSOIS	9
2.2	AUSOIS-NORDIQUE	21
3	ANALYSES	29
3.1	Prise en compte des projets d'aménagement	30
3.2	Principaux enseignements de l'étude ClimSnow	30
3.3	Les durées d'enneigement	31
3.4	La production de neige de culture	37
3.5	Analyse globale	37
3.6	Conclusion	37

1 MÉTHODOLOGIE ET TERMINOLOGIE

1.1 Objectifs et enjeux de l'étude

Le contexte et la problématique

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. Dans ce contexte, la Région Sud a souhaité s'engager dans une démarche visant à objectiver l'impact du changement climatique sur l'évolution de la couverture nivale de ses stations de ski, afin d'anticiper les contraintes qui semblent se dessiner pour l'avenir et d'adapter l'offre touristique à moyen et long terme.

La solution apportée

La méthodologie des études CLIMSNOW, développée par le consortium comprenant INRAE, Météo-France et Dianeige, permet de :

- quantifier les effets du changement climatique sur les évolutions attendues des principales variables nivo-météorologiques et sur la fiabilité de l'enneigement,
- comparer les conditions d'exploitation à l'horizon 2050, avec une prise en compte directe de la topographie et des techniques de gestion de la neige (damage, neige de culture),
- définir des éléments concrets permettant de guider les exploitants dans leurs choix d'investissement et leurs stratégies de diversification des activités touristiques.

Le principal résultat de cette approche 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 chaque station de ski à maintenir son exploitation selon quels efforts, selon quelles modalités et ce, à différentes échéances. Afin d'appréhender les effets du changement climatique sur les conditions d'enneigement des stations dans les prochaines décennies, CLIMSNOW utilise l'état de l'art des outils de la recherche scientifique (projections climatiques avec scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, modélisation physique de l'évolution du manteau neigeux en intégrant le damage et la neige de culture, prise en compte de la topographie locale des stations). En sortie, une série d'indicateurs sont calculés et analysés : indice de fiabilité de l'enneigement, taux de retour des saisons défavorables, durées d'enneigement. Pour la neige de culture, l'étude simule l'évolution future du potentiel de froid et les volumes d'eau à consommer.

1.2 Projections climatiques

Les projections climatiques dépendent des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (scénarios RCP). 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 et existant, 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. Une méthode de descente d'échelle permet d'adapter les projections climatiques aux zones de montagne françaises.

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

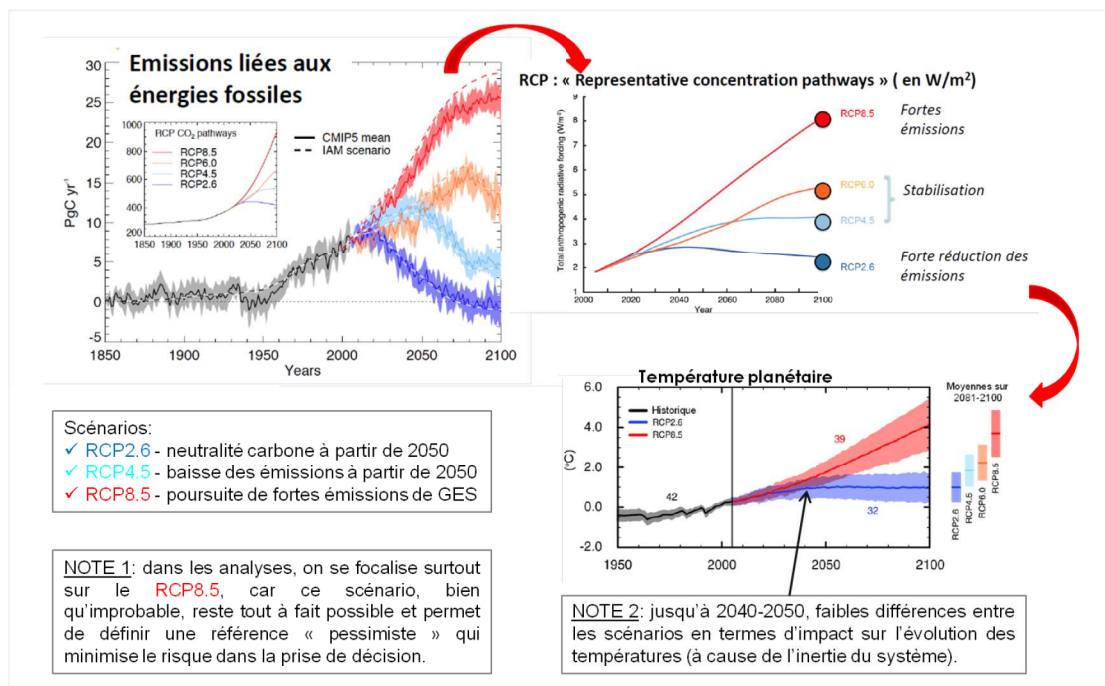


Figure 1 – Les projections climatiques dépendent des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.

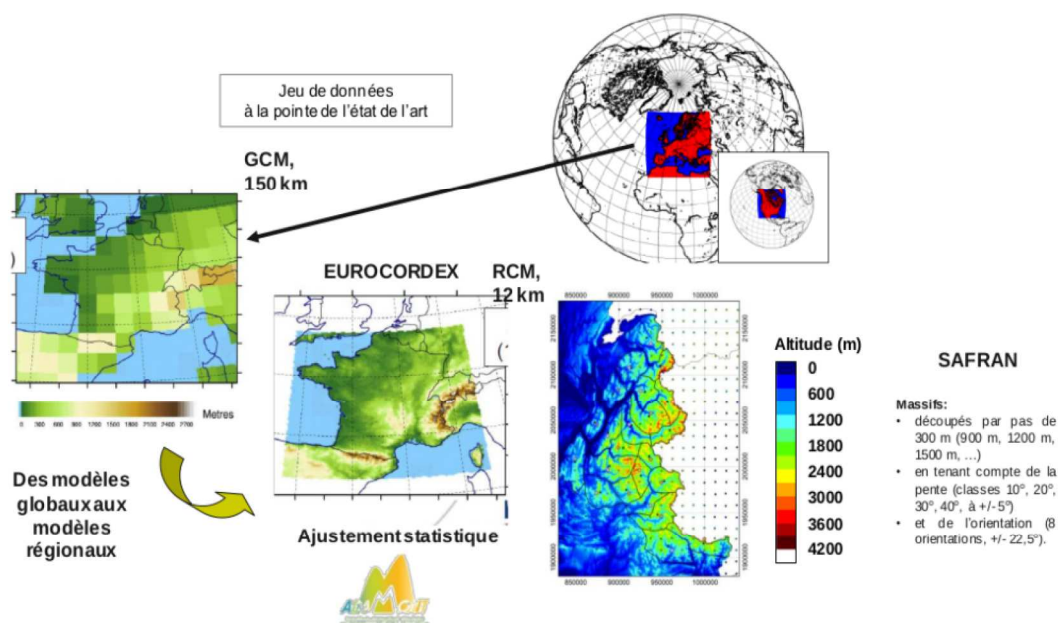


Figure 2 – Avec des niveaux de zoom progressifs, CLIMSNOW permet de passer des prévisions à grande échelle (qui couvrent toute la planète) à des prévisions locales (qui prennent en compte la topographie des stations de ski).

Paramétrisation de la neige de culture dans le modèle Crocus-Resort :

- Masse volumique de la neige de culture produite : 600 kg m^{-3}
- Schéma de production de neige :
 - Production à partir du 01/11, sous contrainte des seuils de vent et de température humide, sans limite sur la disponibilité de la ressource en eau et avec des objectifs de production différents en fonction des périodes
 - Entre le 01/11 et le 15/12 : constitution d'une sous-couche avec une phase de production correspondant à 150 kg m^{-2} d'eau convertie en neige de culture, soit 15 cm de neige de culture à 600 kg m^{-3} en tenant compte de 40% de pertes d'eau
 - Entre le 15/12 et le 31/03 : 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°C pour les mono-fluides et -6°C pour les bi-fluides

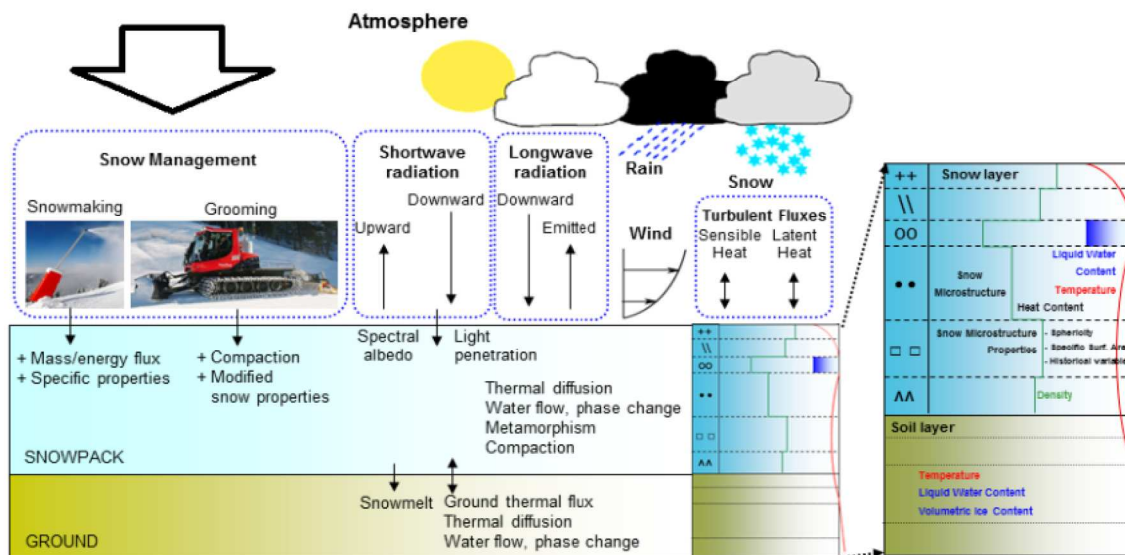


Figure 3 – Schéma du modèle de neige Crocus-Resort, intégrant la prise en compte de la neige de culture et du damage.

1.4 Représentation des domaines skiables

CLIMSNOW intègre les données cartographiques de chaque station, incluant le récolement des remontées mécaniques, les tracés de pistes et le réseau de neige de culture. Cette intégration se fait en plusieurs étapes :

- collecte de données auprès des opérateurs (remontées mécaniques, pistes, neige de culture),
- 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.

La chaîne de modélisation permet de simuler l'évolution des variables nivo-météorologiques de façon très locale au sein d'un domaine skiable, avec la prise en compte des différentes altitudes, orientations et pentes. La représentation spatiale se fait par bandes verticales de 300 m (900 m, 1200 m, 1500 m etc.), avec 8 orientations par rapport au nord et 5 classes de pentes (de 0° à 40°).

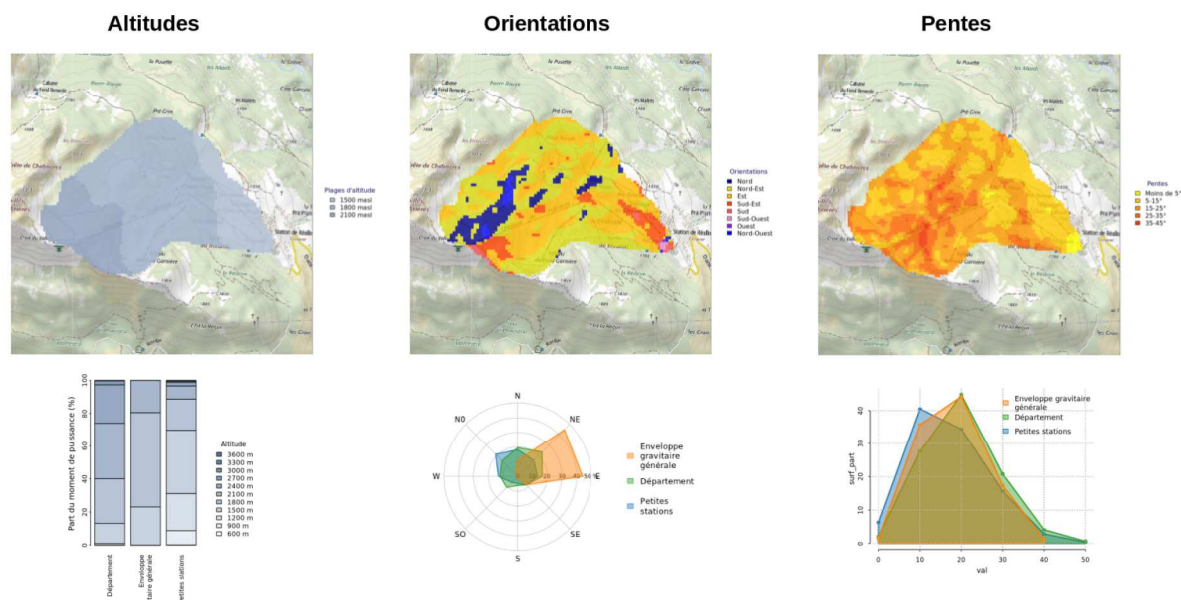


Figure 4 – Découpage d'une station de ski en fonction de ses altitudes, ses orientations et ses pentes. Cette approche permet de définir les zones sur lesquelles les simulations de l'enneigement sont lancées.

1.5 Indicateurs nivo-météorologiques

Dans CLIMSNOW, une série d'indicateurs permettent d'évaluer les effets du changement climatique sur les conditions nivo-météorologiques locales. Ces indicateurs sont fournis pour la période historique (depuis 1959) et pour la période future (jusqu'à 2100).

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.

Taux de retour des saisons défavorables

Cet indicateur montre la fréquence de retour des hivers défavorables en termes d'enneigement, tels qu'ils sont définis par le Q20 sur la période historique. Par exemple, si le taux de retour en 2100 est égale à 100%, cela signifie que les conditions défavorables qui dans le passé ne se présentaient qu'une année sur 5 (20%) seront rencontrées toutes les années (100%) à la fin du siècle.

Fenêtres de froid

Nombre d'heures pendant lesquelles la température humide (paramètre clé pour la production de neige de culture) est inférieure à un certain seuil. Cet indicateur est calculé pour l'altitude la plus basse du domaine skiable et pour différentes périodes de la saison. Les plages de température humide considérées sont les suivantes : entre -1°C et -4°C , entre -4°C et -6°C et inférieures à -6°C .

Consommation en eau pour la production de neige de culture

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

Durée d'enneigement

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.

