



EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES CONDITIONS D'ENNEIGEMENT DE LA STATION DE PRALOGNAN



24 septembre 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	5
1.4	Représentation des domaines skiables	6
1.5	Indicateurs nivo-météorologiques	6
1.6	ClimSnow : note méthodologique	8
2	DOMAINE DE SKI ALPIN DE PRALOGNAN-LA-VANOISE : station entière	9
2.1	PRALOGNAN	10
3	DOMAINE DE SKI ALPIN DE PRALOGNAN-LA-VANOISE : secteurs	24
3.1	PRALOGNAN-BOCHOR	25
3.2	PRALOGNAN-FONTANETTES	38
4	DOMAINE DE SKI NORDIQUE DE PRALOGNAN-LA-VANOISE	51
4.1	PRALOGNAN-NORDIQUE	52
5	ANALYSES	59
5.1	Principaux enseignements de l'étude ClimSnow	60
5.2	Les durées d'enneigement	61
5.3	La production de neige de culture	61
5.4	Conclusion	62

1 MÉTHODOLOGIE ET TERMINOLOGIE

1.1 Objectifs et enjeux de l'étude

Le contexte et la problématique

Le changement climatique a déjà conduit à réduire l'enneigement des massifs montagneux, principalement à basse et moyenne altitude. Dans ce contexte, les situations de faible enneigement sont de plus en plus fréquentes et ceci perturbe les conditions d'exploitation de tous les domaines skiables. La poursuite du réchauffement dans les prochaines décennies continuera à réduire la fiabilité de l'enneigement naturel. La baisse est généralisée, mais les effets sur les conditions d'exploitation des domaines skiables sont variables en fonction des caractéristiques locales (altitude, orientation, pente) et du rôle joué par la production de neige. Il importe d'estimer le plus finement possible ces effets afin d'en tirer les conséquences et d'en tenir compte dans les stratégies d'adaptation des territoires de montagne et des stations de sport d'hiver.

- 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 ? Avec quelle pression sur les milieux (notamment ressources en eau mobilisées) ?
- Comment aborder des périodes de transition ?

Ces questions se posent à des degrés divers à l'ensemble des espaces valléens dont actuellement les économies et la vie sociale dépendent fortement de l'enneigement naturel et géré (damage, production de neige).

La solution apportée

La méthodologie des études ClimSnow a été développée par un consortium comprenant Météo-France, INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement) et Dianeige (bureau d'étude spécialisé dans les projets d'aménagement touristique en montagne). Cette méthodologie 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 mauvaises saisons, durées d'enneigement. Pour la neige de culture, l'étude simule l'évolution future du potentiel de froid et les volumes d'eau correspondant à la production de neige simulée par le modèle.

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 des projections climatiques régionales à l'état de l'art, 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.

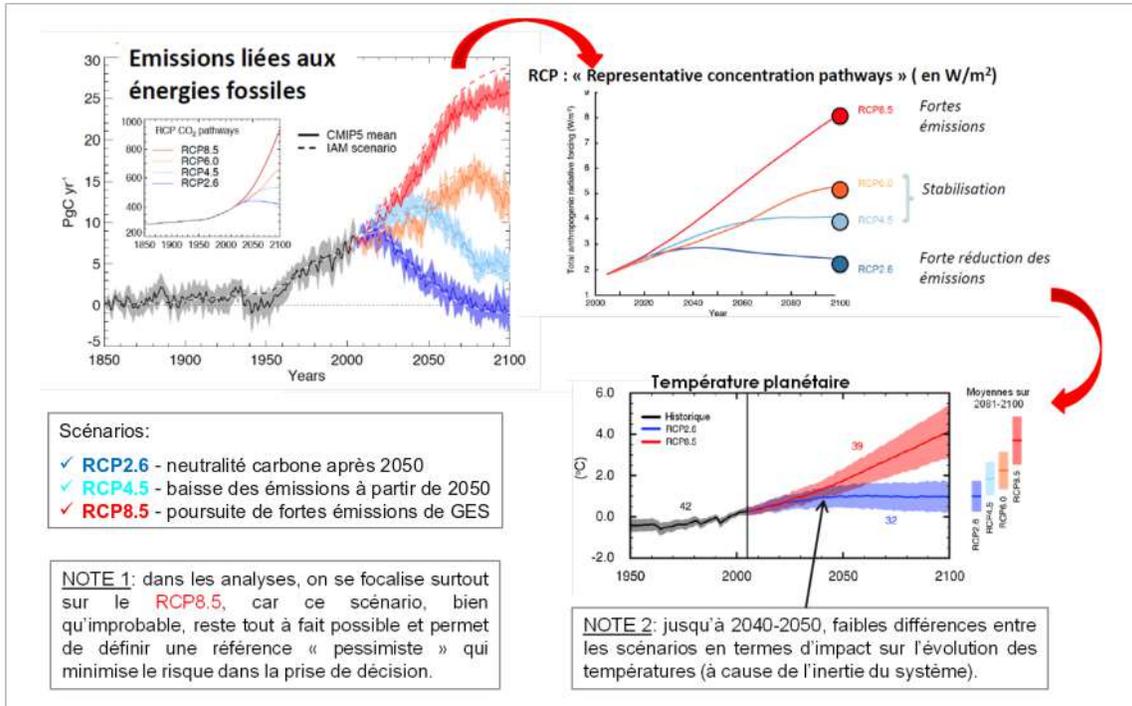


Figure 1 – Les projections climatiques dépendent des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.

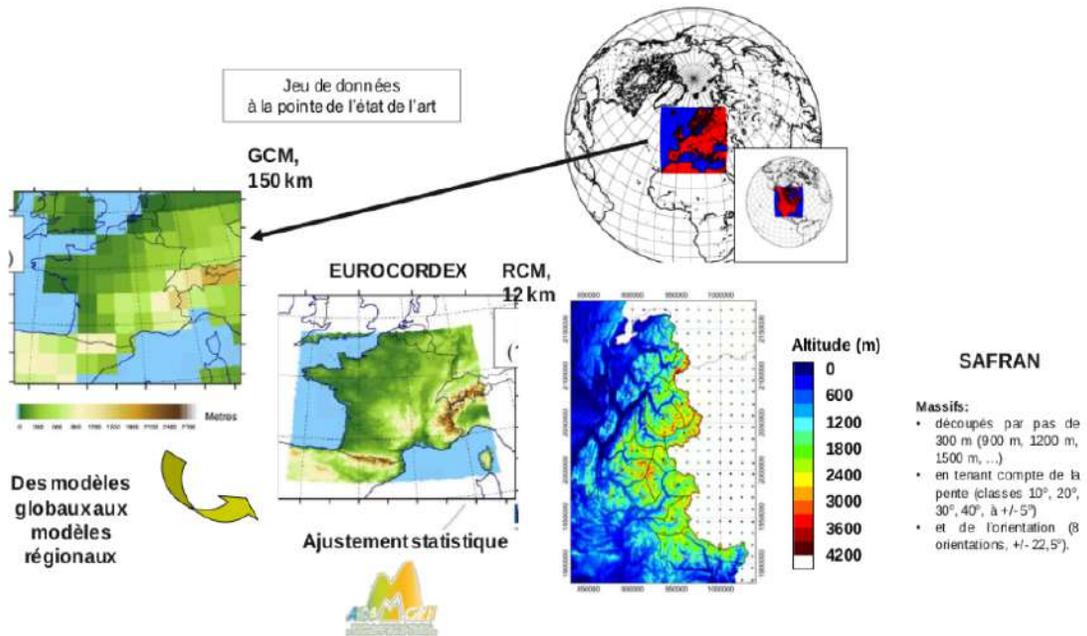


Figure 2 – Avec des niveaux de zoom progressifs, ClimSnow permet de passer des projections à grande échelle (qui couvrent toute la planète) à des prévisions locales (qui prennent en compte la topographie des stations de ski).

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'enneigeur, de la température humide, de la vitesse du vent et de l'objectif de production). Le modèle exploite tous les créneaux de froid disponibles, avec l'hypothèse que tous les enneigeurs puissent fonctionner simultanément.