2 AUSSOIS

2.1 AUSSOIS

2.1.1 Caractéristiques du domaine : RM, pistes, neige de culture

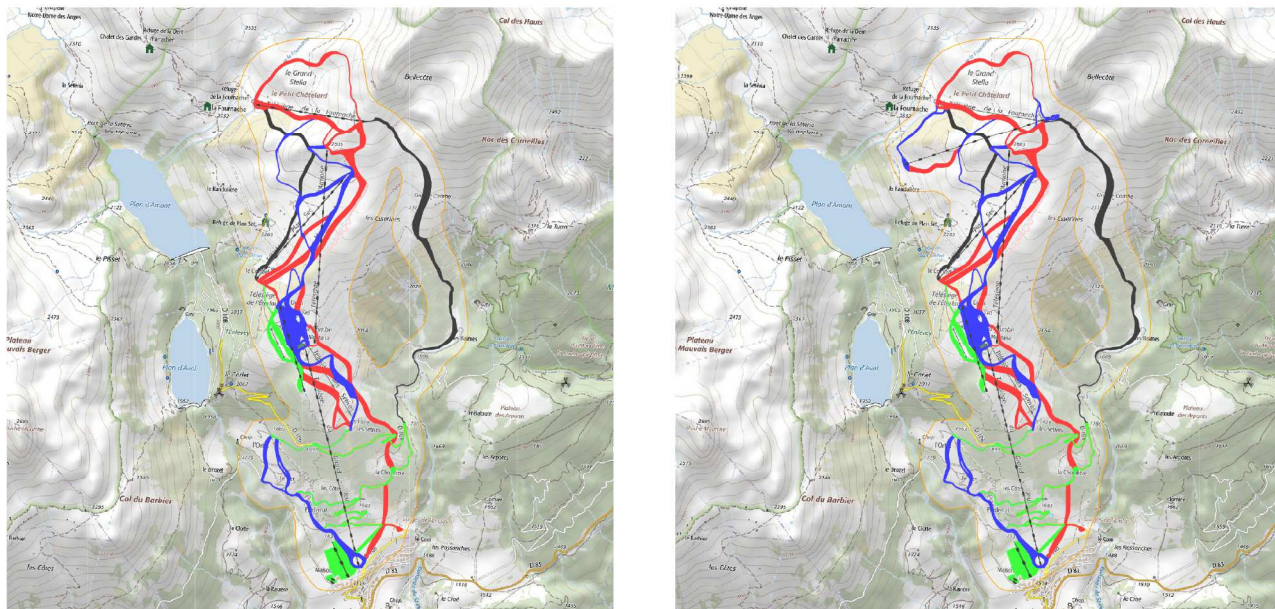


Figure 5 – Carte du domaine, avec ses remontées mécaniques et ses pistes (les couleurs correspondent aux niveaux de difficulté). A gauche l'état actuel, à droite la prise en compte des projets.

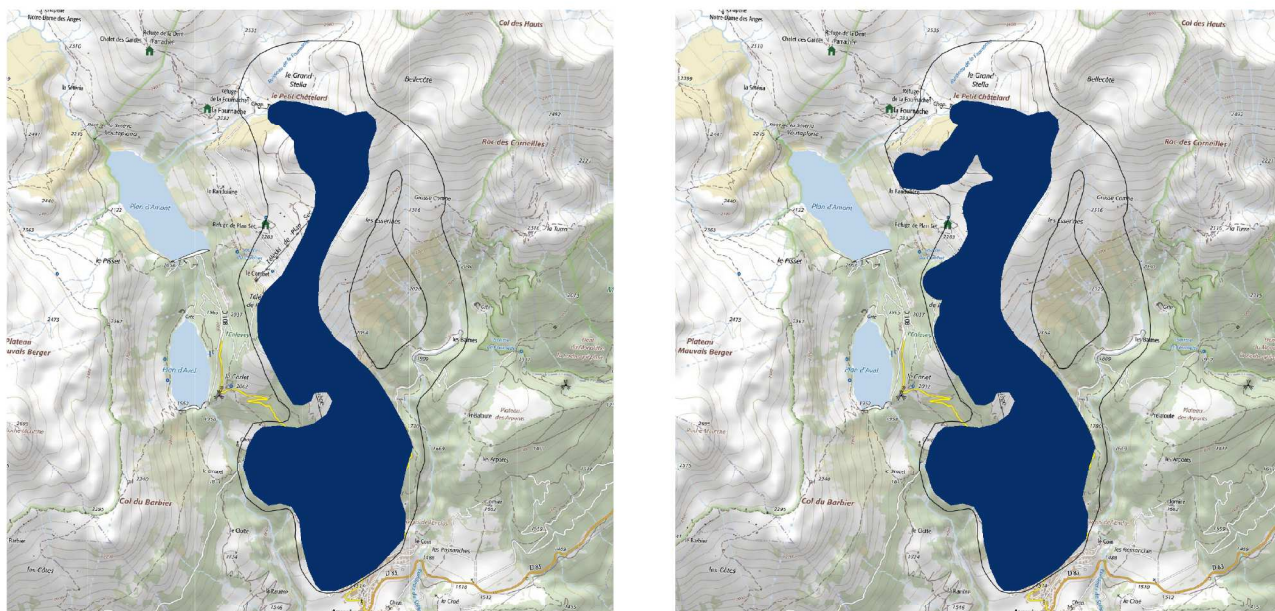


Figure 6 – Zones couvertes par la neige de culture. A gauche l'état actuel, à droite la prise en compte des projets.

2.1.2 Indice de fiabilité de l'enneigement

L'indice de fiabilité de l'enneigement est calculé chaque année pour l'ensemble du domaine skiable. Il traduit les conditions d'exploitation, en prenant en compte les caractéristiques topographiques des pistes et la répartition des remontées mécaniques en fonction de l'altitude. Cet indicateur peut être interprété comme la part du domaine skiable exploitable (entre 0% et 100%) et dépend donc non seulement du scénario d'émission de gaz à effet de serre, mais aussi des équipements de la station et des techniques de gestion de la neige (damage, production de neige de culture).

Les graphiques représentent l'évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement (pourcentage du domaine skiable qui peut être ouvert aux clients pendant toute la saison) sur une période de 15 années centrée sur l'année considérée (soit 2013-2027 pour l'année 2020). Le Q20 de l'indice de fiabilité de l'enneigement est calculé sur la période de référence passée (1986-2015) et correspond aux conditions d'enneigement qui permettent de séparer les 20 pires saisons sur un échantillon de 100. Par exemple, un Q20 de 33% signifie que, 1 saison sur 5, on a pu ouvrir moins de 1/3 du domaine. Les éléments représentés dans tous les graphiques de ce rapport sont les suivants :

- Courbes grises : analyses historiques
- Courbes noires : observations
- Courbes en couleurs : projections (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)
- Traits en gras : 1 chance sur 2 (moyennes)
- Enveloppes : 1 chance sur 5 (meilleures et pires saisons)
- Lignes horizontales en pointillé : Q20 de la période de référence 1986- 2015

2.1.3 Taux de retour des saisons défavorables

Plus que l'évolution de l'indice de fiabilité en tant que telle, la récurrence des saisons difficiles peut avoir un impact sur la possibilité de maintenir l'exploitation du domaine skiable. Le taux de retour des saisons défavorables est donc un indicateur clé pour évaluer les effets du changement climatique dans les stations de ski : il représente la fréquence à laquelle les hivers faiblement enneigés (pires conditions susceptibles de se reproduire 1 année sur 5 durant la période de référence 1986-2015) vont se reproduire dans le futur.

Les graphiques représentent la probabilité de retour d'une saison avec un indice de fiabilité de l'enneigement en-dessous de celui défini, sur la période passée, par le Q20. Par exemple, si la fréquence à une certaine date est de 50%, cela signifie qu'à cette date on a 1 probabilité sur 2 de rencontrer les mêmes conditions défavorables d'enneigement qui, dans le passé, se présentaient 1 année sur 5. Par définition, donc, l'indice de fiabilité décroît quand la fréquence de retour des saisons défavorables augmente.

2.1.4 Fenêtres de froid

Le potentiel de froid pour la production de neige de culture est calculé à partir des températures humides pour l'altitude la plus basse du domaine skiable. Les graphiques montrent l'évolution de ce potentiel en fonction de la période de la saison (période "avant saison", du 01/11 au 20/12, et période de "confortement", du 21/12 au 31/01) et en fonction de l'intervalle de température considéré (entre -1°C et -4°C, entre -4°C et -6°C et <-6°C). Pour rappel, la courbe Q20 (la plus basse de chaque enveloppe) donne le potentiel de froid des 3 saisons les plus chaudes sur 15 centrées sur l'année considérée : si on dimensionnait une l'installation de neige de culture sur le potentiel de froid du Q20, on fiabiliserait 4 saisons sur 5.

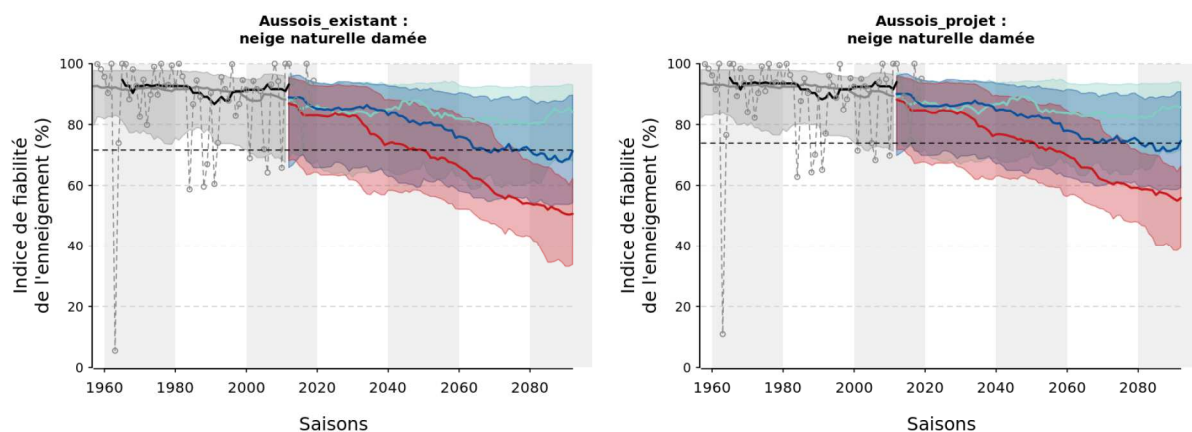


Figure 7 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement en neige naturelle damée (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

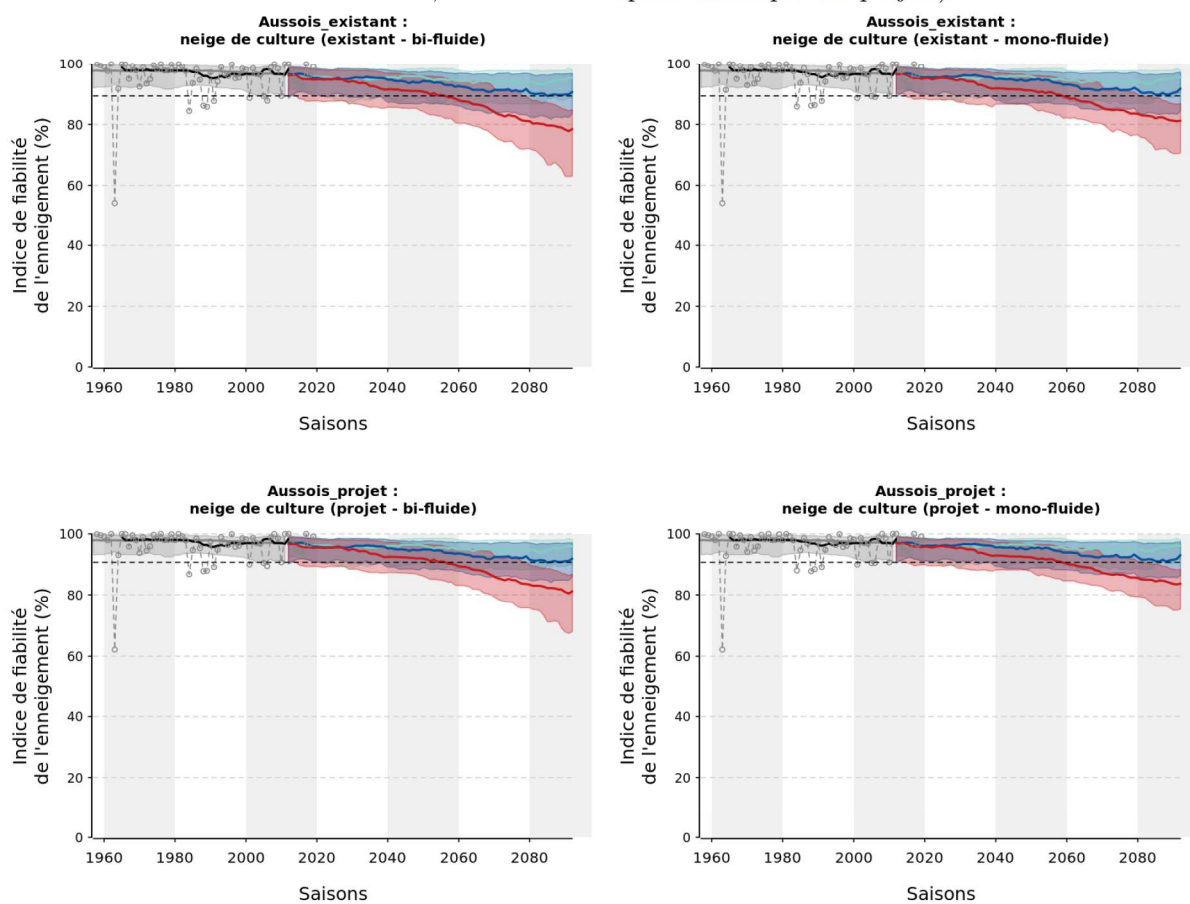


Figure 8 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement avec des équipements de type "perches" (à gauche) et "ventilateurs" (à droite). Les graphiques du haut correspondent aux installations actuelles, ceux du bas aux installations prévues dans les prochaines années.