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 totale de neige damée (naturelle + de culture) 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

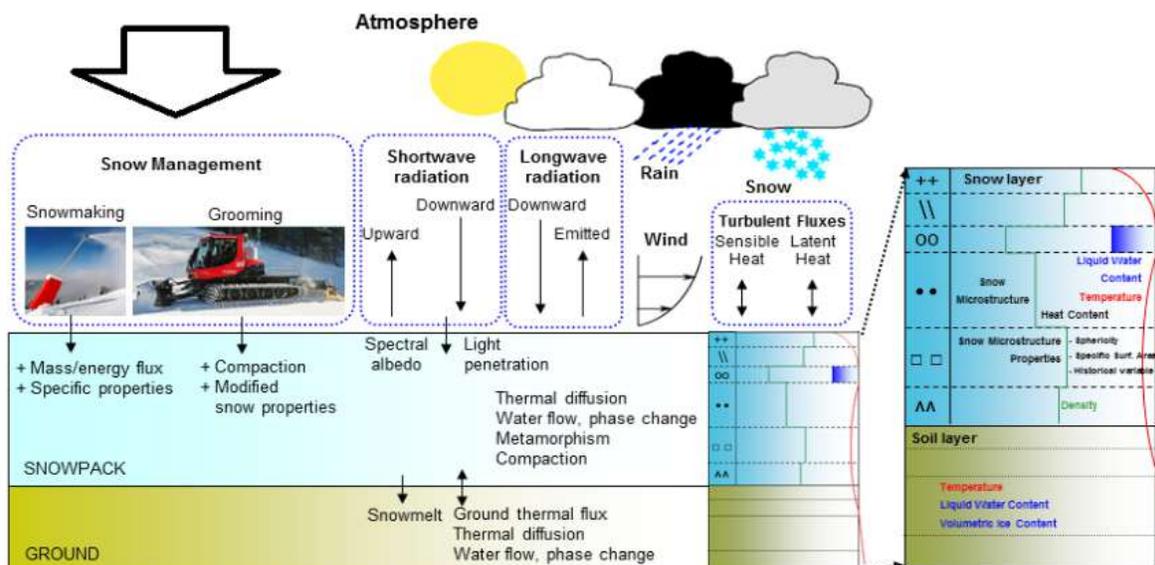


Figure 3 – Schéma du modèle de neige Crocus-Resort, intégrant la prise en compte de la neige de culture et du damage.

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°).

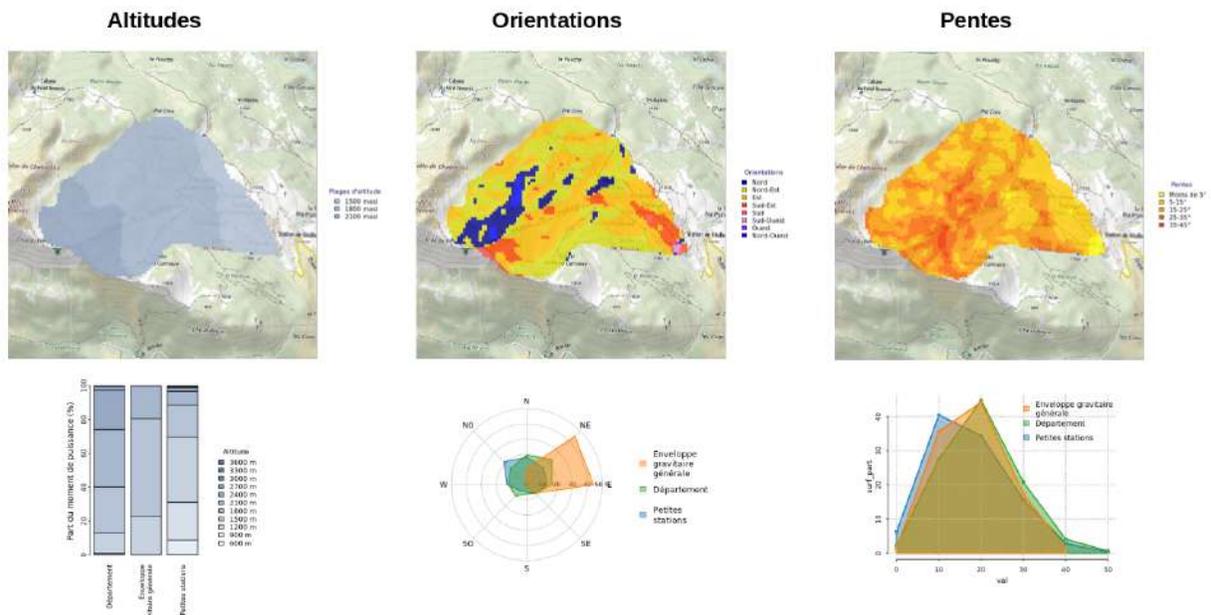


Figure 4 – Découpage d'une station de ski en fonction de ses altitudes, ses orientations et ses pentes. Cette approche permet de définir les zones sur lesquelles les simulations de l'enneigement sont lancées.

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 "mauvaises saisons" (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 mauvaises saisons

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.

L'image ci-après donne des éléments d'interprétation pour mieux comprendre ces indicateurs climatiques.

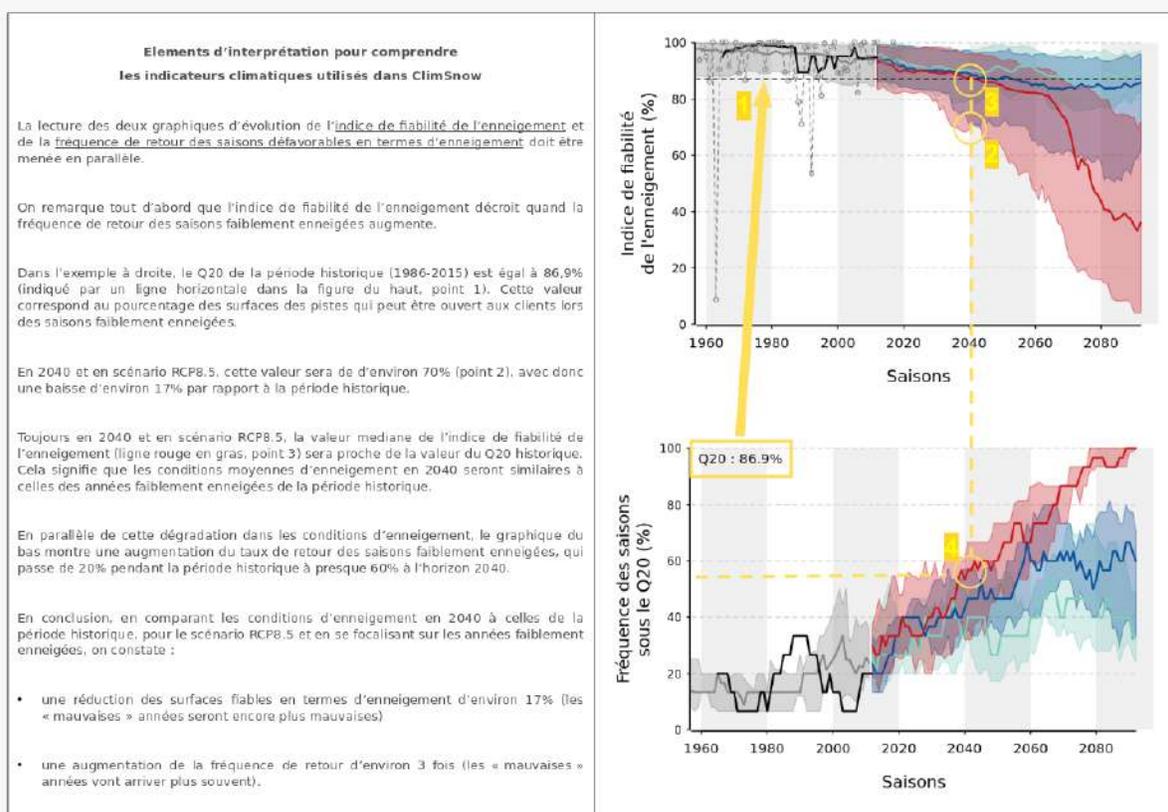


Figure 5 – Éléments d'interprétation pour comprendre les indicateurs climatiques utilisés dans ClimSnow.

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. Comme expliqué auparavant, le modèle produit systématiquement de la neige, si les fenêtres de froid le permettent, jusqu'à la consommation de 150 kg m^{-2} d'eau (entre le 01/11 et le 15/12) ou jusqu'à l'obtention d'une couche de 60 cm de neige damée (entre le 15/12 et le 31/03).

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. La période analysée s'étend de novembre et avril, soit environ 180 jours au total.