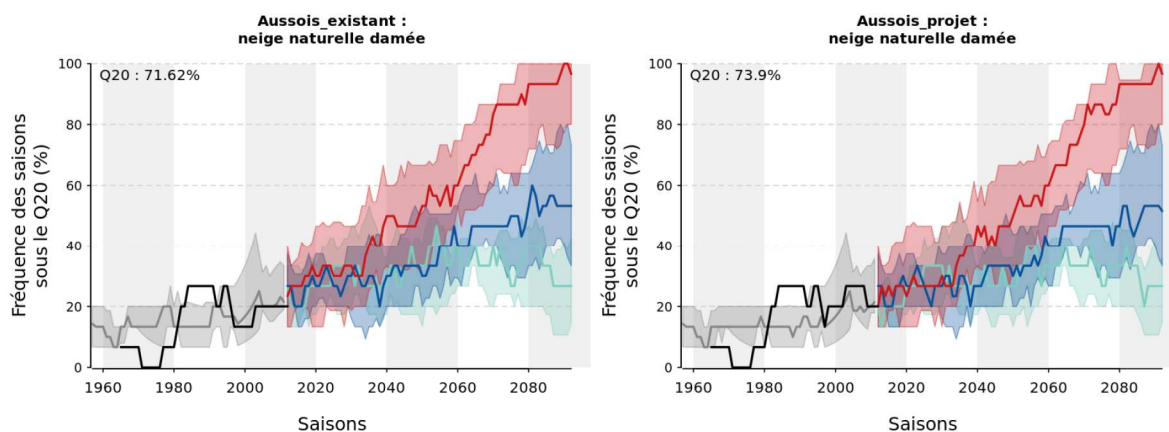


Figure 9 – Évolution du taux de retour des saisons défavorables en neige naturelle damée (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

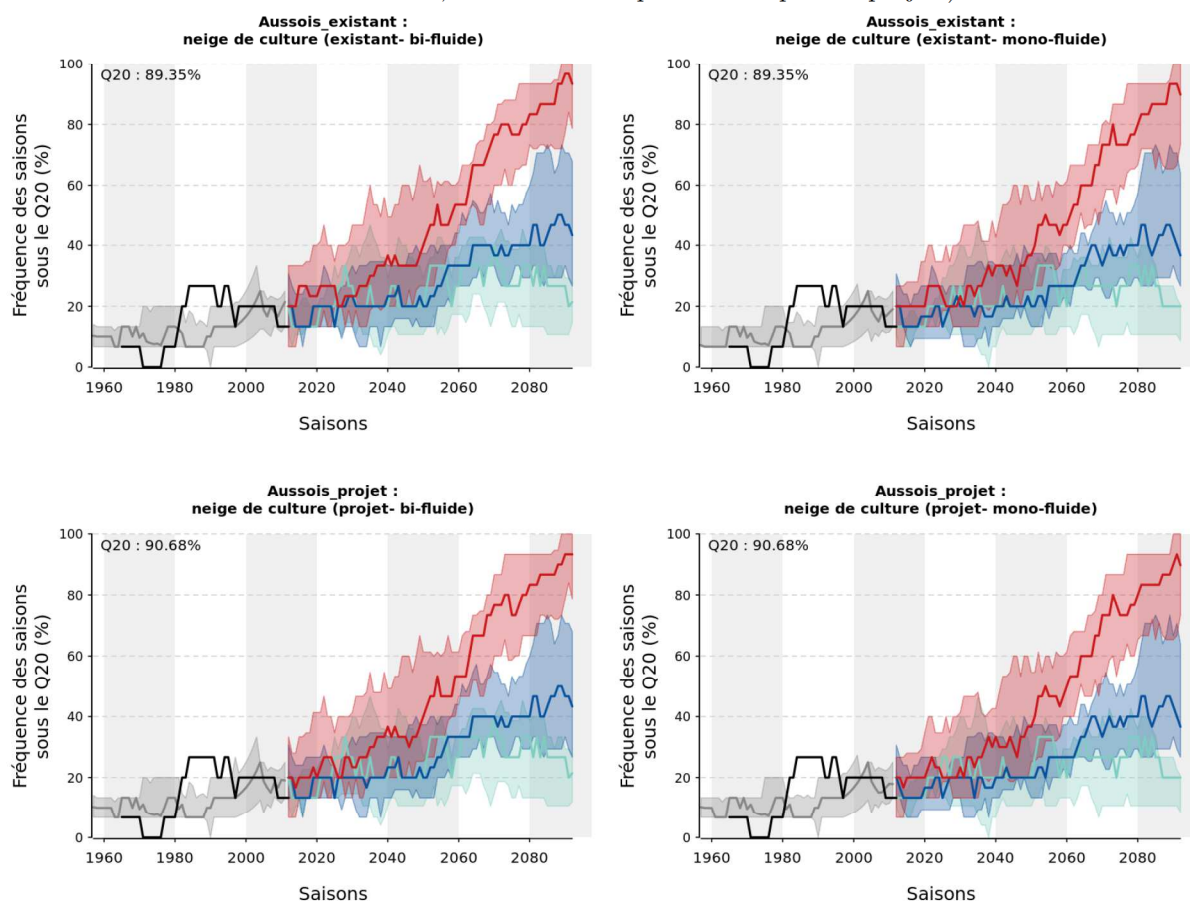


Figure 10 – Évolution du taux de retour des saisons défavorables avec des équipements de type "perches" (à gauche) et "ventilateurs" (à droite). Les graphiques du haut correspondent aux installations actuelles, ceux du bas aux installations prévues dans les prochaines années.

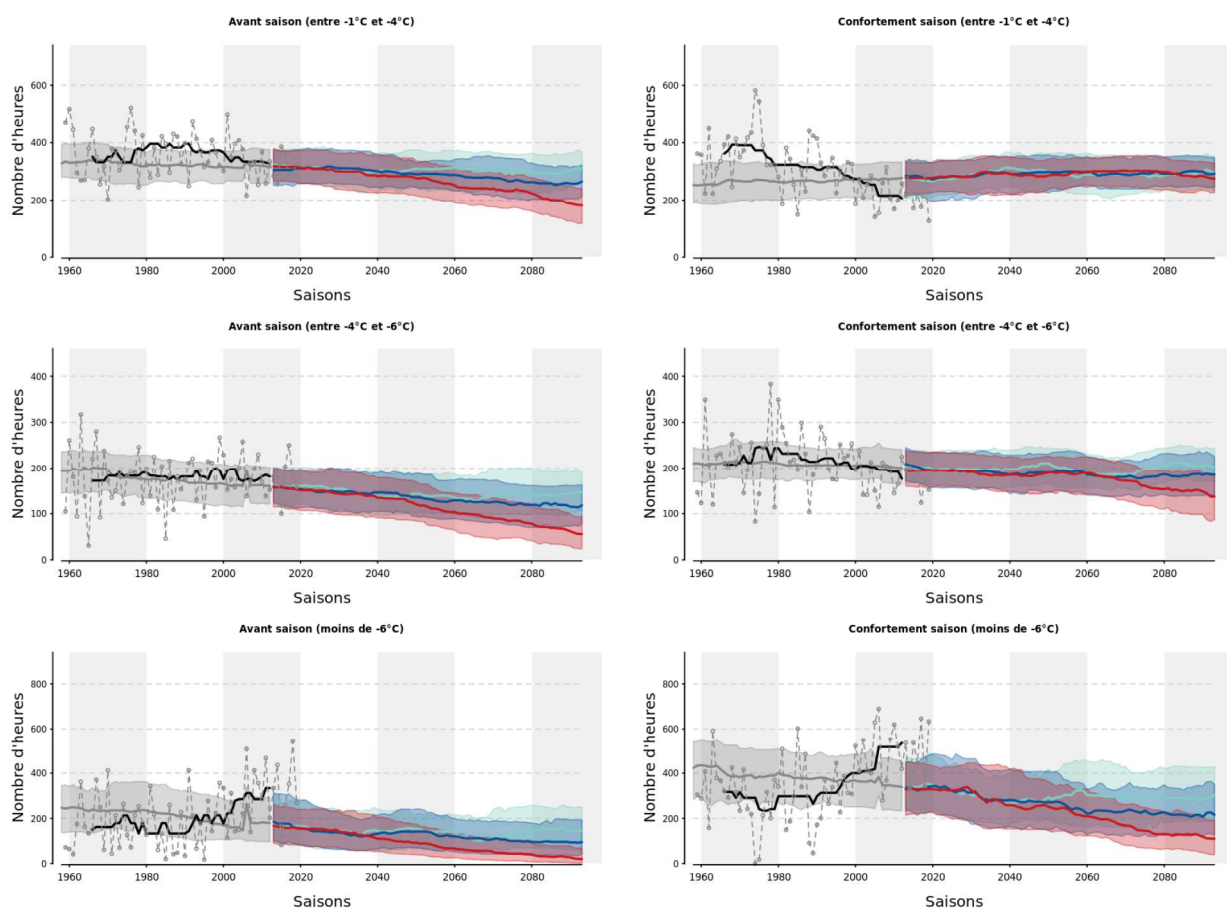


Figure 11 – Évolution du potentiel de froid à l'altitude la plus basse du domaine skiable, en fonction de la période de la saison (période "avant saison", du 01/11 au 20/12, et période de "confortement", du 21/12 au 31/01) et en fonction de l'intervalle de température considéré (entre -1°C et -4°C, entre -4°C et -6°C et <-6°C).

2.1.5 Consommation en eau pour la production de neige de culture

Les volumes de consommation en eau simulés expriment un besoin pour la production de neige en fonction des pratiques actuelles et en fonction de l'évolution des conditions de production. Les simulations ne présument pas de la disponibilité de la ressource : l'eau n'est pas une contrainte et seul le climat a un impact sur l'évolution de la production. Indirectement, l'évolution de la consommation en eau traduit donc également la capacité de production. En effet, l'évolution du climat influe à la fois sur l'accroissement du besoin et sur la dégradation des facteurs de production qui dépendent également du climat (température humide, vent). Ainsi, en fin de siècle, une diminution de la consommation en eau traduit généralement une évolution vers des conditions de production défavorables plutôt qu'une diminution du besoin.

Significations d'un palier :

- hyp 1 : le potentiel froid est constant et le besoin en neige de culture est supérieur ou égal au volume permis par la capacité de production de l'installation,
- hyp 2 : le besoin en neige de culture est constant et le potentiel froid est suffisant pour produire la sous-couche et maintenir les 60 cm.

Signification d'une portion de courbe croissante :

- le besoin en neige de culture augmente et le potentiel froid est suffisant pour augmenter la production.

Signification d'une portion de courbe décroissante :

- hyp 1 : le besoin en neige de culture décroît,
- hyp 2 : le besoin est stable ou croissant mais le potentiel froid diminue.

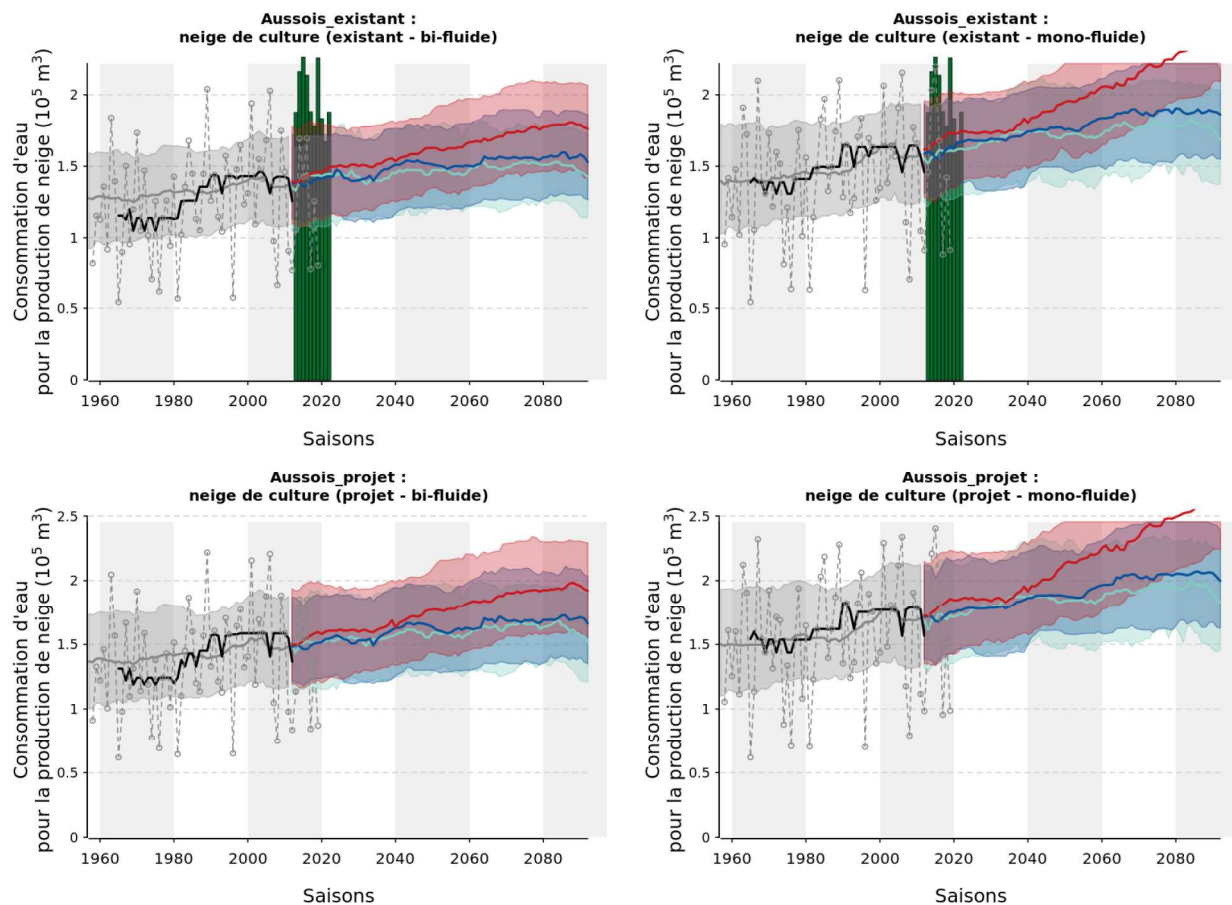


Figure 12 – Évolution de la consommation en eau pour la production de neige de culture avec des équipements de type "perches" (à gauche) et "ventilateurs" (à droite). Les graphiques du haut correspondent aux installations actuelles, ceux du bas aux installations prévues dans les prochaines années.

2.1.6 Durée d'enneigement

L'hétérogénéité spatiale des conditions d'enneigement est représentée à l'aide de matrices et de cartes 2D, qui montrent le nombre de jours durant lesquels le niveau d'enneigement dépasse un seuil défini comme la quantité de neige suffisante pour permettre la pratique du ski. Ce seuil est fixé à une quantité de neige équivalente à 20 cm de neige damée, quelle que soit son origine (précipitations naturelles ou production).

Les matrices permettent de comparer le nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, pour trois altitudes ciblées (bas, milieu et haut du domaine) et en fonction de la période future, du scénario climatique et des équipements installés. Les cartes 2D correspondent quand à elles aux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 et à des installations existantes et futures de type "perches". Elles permettent de :

- comparer des dates différentes (2020, 2035 et 2050),
- comparer des conditions d'enneigement correspondant à des saisons moyennes (Q50) et à des saisons défavorables (Q20),
- analyser la façon dont la station va faire face aux effets du changement climatique, si elle garde ses équipements actuels et avec la prise en compte des projets d'aménagement futurs.