1.6 ClimSnow : note méthodologique

L'étude ClimSnow est basée sur une méthodologie de projections climatiques de l'enneigement développée par Météo-France, INRAE et Dianeige et mise au point dans le cadre de différents projets de recherche au niveau national et européen. Les résultats présentés dans ce rapport représentent donc l'état de l'art en matière de projections climatiques de l'enneigement pour les stations de ski.

ClimSnow offre une perspective sur les conditions d'enneigement naturel et géré (tenant compte du damage et de la production de neige) à court terme (jusqu'à 2050), mais aussi post-2050, selon plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre utilisés par le GIEC (scénarios RCP). Parmi les indicateurs nivo-météorologiques qui ont été calculés et analysés, dans les sections suivantes le focus est mis surtout sur les indices de fiabilité de l'enneigement, les durées d'enneigement annuelles et les modalités de la production de neige de culture. Dans l'analyse de ces résultats, il est important de considérer les points suivants.

- La chaîne de modélisation utilisée par ClimSnow a, comme tout type de modèle, certaines limites. En particulier, les effets climatiques très localisés, le transport de neige par le vent ou le stockage de la neige à l'aide de barrières ne sont pas pris en compte. Il se peut donc que le modèle, par exemple, ne représente pas correctement les quantités de neige dans des zones très ventées. De la même façon, la production de neige de culture est modélisée en utilisant une configuration « moyenne » en termes d'équipement (taux de production en m^3/h , taux de pertes dans la conversion eau/neige, etc.) et en profitant de toutes les fenêtres de froid disponibles. Les résultats peuvent donc ne pas correspondre parfaitement aux observations de terrain.
- La méthodologie de ClimSnow est centrée sur l'étude des domaines skiables et de leur « fiabilité » en termes de conditions d'enneigement pendant la saison d'hiver, et sans préjuger de l'évolution de la disponibilité de la ressource en eau pour la production de neige. En outre, les éléments qui sortent du périmètre géographique des pistes de ski, à l'échelle par exemple d'une commune ou d'un espace valléen, ne sont pas traités par ClimSnow.
- Pour terminer, l'étude ClimSnow ne se focalise que sur les aspects liés à l'évolution du climat (évolution des températures, enneigement, etc.). Afin d'opérer des choix avisés sur les investissements à faire et les projets à retenir, il faudra croiser ces informations avec d'autres éléments de nature notamment économique et environnementale.

2 DOMAINE DE SKI ALPIN DE PRALOGNAN-LA-VANOISE : station entière

2.1 PRALOGNAN

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

Sur cette station, les projets recensés concernent les remontées mécaniques (modification du TSD Edelweiss) et la production de neige (extension du réseau sur les pistes vertes Flottes et Liaison, pour un total d'environ 0.4 ha). Les caractéristiques du domaine skiable, ainsi que les projets, sont résumés dans les tableaux et les images ci-après.

Remarque importante : la méthodologie des études ClimSnow considère qu'une piste fiabilisée par neige de culture l'est sur la totalité de sa largeur, indépendamment de la largeur réellement enneigée. Cela peut conduire à la prise en compte d'une surface de neige de culture supérieure la réalité.

Station : Pralognan

Synthèse pistes		
Surface de pistes	69,8	ha
Longueur de pistes	27,8	km
Synthèse remontées mécaniques		
Longueur de RM	9,4	km
Dénivelée cumulée	2 684	m
Moment de puissance	3 373	km*pers./h
Synthèse neige de culture		
Volume d'eau disponible dans les retenues	0	m ³
Consommation moyenne par saison (2012 - 2020)	108 709	m ³
Surface de pistes couverte en neige de culture	42,7	ha
➤ <i>proportion de pistes avec neige de culture</i>	61%	

Figure 6 – Caractéristiques principales de la station.

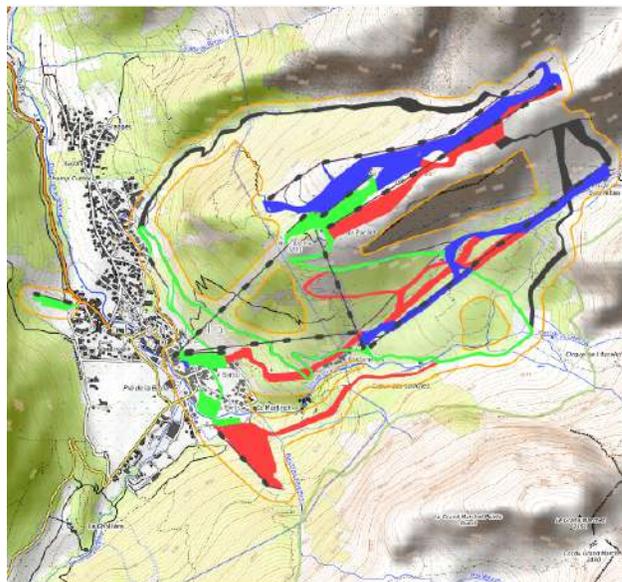
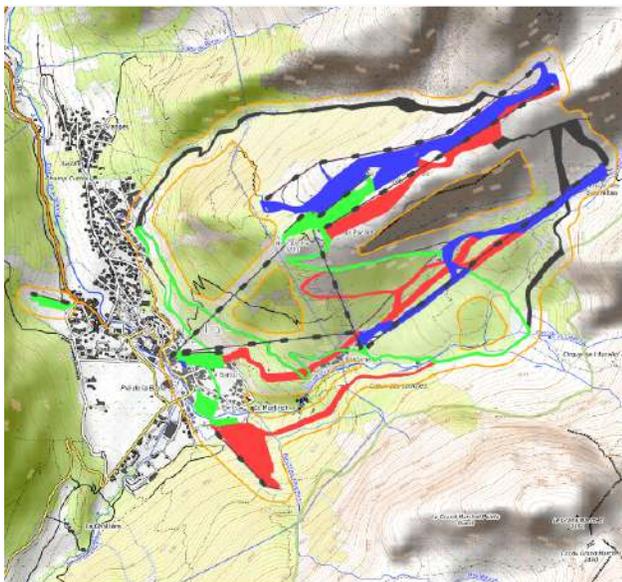


Figure 7 – Carte du domaine et de ses pistes (les couleurs correspondent aux niveaux de difficulté). A gauche l'état actuel, à droite la prise en compte des projets.

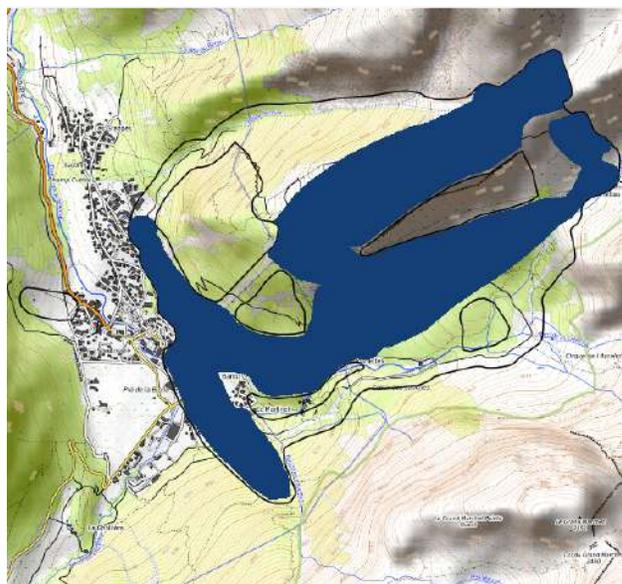
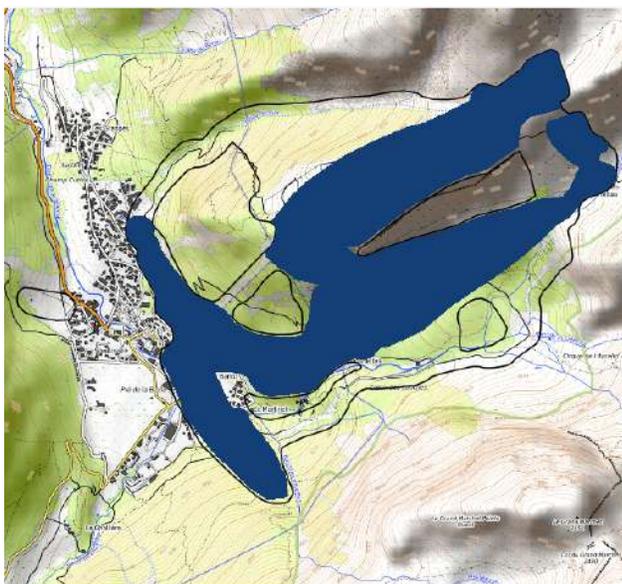


Figure 8 – Zones couvertes par la neige de culture. A gauche l'état actuel, à droite la prise en compte des projets.

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 et pour la période de plus grande fréquentation de la station (vacances d'hiver : Noël et février). 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 les périodes de forte fréquentation) 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 au plus 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 (médiane, situation caractéristique de l'enneigement rencontrée au pire une année sur 2)
- Enveloppes : 1 chance sur 5 (meilleures et pires saisons)
- Lignes horizontales en pointillé : Q20 de la période de référence 1986- 2015

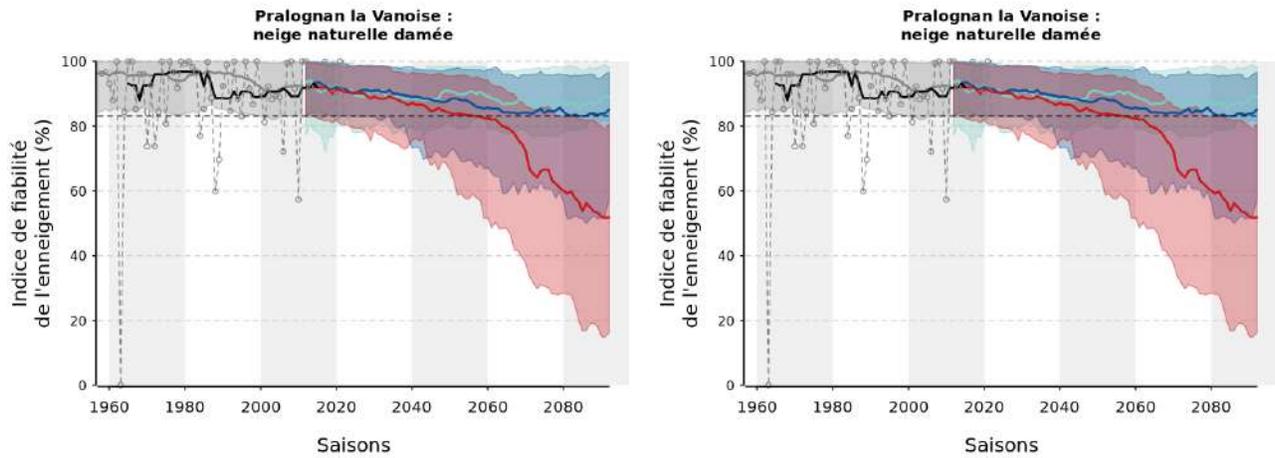


Figure 9 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement en neige naturelle damée (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

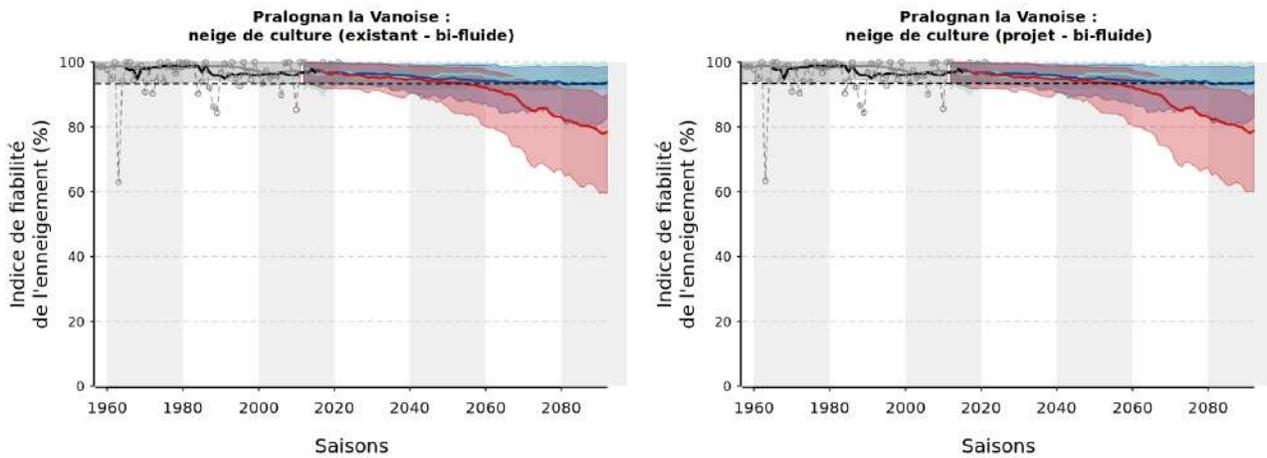


Figure 10 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement avec les équipements de production de neige (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

2.1.3 Taux de retour des mauvaises saisons

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 mauvaises saisons 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 mauvaises conditions d'enneigement qui, dans le passé, se présentaient 1 année sur 5. De fait, la fréquence de retour des mauvaises saisons augmente quand l'indice moyen de fiabilité décroît. Il faut bien noter que la référence et la période future correspondent à la même configuration d'enneigement : par exemple, pour l'estimation de la fréquence de retour des mauvaises années en climat futur tenant compte de la production de neige, le Q20 de référence est lui aussi calculé en tenant compte de la production de neige.

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.

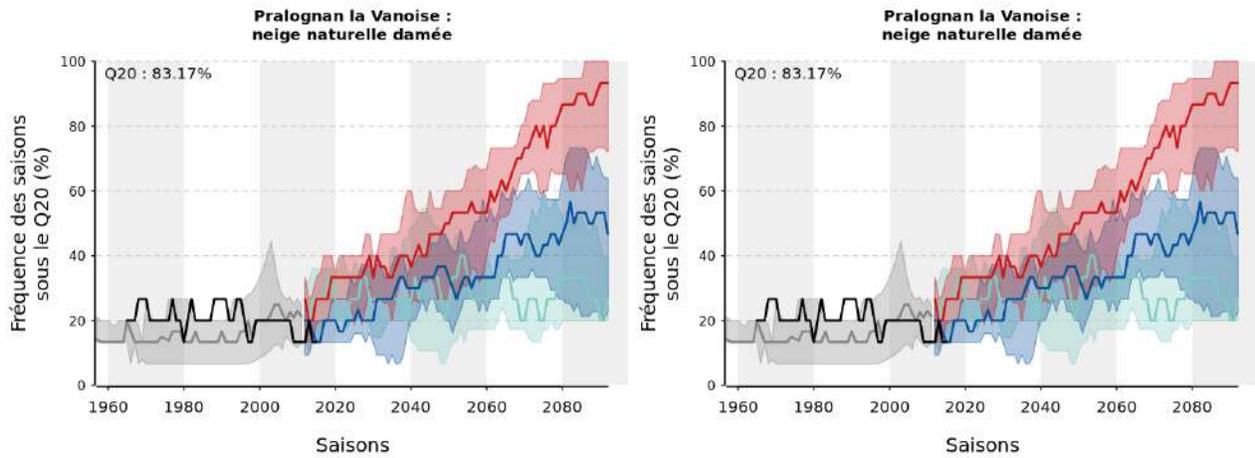


Figure 11 – Évolution du taux de retour des mauvaises saisons en neige naturelle damée (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

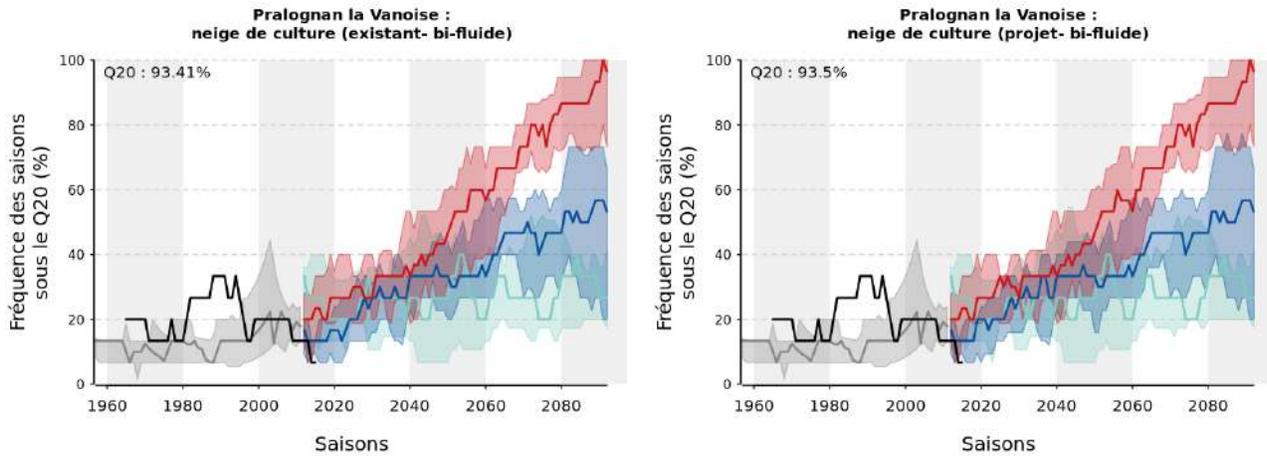


Figure 12 – Évolution du taux de retour des mauvaises saisons avec les équipements de production de neige (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