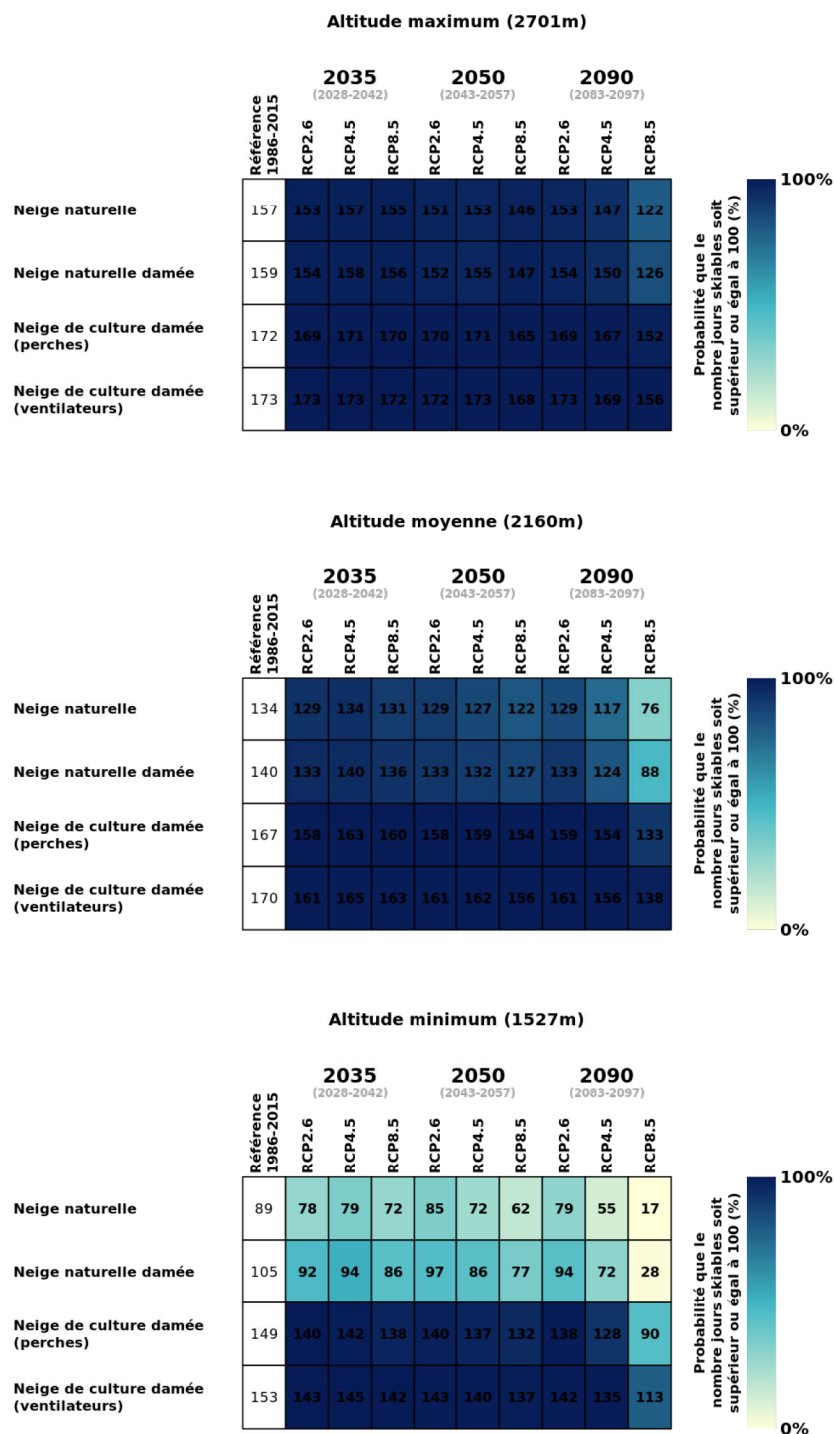


Figure 13 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible sur le domaine considéré, pour l'altitude minimum, moyenne et maximum (du bas vers le haut).

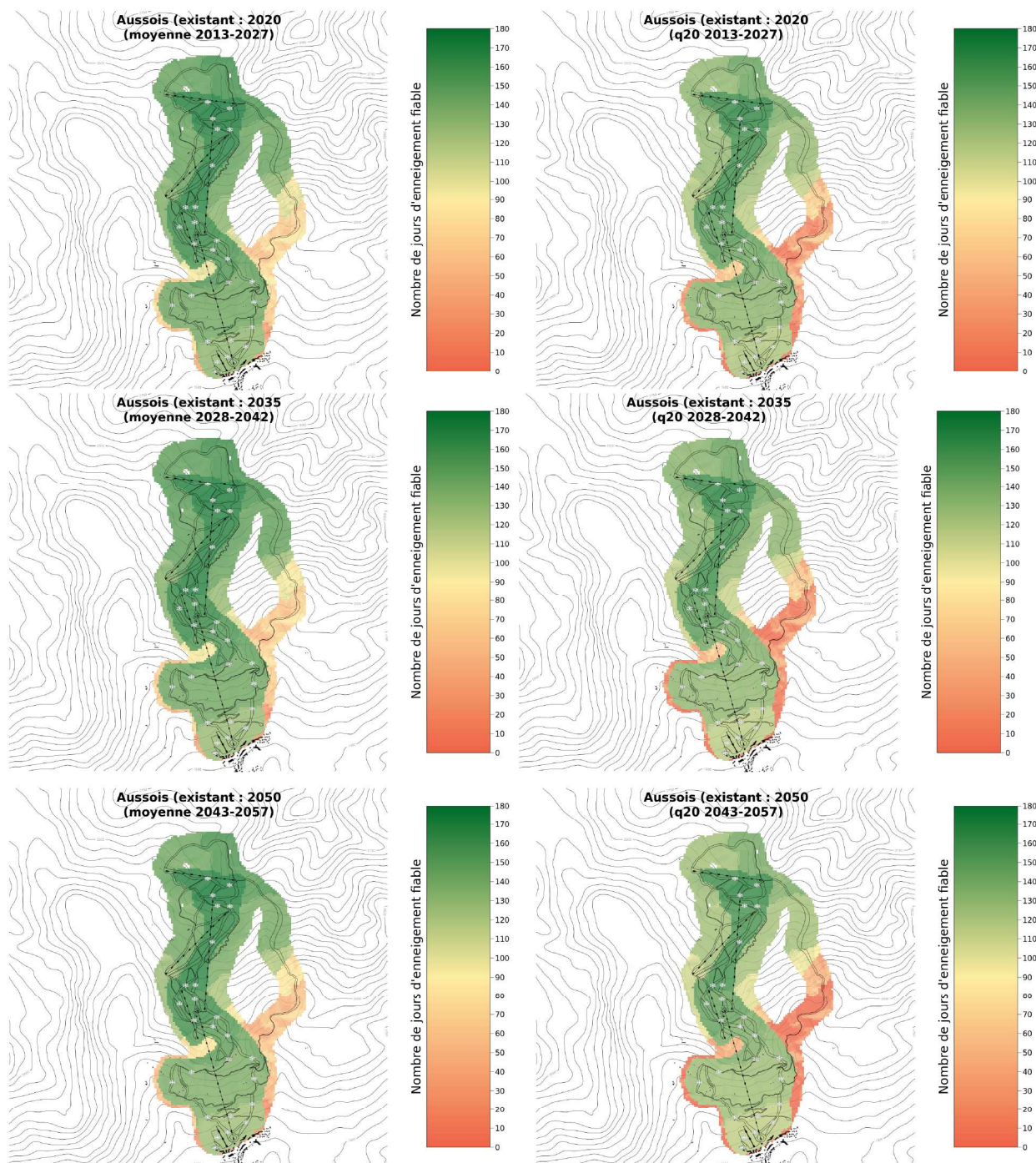


Figure 14 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP4.5 et les équipements actuels et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons défavorables (Q20).

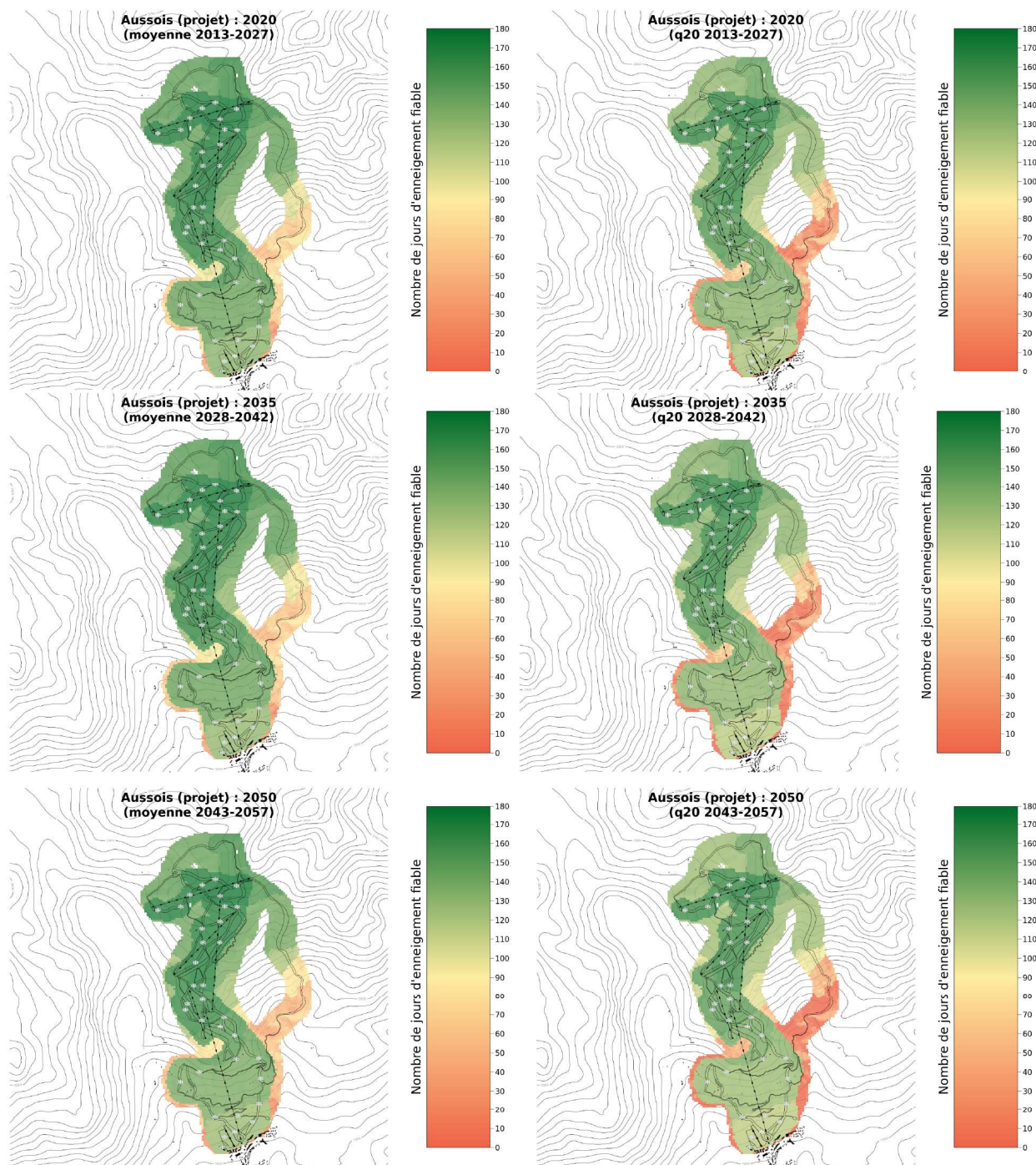


Figure 15 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP4.5 et les projets d'aménagement futurs et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons défavorables (Q20).

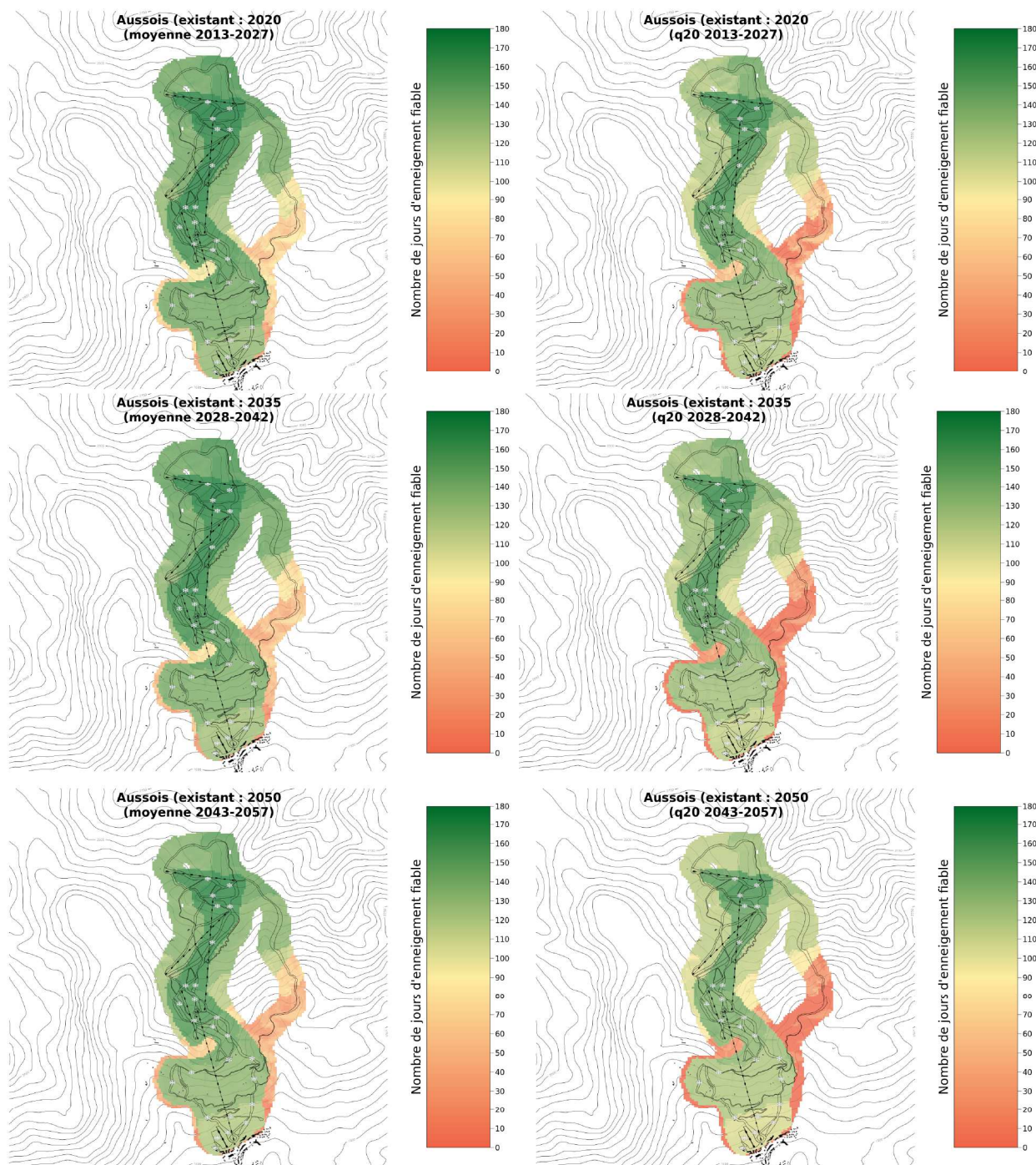


Figure 16 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP8.5 et les équipements actuels et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons défavorables (Q20).