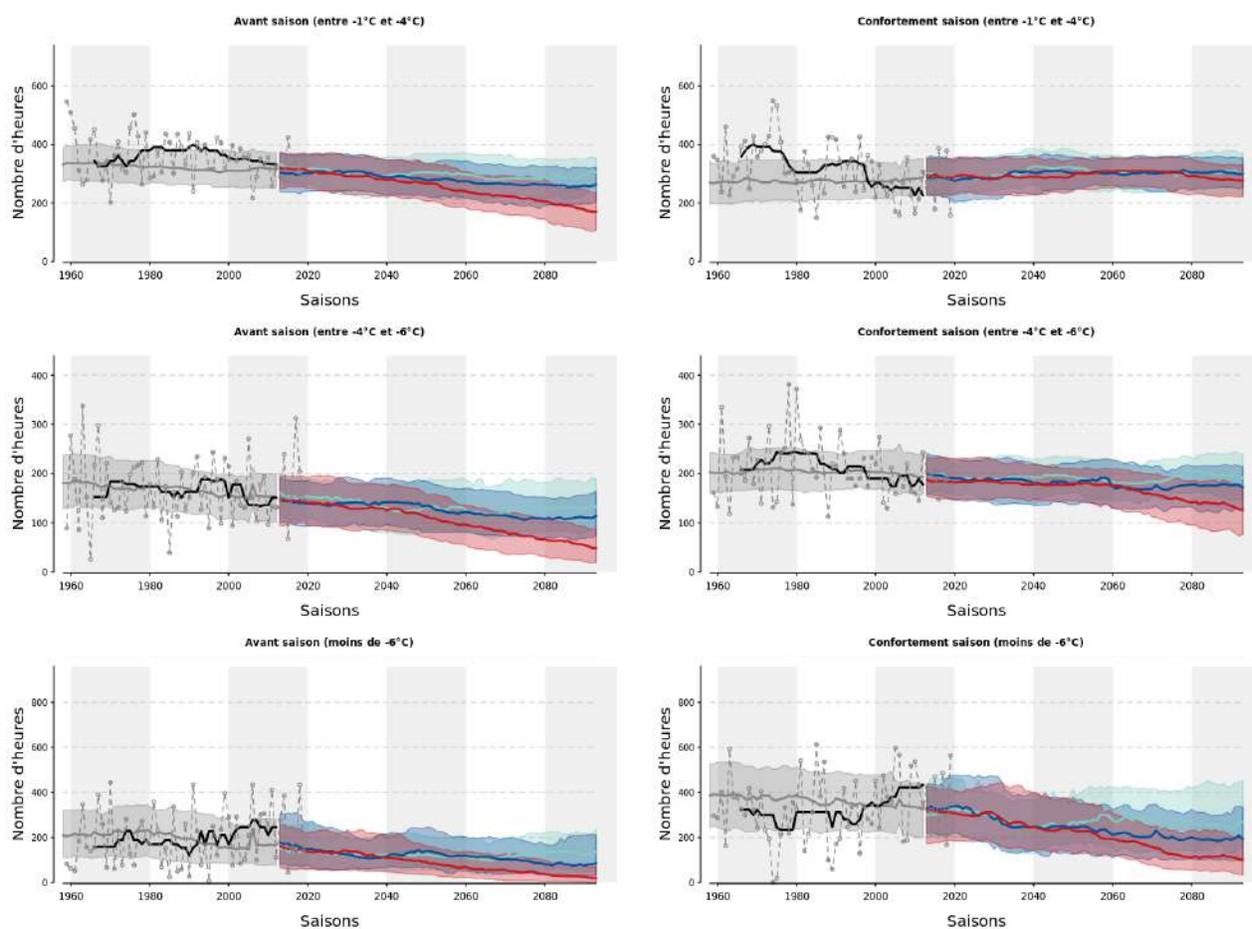


Figure 13 – Évolution du potentiel de froid à 1500 m (± 150 m), en fonction de la période de la saison (période "avant saison", du 01/11 au 20/12, et période de "confortement", du 21/12 au 31/01) et en fonction de l'intervalle de température considéré (entre -1°C et -4°C , entre -4°C et -6°C et $<-6^{\circ}\text{C}$).

2.1.5 Besoin en eau pour la production de neige de culture

Les volumes simulés de besoin en eau expriment la demande 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 maximale 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). En général, 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 mais ne permet pas de répondre au besoin de production de neige,
- 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 (ce qui n'est généralement le cas nulle part dans un climat en réchauffement),
- hyp 2 : le besoin est stable ou croissant mais le potentiel froid diminue.

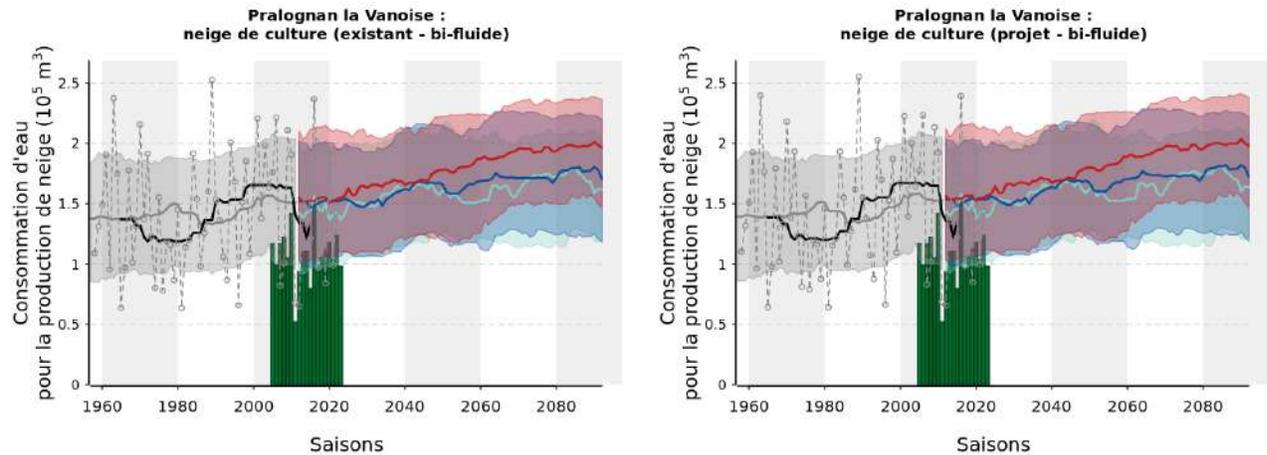


Figure 14 – Évolution de la consommation en eau pour la production de neige de culture. Le graphique de gauche correspond aux installations actuelles et celui de droite aux installations prévues dans les prochaines années. En vert sont représentées les observations de quantité d'eau utilisée pour la production de neige ces dernières 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, avec des installations de type "perches". Ces cartes 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.