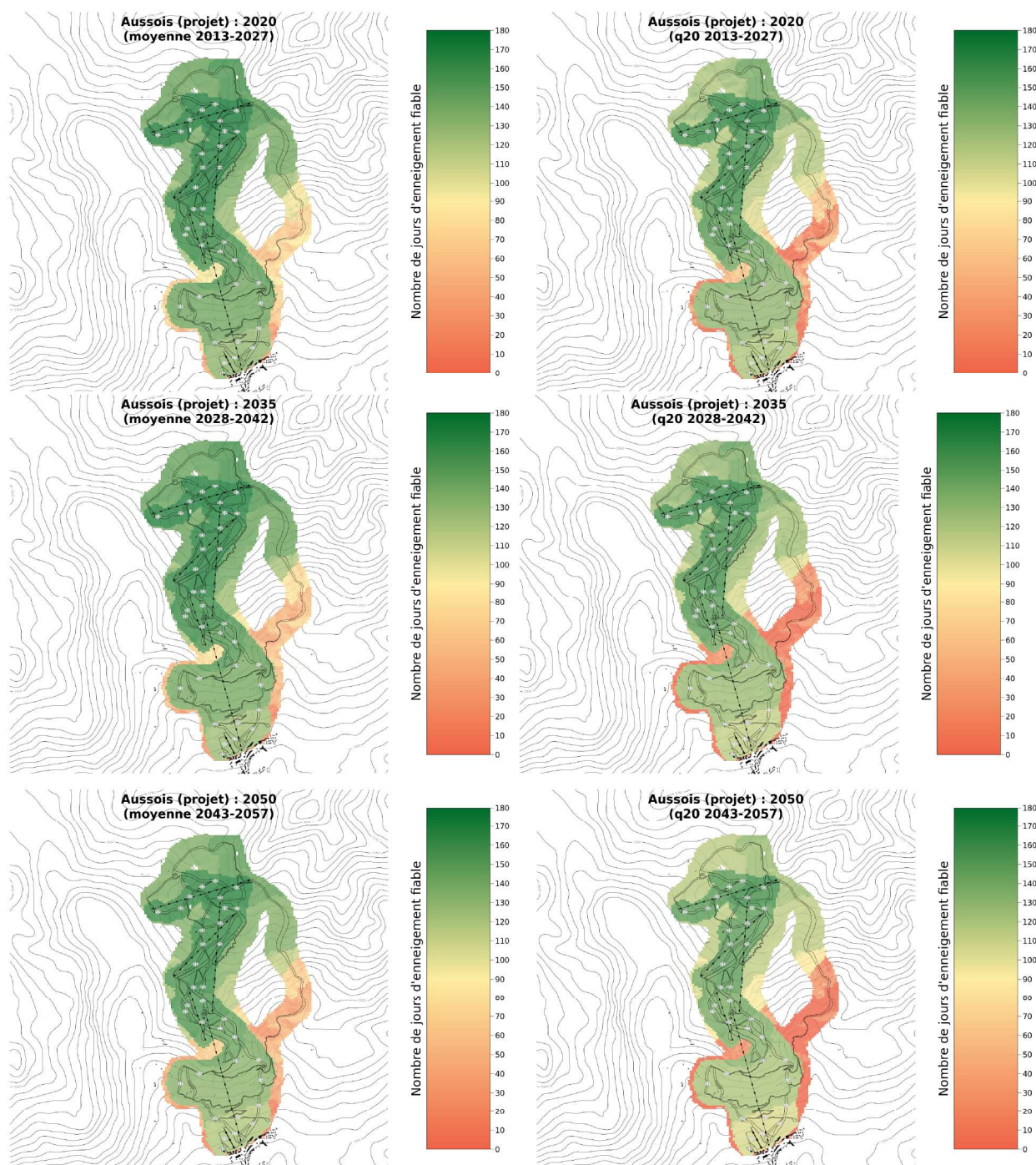


Figure 17 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP8.5 et les projets d'aménagement futurs et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons défavorables (Q20).

2.2 AUSSOIS-NORDIQUE

2.2.1 Caractéristiques du domaine : RM, pistes, neige de culture

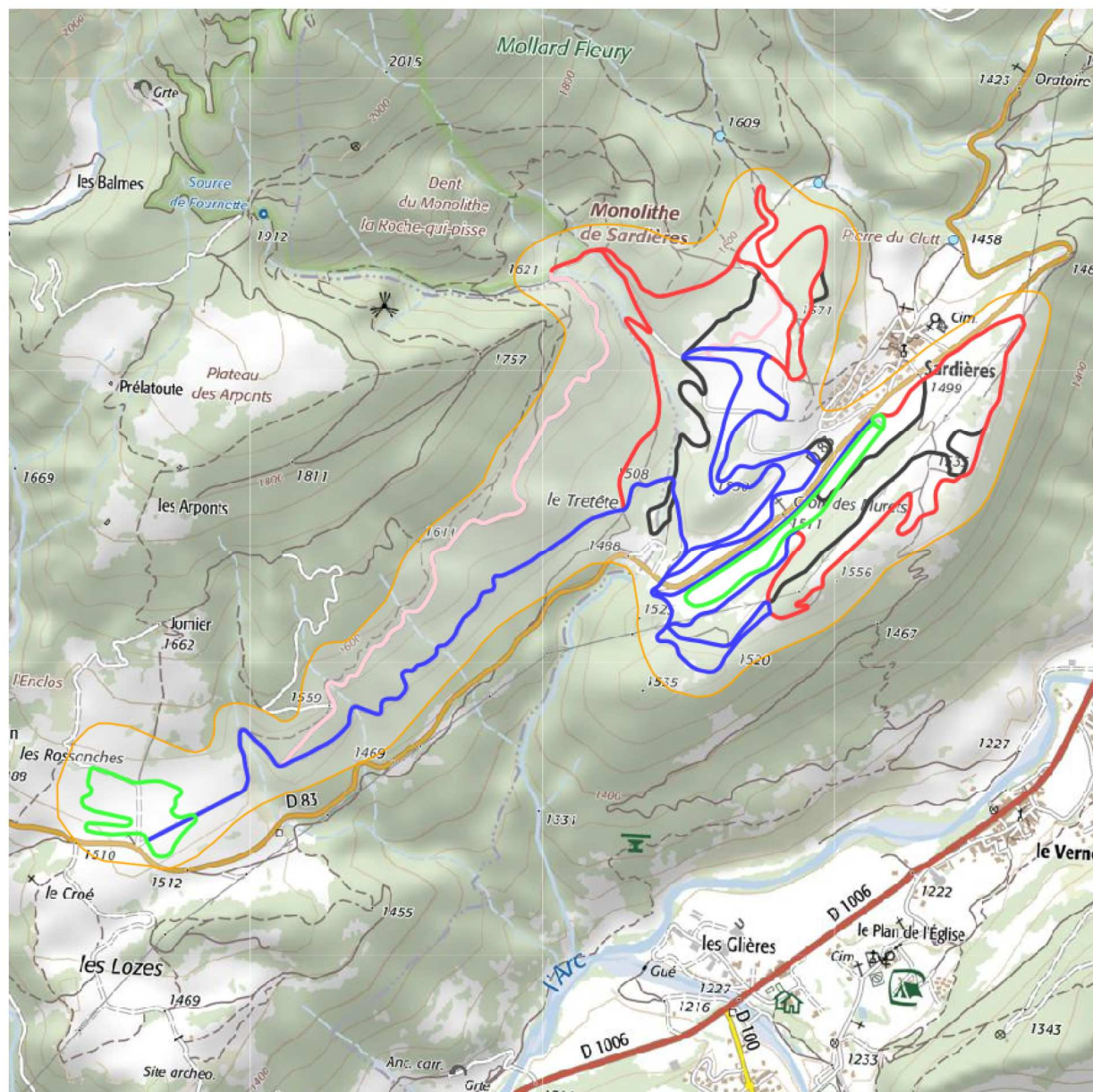


Figure 18 – Carte du domaine, avec les circuits du ski nordique (les couleurs correspondent aux niveaux de difficulté).

2.2.2 Indice de fiabilité de l'enneigement

L'indice de fiabilité de l'enneigement est calculé chaque année pour l'ensemble du domaine skiable. Il traduit les conditions d'exploitation, en prenant en compte les caractéristiques topographiques des pistes et la répartition des remontées mécaniques en fonction de l'altitude. Cet indicateur peut être interprété comme la part du domaine skiable exploitable (entre 0% et 100%) et dépend donc non seulement du scénario d'émission de gaz à effet de serre, mais aussi des équipements de la station et des techniques de gestion de la neige (damage, production de neige de culture).

Les graphiques représentent l'évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement (pourcentage du domaine skiable qui peut être ouvert aux clients pendant toute la saison) sur une période de 15 années centrée sur l'année considérée (soit 2013-2027 pour l'année 2020). Le Q20 de l'indice de fiabilité de l'enneigement est calculé sur la période de référence passée (1986-2015) et correspond aux conditions d'enneigement qui permettent de séparer les 20 pires saisons sur un échantillon de 100. Par exemple, un Q20 de 33% signifie que, 1 saison sur 5, on a pu ouvrir moins de 1/3 du domaine. Les éléments représentés dans tous les graphiques de ce rapport sont les suivants :

- Courbes grises : analyses historiques
- Courbes noires : observations
- Courbes en couleurs : projections (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)
- Traits en gras : 1 chance sur 2 (moyennes)
- Enveloppes : 1 chance sur 5 (meilleures et pires saisons)
- Lignes horizontales en pointillé : Q20 de la période de référence 1986- 2015

2.2.3 Taux de retour des saisons défavorables

Plus que l'évolution de l'indice de fiabilité en tant que telle, la récurrence des saisons difficiles peut avoir un impact sur la possibilité de maintenir l'exploitation du domaine skiable. Le taux de retour des saisons défavorables est donc un indicateur clé pour évaluer les effets du changement climatique dans les stations de ski : il représente la fréquence à laquelle les hivers faiblement enneigés (pires conditions susceptibles de se reproduire 1 année sur 5 durant la période de référence 1986-2015) vont se reproduire dans le futur.

Les graphiques représentent la probabilité de retour d'une saison avec un indice de fiabilité de l'enneigement en-dessous de celui défini, sur la période passée, par le Q20. Par exemple, si la fréquence à une certaine date est de 50%, cela signifie qu'à cette date on a 1 probabilité sur 2 de rencontrer les mêmes conditions défavorables d'enneigement qui, dans le passé, se présentaient 1 année sur 5. Par définition, donc, l'indice de fiabilité décroît quand la fréquence de retour des saisons défavorables augmente.

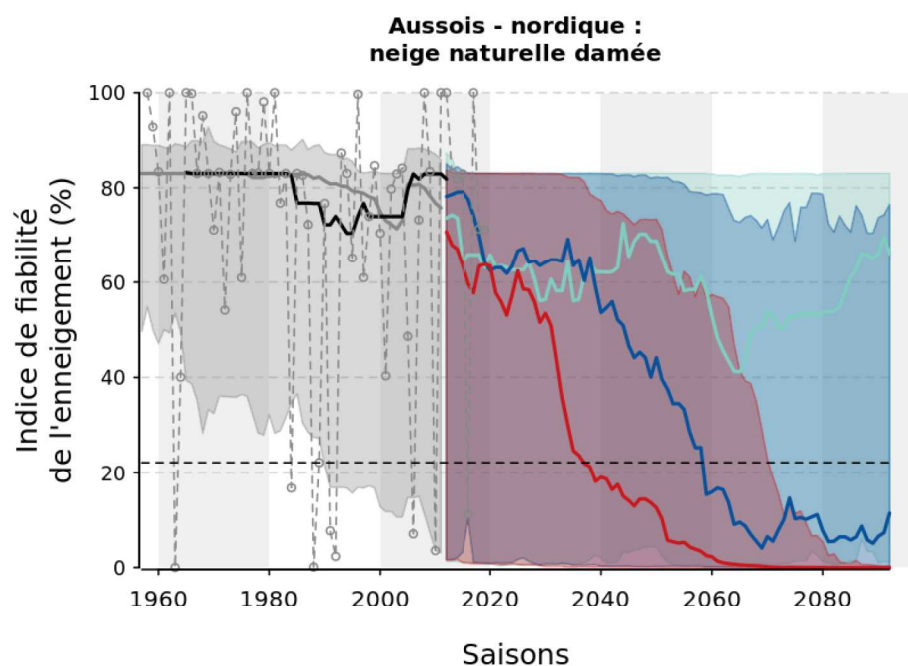


Figure 19 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement en neige naturelle damée.

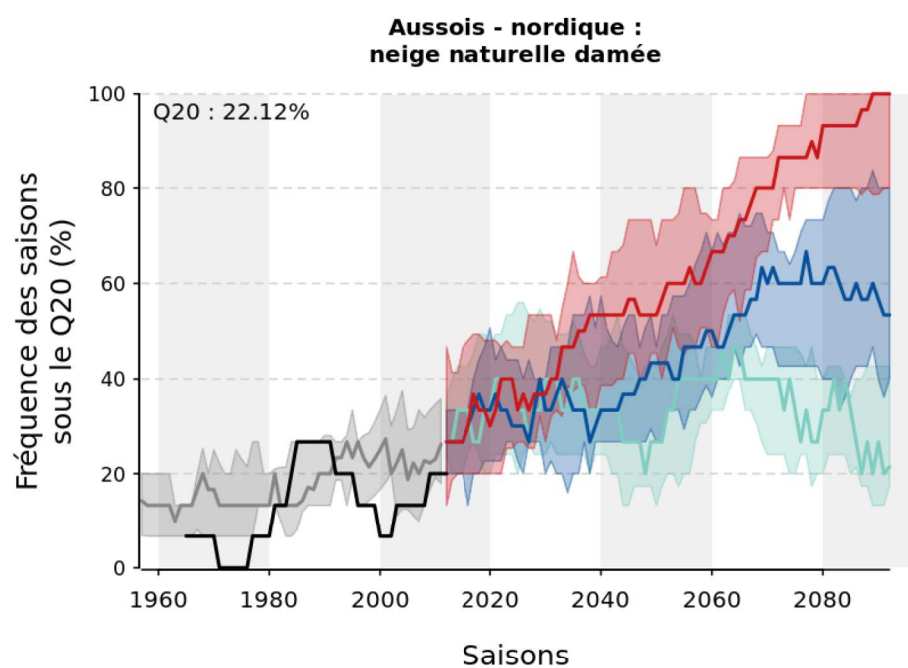


Figure 20 – Évolution du taux de retour des saisons défavorables en neige naturelle damée.

2.2.4 Fenêtres de froid

Le potentiel de froid pour la production de neige de culture est calculé à partir des températures humides pour l'altitude la plus basse du domaine skiable. Les graphiques montrent l'évolution de ce potentiel en fonction de la période de la saison (période "avant saison", du 01/11 au 20/12, et période de "confortement", du 21/12 au 31/01) et en fonction de l'intervalle de température considéré (entre -1°C et -4°C , entre -4°C et -6°C et $<-6^{\circ}\text{C}$). Pour rappel, la courbe Q20 (la plus basse de chaque enveloppe) donne le potentiel de froid des 3 saisons les plus chaudes sur 15 centrées sur l'année considérée : si on dimensionnait une l'installation de neige de culture sur le potentiel de froid du Q20, on fiabiliserait 4 saisons sur 5.

2.2.5 Durée d'enneigement

L'hétérogénéité spatiale des conditions d'enneigement est représentée à l'aide de matrices et de cartes 2D, qui montrent le nombre de jours durant lesquels le niveau d'enneigement dépasse un seuil défini comme la quantité de neige suffisante pour permettre la pratique du ski. Ce seuil est fixé à une quantité de neige équivalente à 20 cm de neige damée, quelle que soit son origine (précipitations naturelles ou production).