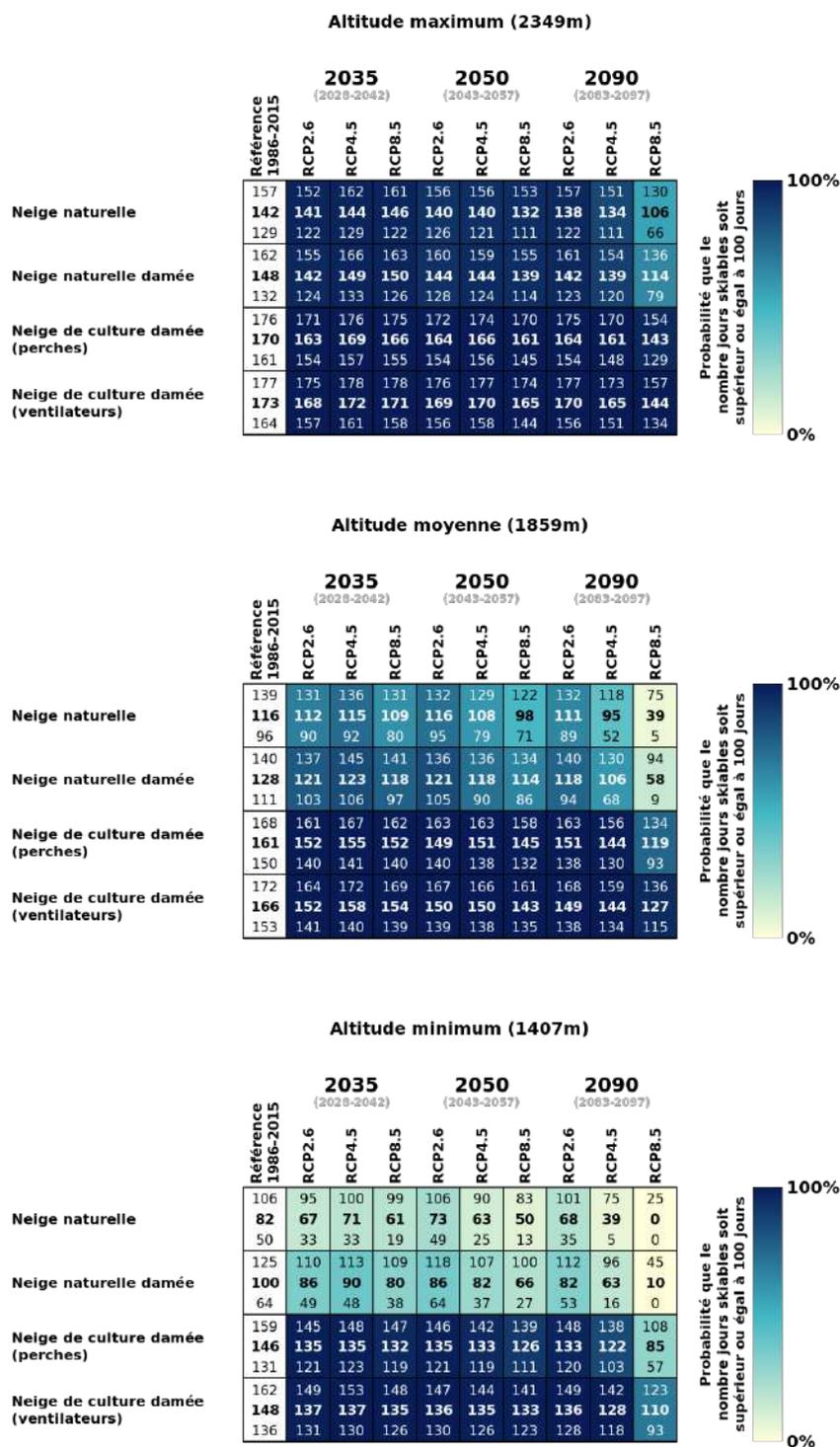


Figure 15 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible sur le domaine considéré, pour l'altitude minimum, moyenne et maximum (du bas vers le haut).

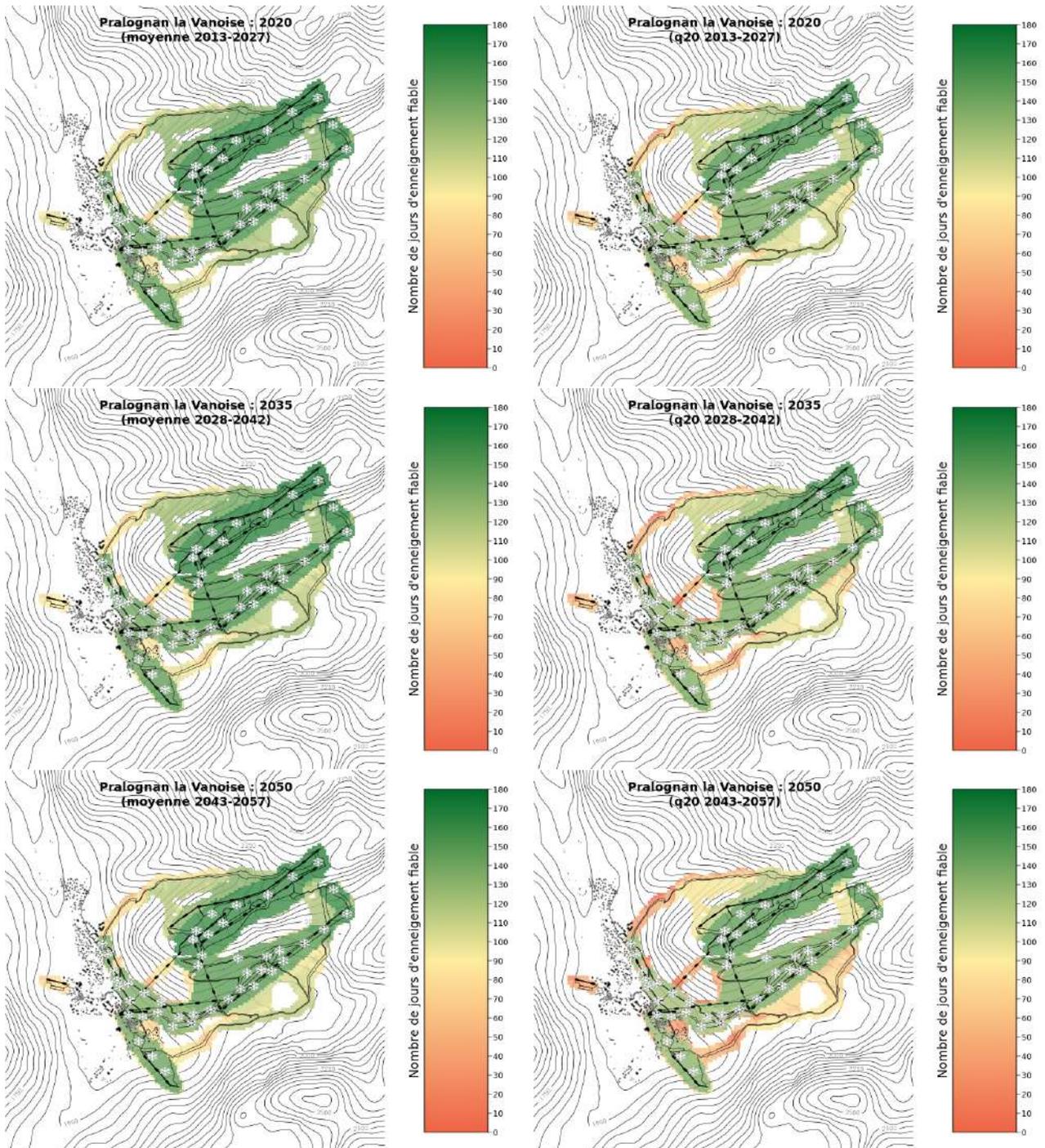


Figure 16 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP4.5 et les équipements actuels et en fonction de l’horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d’enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d’enneigement des saisons défavorables (Q20).