Les matrices permettent de comparer le nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, pour trois altitudes ciblées (bas, milieu et haut du domaine) et en fonction de la période future, du scénario climatique et des équipements installés. Les cartes 2D correspondent quand à elles aux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour la neige naturelle damée. Elles permettent de :

- comparer des dates différentes (2020, 2035 et 2050),
- comparer des conditions d'enneigement correspondant à des saisons moyennes (Q50) et à des saisons défavorables (Q20),
- analyser la façon dont la station va faire face aux effets du changement climatique, si elle garde ses équipements actuels.

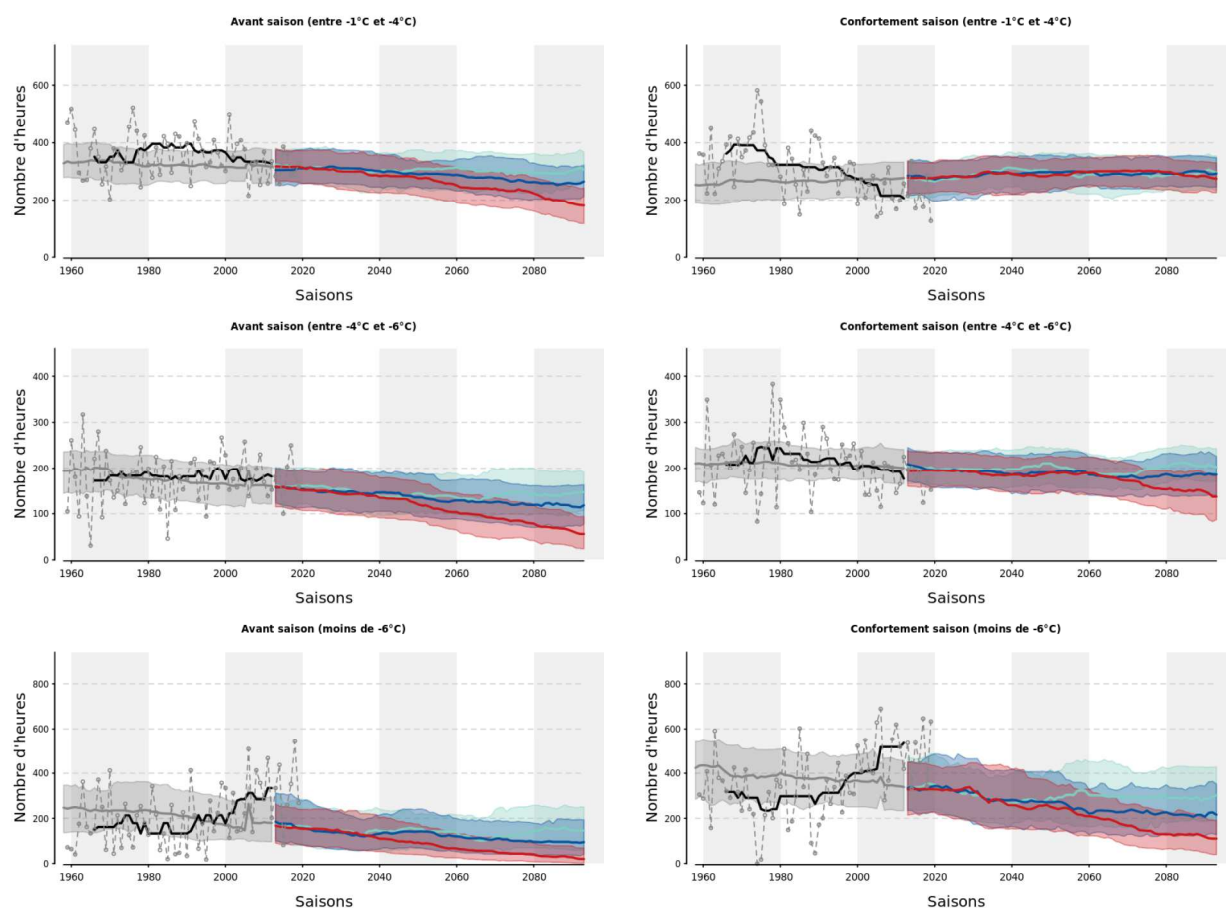


Figure 21 – Évolution du potentiel de froid à l'altitude la plus basse du domaine skiable, en fonction de la période de la saison (période "avant saison", du 01/11 au 20/12, et période de "confortement", du 21/12 au 31/01) et en fonction de l'intervalle de température considéré (entre -1°C et -4°C, entre -4°C et -6°C et <-6°C).

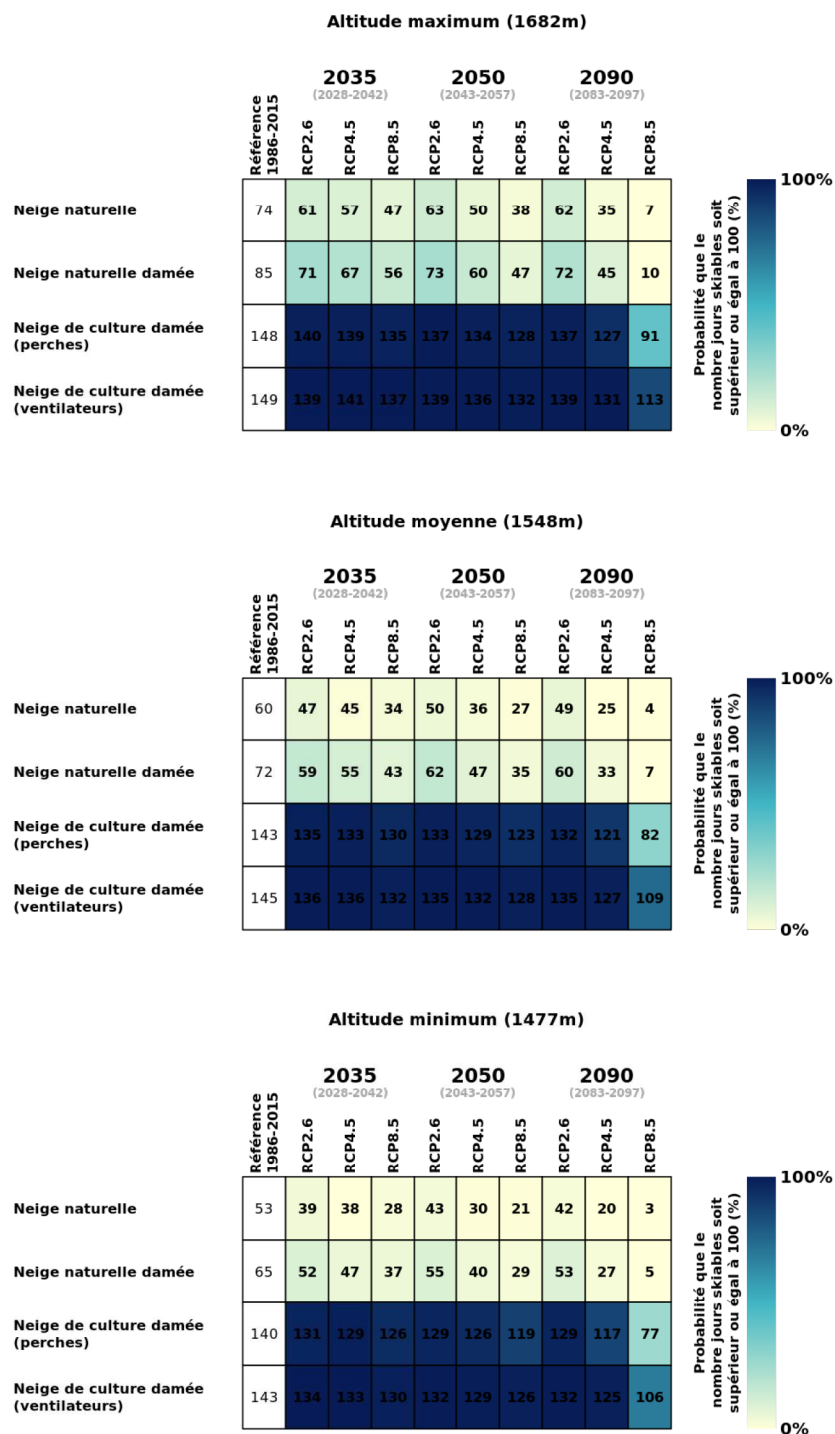


Figure 22 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible sur le domaine considéré, pour l'altitude minimum, moyenne et maximum (du bas vers le haut).

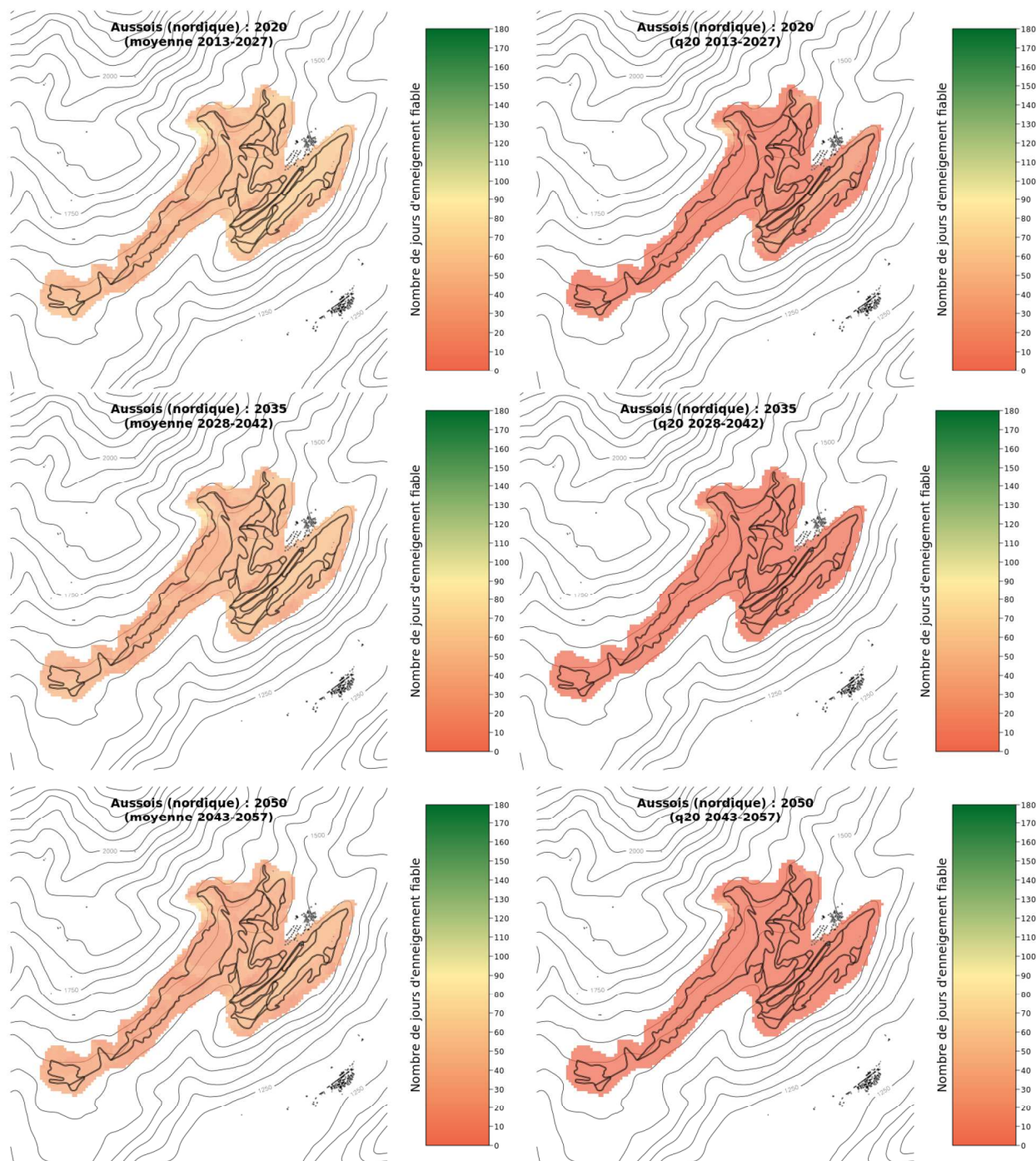


Figure 23 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP4.5 et les équipements actuels et en fonction de l’horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d’enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d’enneigement des saisons défavorables (Q20).

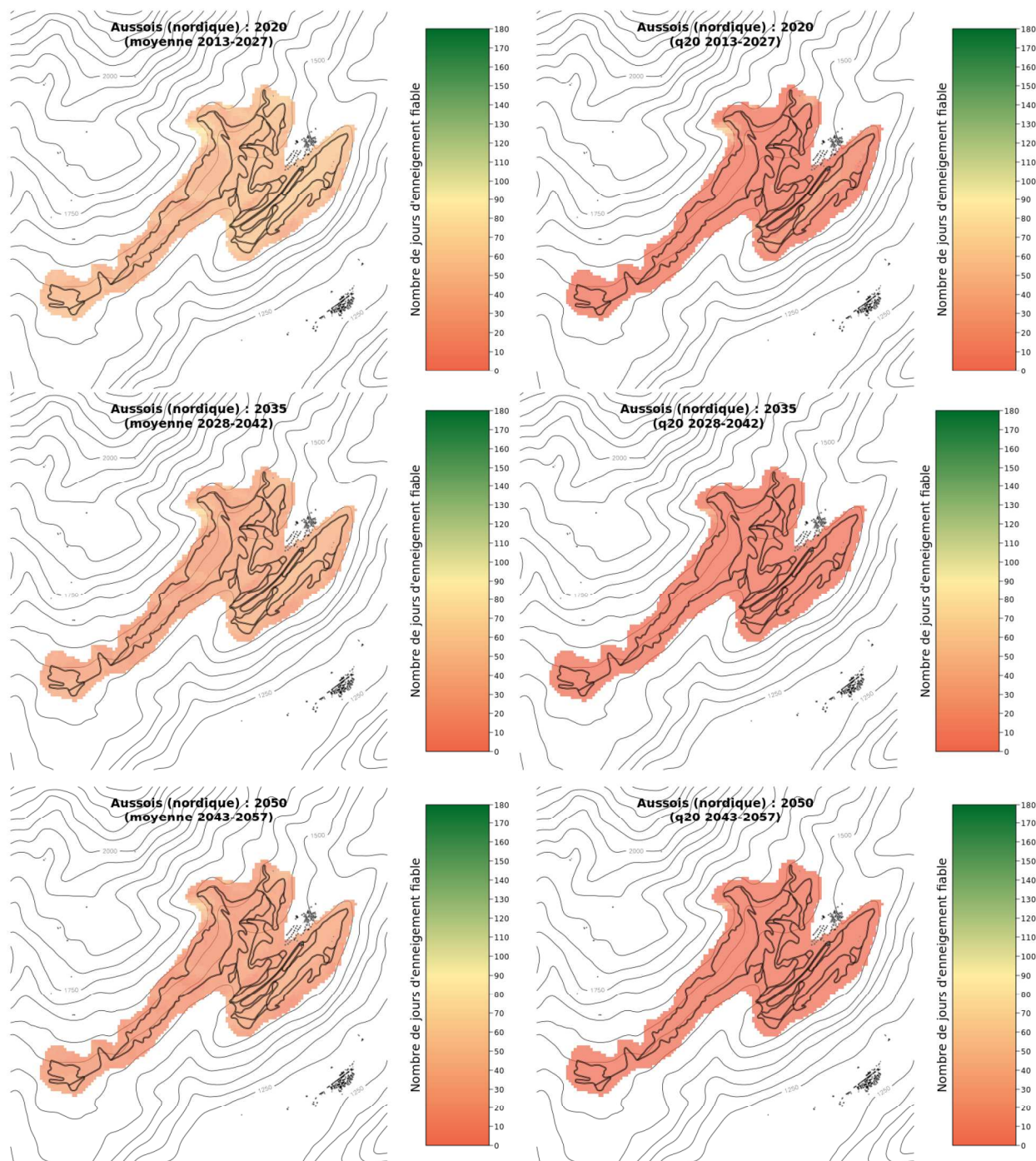


Figure 24 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP8.5 et les équipements actuels et en fonction de l’horizon temporel considéré (du haut vers le bas : 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d’enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d’enneigement des saisons défavorables (Q20).

3 ANALYSES

3.1 Prise en compte des projets d'aménagement

Les projets d'aménagement pris en compte dans cette étude concernent le secteur d'altitude de la station, avec l'extension du réseau de production de neige sur quelques pistes et surtout le remplacement du télésiège de la Fournache et la création de deux nouvelles pistes, une rouge et une bleue, dont la première pourrait aussi être équipée en neige de culture.

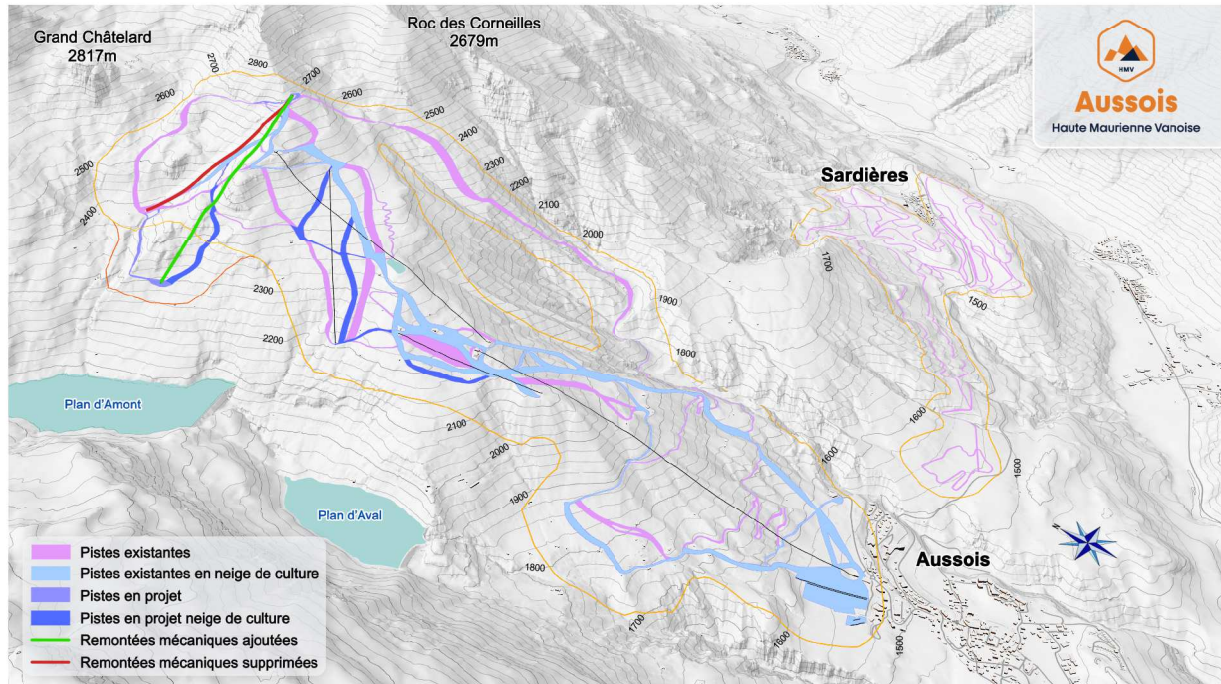


Figure 25 – Le domaine skiable et ses projets d'aménagement, tels qu'ils ont été définis dans cette étude.

3.2 Principaux enseignements de l'étude ClimSnow

Globalement, les projections climatiques dans les zones de montagne en France indiquent une augmentation significative des températures moyennes dans les prochaines décennies. Les précipitations hivernales totales (pluie + neige), quant-à-elles, ne montrent pas de tendances significatives dans les prochaines décennies et resteront fortement variables d'une année à l'autre. Cette évolution du climat va engendrer une raréfaction progressive du manteau neigeux naturel (épaisseur et durée), du fait que les précipitations se produiront de plus en plus sous forme de pluie et de moins en moins sous forme de neige, et que la neige fond plus rapidement dans un climat plus chaud. La raréfaction de l'enneigement sera plus ou moins marquée en fonction des secteurs et de leur topographie (altitude, orientation, pente).

L'évolution de l'enneigement dans les domaines skiables est représentée par un indicateur de ClimSnow appelé « indice de fiabilité de l'enneigement ». Cet indice 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) pendant les périodes de forte activité. Par exemple, si cet indice est égal à 80% pour un hiver donné, cela signifie que 80% des pistes pourront être ouvertes aux clients en moyenne pendant les vacances d'hiver (les autres périodes de la saison ayant moins de « poids » dans le calcul de cet indicateur). Il peut se calculer soit en ne considérant que la neige naturelle damée, soit en tenant compte de la production de neige pour les secteurs concernés, et ce soit dans

les conditions climatiques passées ou pour les projections futures.

A Aussois, on constate que pendant la période historique (1986-2015) l'indice de fiabilité lors des saisons faiblement enneigées aurait été de 72% en prenant en compte la neige naturelle damée, 89% avec les équipements actuels de production de neige et 91% avec les projets d'extension du réseau de production. Lorsque l'on se focalise sur les projections dans les prochaines décennies, les résultats principaux de ClimSnow sont les suivants :

- En prenant en compte la neige de culture, les indices de fiabilité de l'enneigement en moyenne multi-annuelle montrent une décroissance graduelle jusqu'en 2030 environ. A partir de cette date, on constate une accentuation des différences entre les scénarios climatiques, avec en particulier une baisse plus significative en scénario RCP8.5.
- En parallèle de la décroissance de cet indice pendant les prochaines décennies, le taux de retour des saisons défavorables subira une forte croissance. En particulier, les modèles indiquent que les conditions d'enneigement correspondant à des saisons défavorables passeront d'une fréquence de 20% (période historique 1986-2015) à environ 40% en 2050 (neige naturelle damée, scénario RCP8.5). C'est à dire que les « mauvaises » saisons passeront de 2 années sur 10 à 4 années sur 10. Ce résultat est particulièrement important, puisque la récurrence des saisons faiblement enneigées est un facteur critique pour l'exploitation des stations, sans doute d'avantage que l'évolution moyenne des conditions d'enneigement.
- A l'horizon 2050 et avec le scénario de forte émission (RCP8.5), l'indice de fiabilité lors des saisons faiblement enneigées sera égale à 86% avec la prise en compte des projets d'extension du réseau neige (84% en gardant le réseau existant).
- Selon la modélisation opérée avec une technologie mono-fluide, en mesure d'être plus performante à date avec la prise en compte des températures marginales, les différents scénarios indiquent une baisse de l'indice de fiabilité moins marquée, en particulier pendant la deuxième moitié du XXIème siècle.

Le tableau suivant montre les indices de fiabilité pour la station d'Aussois.

Aussois	Indice de fiabilité de l'enneigement, en % (RCP8.5 - Q20)		
	1986-2015	2028-2042	2043-2057
Neige naturelle damée	72	58	57
Avec neige de culture (perches)	89	86	84
Avec neige de culture (perches) et projets	91	88	86

Table 1 – Indices de fiabilité de l'enneigement pour les années défavorables, calculés pour le scénario RCP8.5 et pour différents horizons temporels.

3.3 Les durées d'enneigement

La durée d'enneigement est un indicateur qui représente le 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. ClimSnow montre d'un côté les durées d'enneigement qui correspondent aux saisons « moyennes » (quantile 50 ou Q50 des ensembles climatiques) et de l'autre côté celles qui correspondent aux saisons « mauvaises » (Q20), c'est à dire le 20% des hivers les plus défavorables en termes d'enneigement sur les pistes. La période analysée s'étend de novembre et avril, soit environ 180 jours au total.

Dans l'analyse de cet indicateur, il faut bien souligner le fait que les conditions d'enneigement vont rester très variables d'une année à l'autre. Les valeurs moyennes ne permettent pas de se rendre compte des difficultés

de gestion liées à l'enneigement, car elles peuvent masquer des conditions d'exploitation difficiles, compensées par quelques années particulièrement bien enneigées. Afin de mieux comprendre l'avenir climatique des stations et l'évolution de leurs conditions d'exploitation, il est donc nécessaire de prendre en compte cette variabilité. Dans ce but, l'étude des durées d'enneigement des années défavorables (Q20) est essentielle et permet de compléter la vue donnée par l'analyse de l'enneigement annuel moyen.

A Aussois, à l'horizon 2050 et en considérant le scénario RCP8.5, on peut dégager les constats suivants :

- Au point culminant du domaine (2701 mètres), les durées d'enneigement en neige naturelle damée seront de 147 jours lors des saisons moyennes. Pendant la période historique, cette valeur était égale à 159 jours. En prenant en compte la production de neige (systèmes de type perches installés sur l'ensemble des surfaces équipées), les durées d'enneigement en 2050 pourraient potentiellement atteindre 165 jours.
- A l'altitude moyenne du domaine (2160 mètres), les durées d'enneigement en neige naturelle damée seront de 127 jours lors des saisons moyennes. Pendant la période historique, cette valeur était égale à 140 jours. En prenant en compte la production de neige (systèmes de type perches installés sur l'ensemble des surfaces équipées), les durées d'enneigement en 2050 pourraient potentiellement atteindre 154 jours.
- A l'altitude minimum du domaine (1527 mètres), les durées d'enneigement en neige naturelle damée seront de 77 jours lors des saisons moyennes. Pendant la période historique, cette valeur était égale à 105 jours. En prenant en compte la production de neige (systèmes de type perches installés sur l'ensemble des surfaces équipées), les durées d'enneigement en 2050 pourraient potentiellement atteindre 132 jours.

Les cartes 3D présentées ci-après correspondent au scénario RCP8.5, avec des installations de type "perches". Ces cartes permettent de mieux appréhender la variabilité spatiale et temporelle des conditions d'enneigement dans tout le domaine skiable, avec la prise en compte des projets d'aménagement futurs et en se focalisant sur des saisons moyennes et des saisons défavorables. En particulier, il est possible de :

- comparer des dates différentes (2025, 2035 et 2050),
- comparer des conditions d'enneigement correspondant à des saisons moyennes (Q50) et à des saisons défavorables (Q20),
- analyser la façon dont la station va faire face aux effets du changement climatique, si elle garde ses équipements actuels et avec la prise en compte des projets d'aménagement futurs.

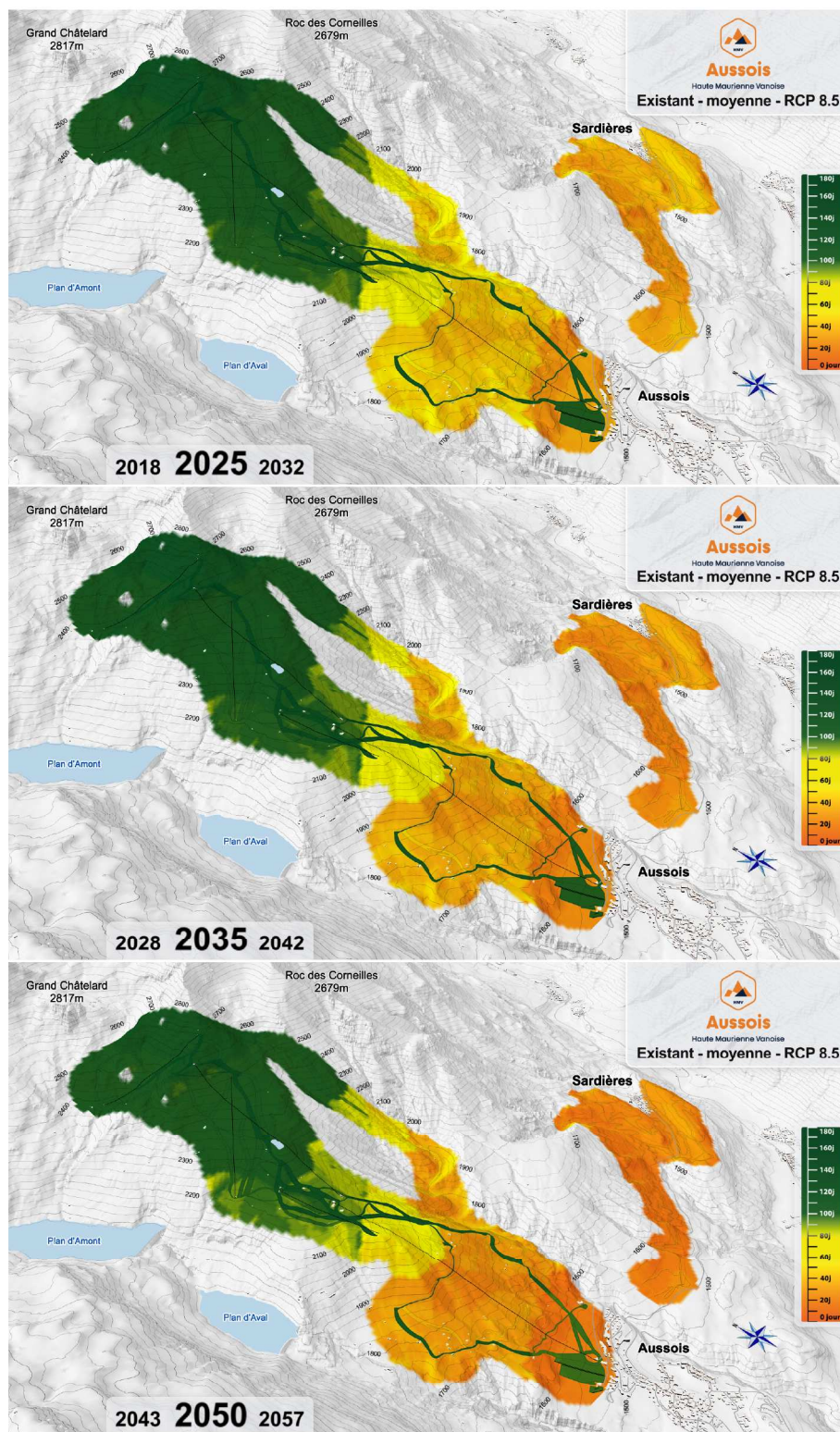


Figure 26 – Durées d'enneigement pour des saisons moyennes (état existant).