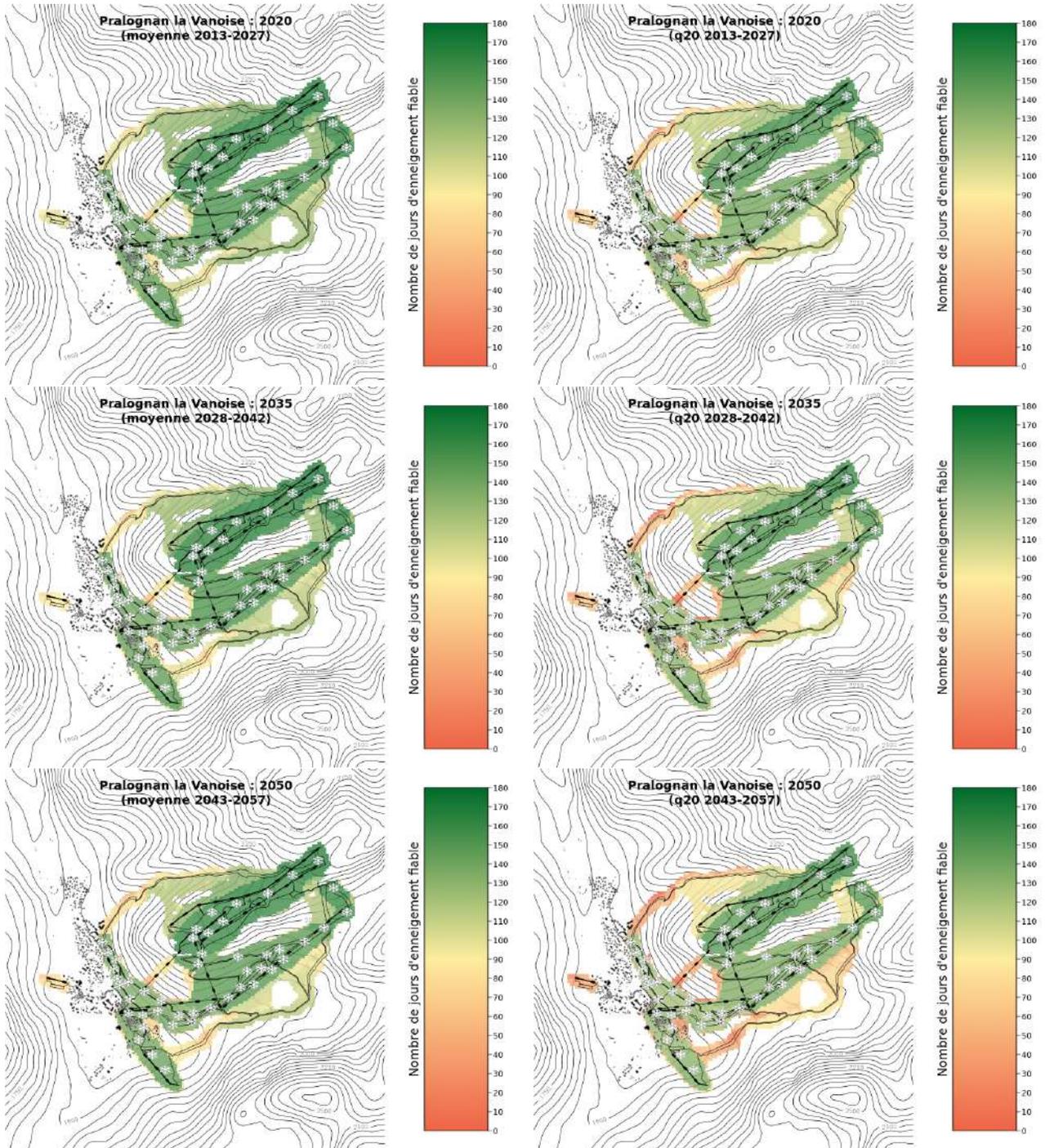


Figure 17 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP4.5 et les projets d'aménagement futurs et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons défavorables (Q20).

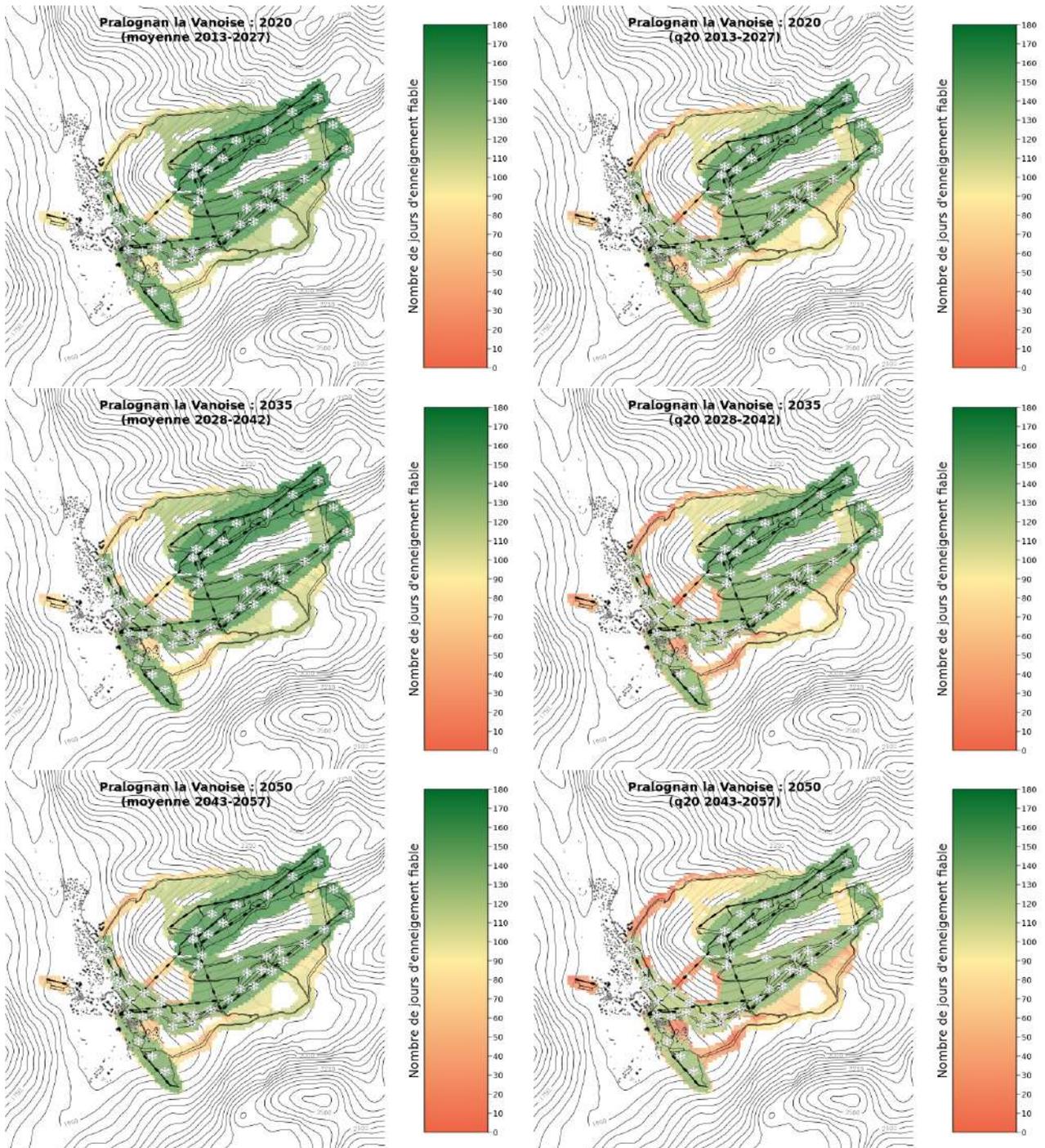


Figure 18 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP8.5 et les équipements actuels et en fonction de l’horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d’enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d’enneigement des saisons défavorables (Q20).