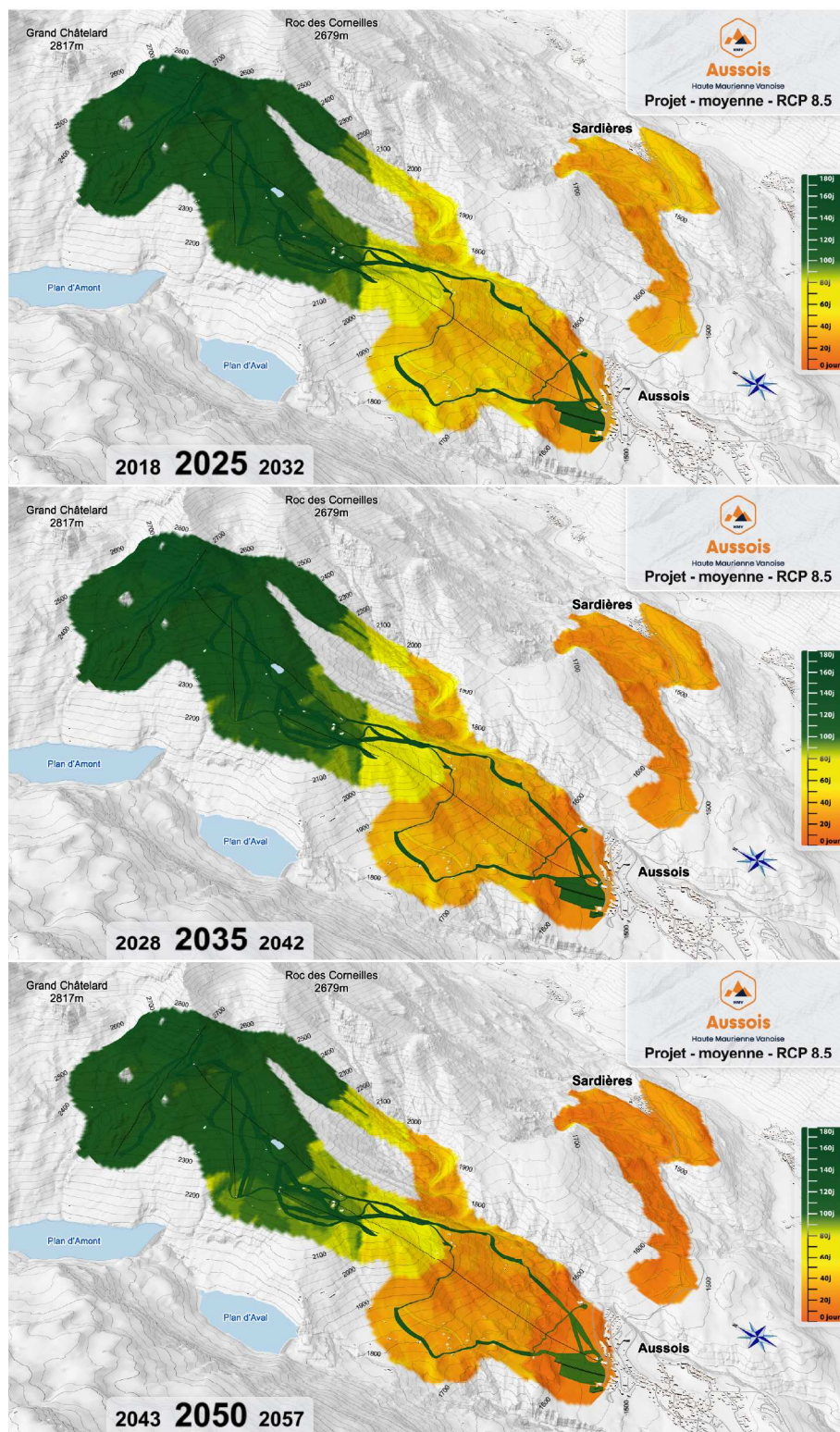


Figure 27 – Durées d'enneigement pour des saisons moyennes (avec projets).

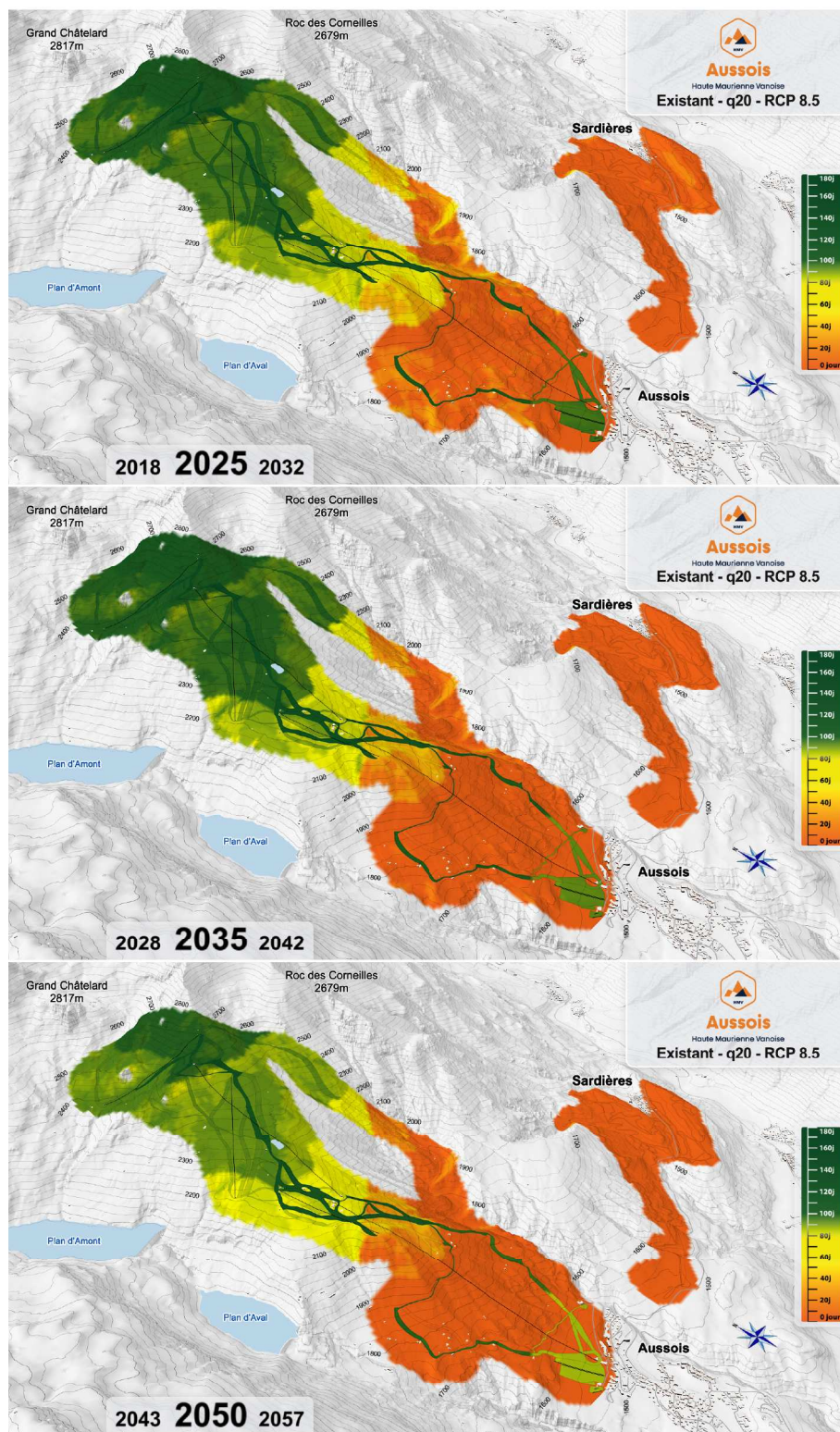


Figure 28 – Durées d'enneigement pour des saisons défavorables (état existant).

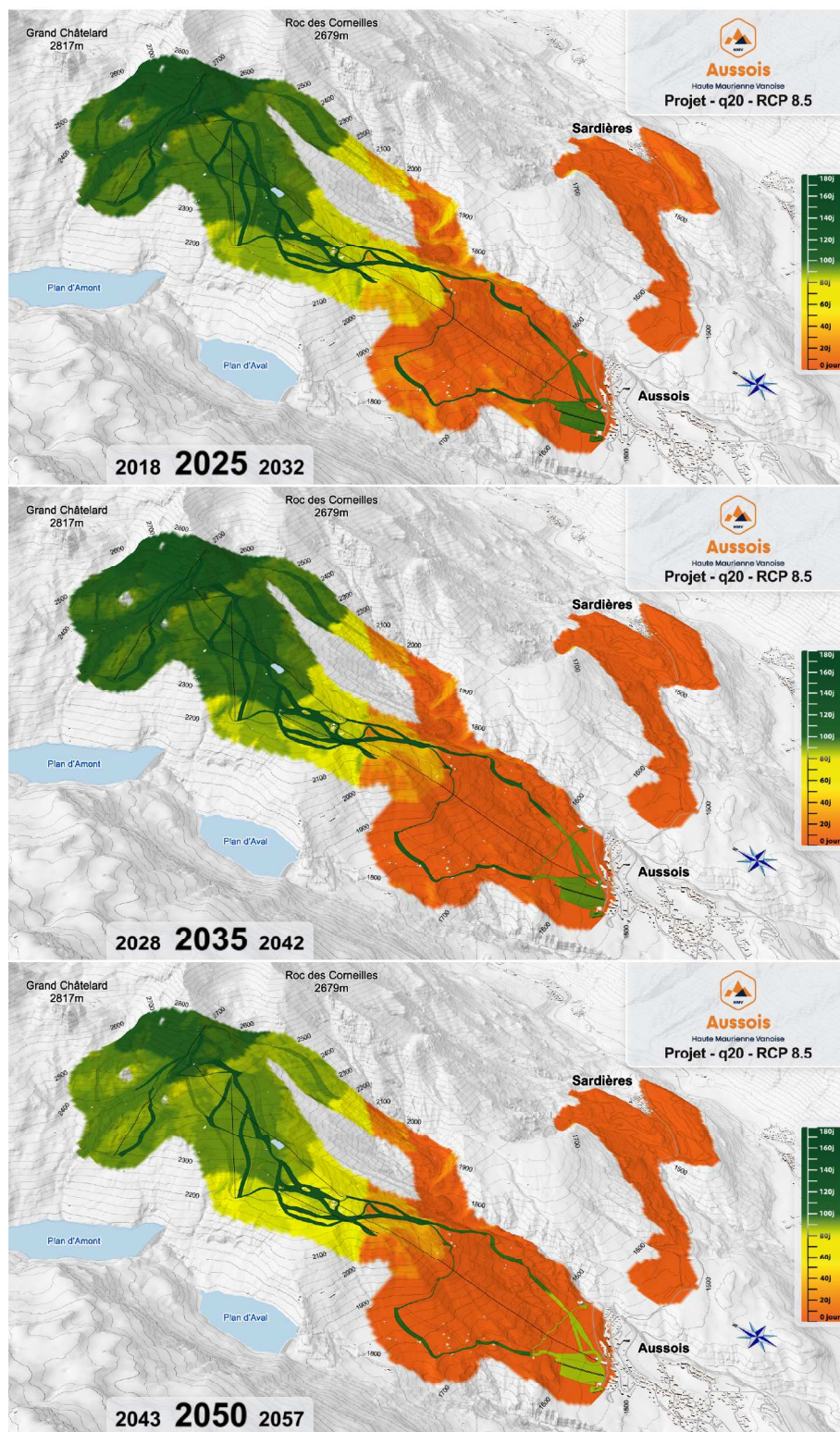


Figure 29 – Durées d'enneigement pour des saisons défavorables (avec projets).

3.4 La production de neige de culture

A Aussois, la production de neige atténue l’ampleur de la baisse de l’enneigement naturel sous l’effet du changement climatique. Cependant, les résultats montrent qu’en climat futur, sur la partie basse du domaine, la baisse progressive de l’enneigement naturel pourra être compensée seulement partiellement par le recours à la neige de culture, en raison des périodes de froid de plus en plus rares, surtout sur l’avant saison et pour tout intervalle de température considéré (entre -1°C et -4°C , entre -4°C et -6°C et $<-6^{\circ}\text{C}$).

En scénario RCP8.5 et en considérant la technologie bi-fluide, les courbes des quantités d’eau utilisées pour la production de neige montrent une augmentation graduelle dans les prochaines décennies. Pour le même scénario et la technologie mono-fluide, on observe une augmentation plus marquée à partir de 2035 environ. Pour rappel, dans un contexte de réduction de l’enneigement naturel, des courbes stables ou décroissantes signifient généralement que le potentiel de froid ne permet pas de répondre au besoin de production de neige ; et même quand le froid est suffisant pour permettre la production, les conditions climatiques peuvent engendrer une fonte précoce du manteau neigeux.

Il serait pertinent de compléter ces informations en menant une étude de l’évolution future de la disponibilité en eau. Ceci permettrait de comparer directement les quantités d’eau pour la production de neige simulées par ClimSnow avec celles réellement disponibles.

3.5 Analyse globale

Les zones les plus fragiles en termes d’enneigement sont celles situées à moins de 2000 m d’altitude environ. Sur ces points bas, en 2050, en RCP8.5 et lors des saisons défavorables, le ski pourra être assuré principalement grâce au recours à la neige de culture, sur des durées qui dépendront des types d’enneigeurs installés et des performances du réseau neige (qui devra être capable de profiter au maximum de fenêtres de froid de plus en plus courtes et de moins en moins intenses).

Sur la partie haute du domaine, à partir de 2000 m environ, la skiabilité restera globalement assez correcte, mais le recours à la neige de culture sera tout de même nécessaire afin de garantir au delà de 100 jours d’ouverture lors des saisons défavorables en 2050 (RCP8.5).

Les projets recensés dans cette étude, concernant une extension du réseau neige et la création de nouvelles pistes, se situent en altitude. En particulier, le nouveau télésiège de la Fournache et les nouvelles pistes desservies par cet appareil se trouvent entre environ 2300 et 2700 m. D’après les résultats des simulations climatiques, ce secteur restera viable en 2050, avec des durées d’exploitation supérieures à 3 mois même en considérant le scénario le plus pessimiste (RCP8.5) et des conditions d’enneigement défavorables (Q20). La production de neige de culture aura une valeur ajoutée sur les conditions de viabilité surtout lors des saisons défavorables, les saisons moyennes restant assez bien enneigées. Globalement, ces projets d’aménagement semblent donc viables du point de vue climatique.

3.6 Conclusion

Malgré la baisse attendue de l’enneigement naturel, ClimSnow permet d’identifier les secteurs pour lesquels l’enneigement peut demeurer adéquat pour la pratique du ski à Aussois. En résumant, les résultats montrent que, du fait du damage des pistes (augmentant la durée d’enneigement) et de l’apport de la neige de culture (qui reste globalement productible dans les prochaines décennies), le changement climatique aura un impact significatif mais maîtrisable à l’horizon 2050. Cependant, les saisons défavorables en termes d’enneigement se feront de plus en plus fréquentes (jusqu’à 4 hivers sur 10 en 2050) et leurs conditions d’exploitation plus difficiles, avec une dégradation de la fiabilité de l’enneigement (naturel + de culture) marquée surtout sur

les secteurs bas. Par conséquent, les prochaines décennies, tout en permettant globalement toujours la pratique du ski, devront aussi être mises à profit pour engager une transformation, au moins partielle, de l'offre touristique de la station.