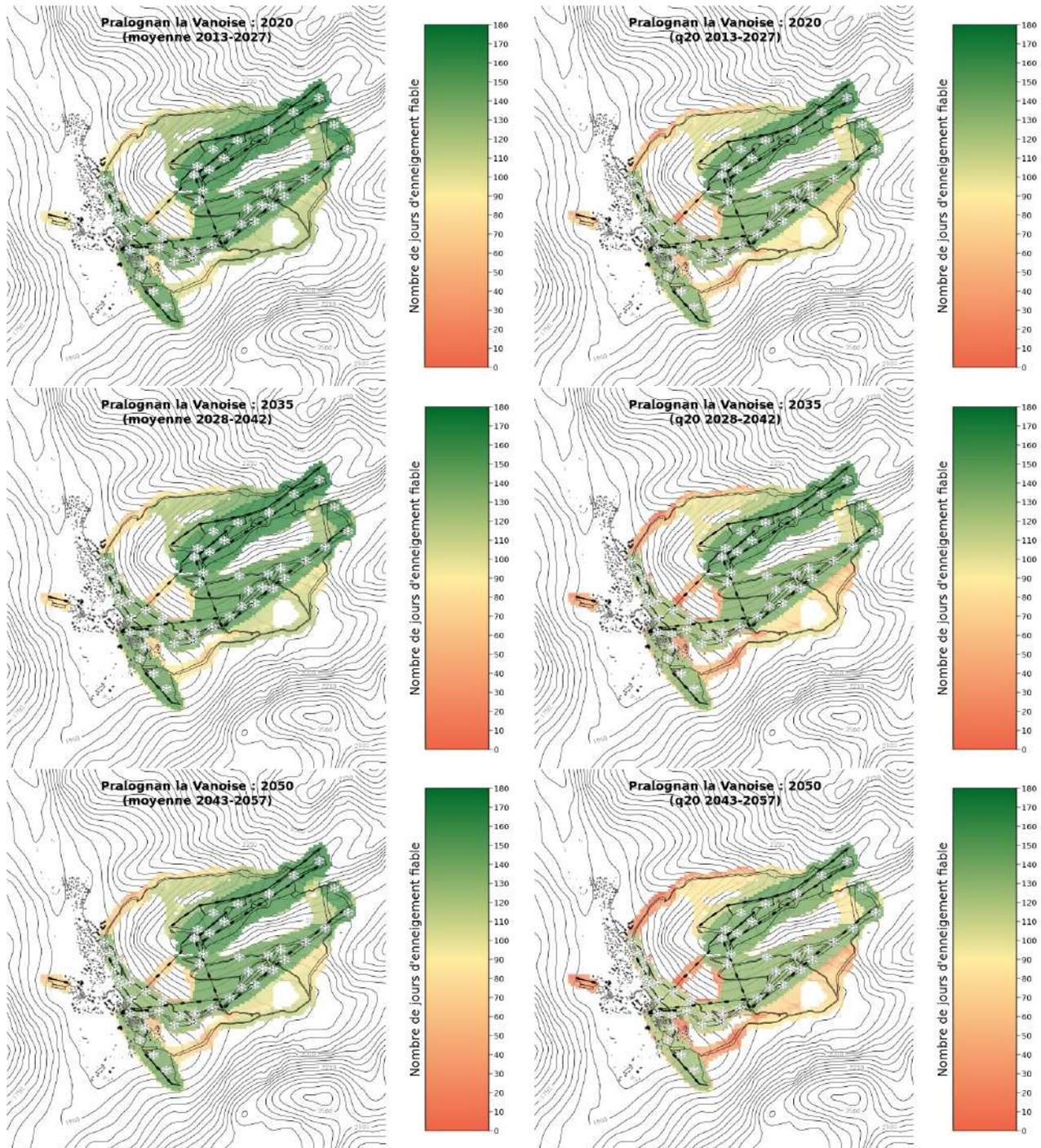


Figure 19 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP8.5 et les projets d'aménagement futurs et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons défavorables (Q20).

3 DOMAINE DE SKI ALPIN DE PRALOGNAN-LA-VANOISE : secteurs

3.1 PRALOGNAN-BOCHOR

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

Les images ci-après présentent les installations du secteur.

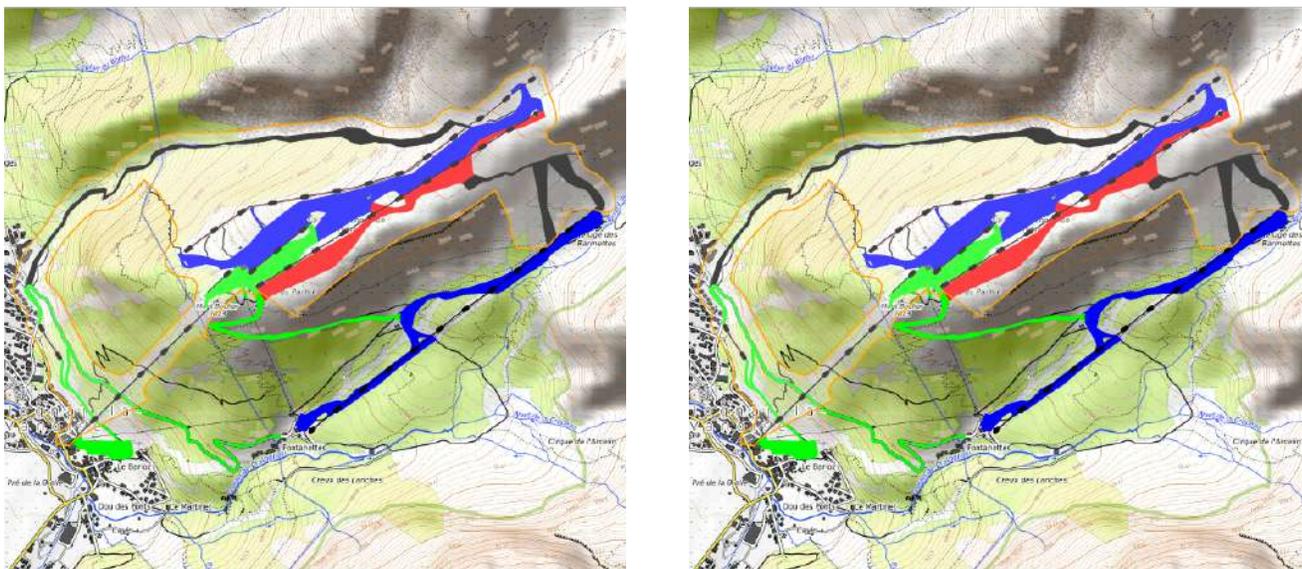


Figure 20 – Carte du domaine et de ses pistes (les couleurs correspondent aux niveaux de difficulté). A gauche l'état actuel, à droite la prise en compte des projets.

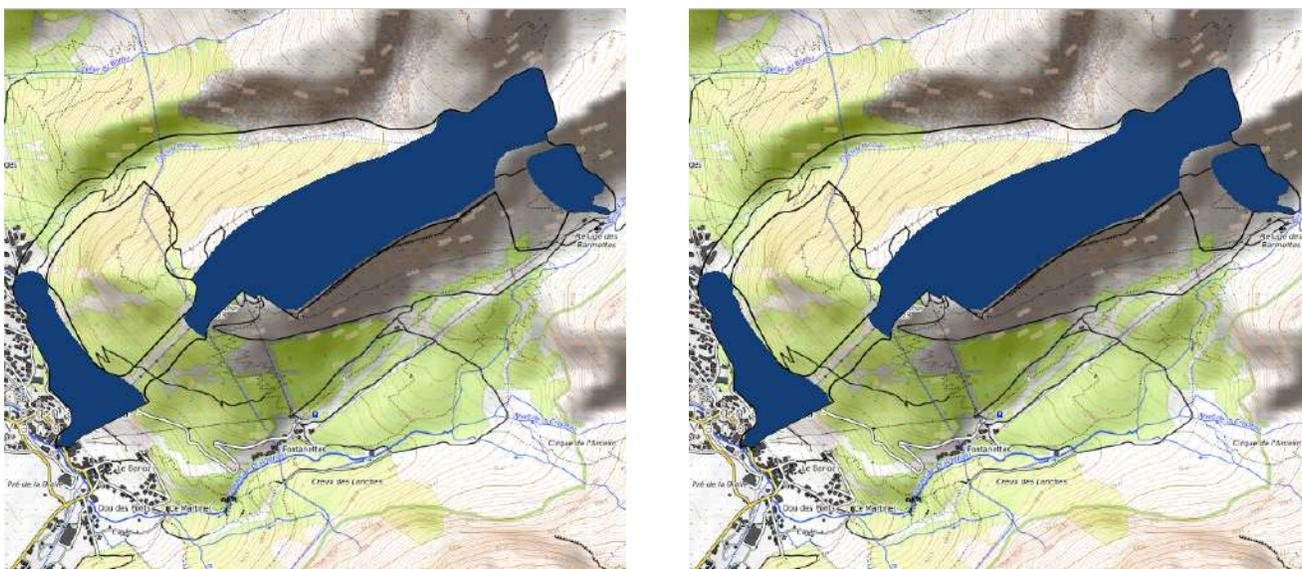


Figure 21 – Zones couvertes par la neige de culture. A gauche l'état actuel, à droite la prise en compte des projets.

3.1.2 Indice de fiabilité de l'enneigement

L'indice de fiabilité de l'enneigement est calculé chaque année pour l'ensemble du domaine skiable et pour la période de plus grande fréquentation de la station (vacances d'hiver : Noël et février). 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 les périodes de forte fréquentation) 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 au plus 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 (médiane, situation caractéristique de l'enneigement rencontrée au pire une année sur 2)
- Enveloppes : 1 chance sur 5 (meilleures et pires saisons)
- Lignes horizontales en pointillé : Q20 de la période de référence 1986- 2015

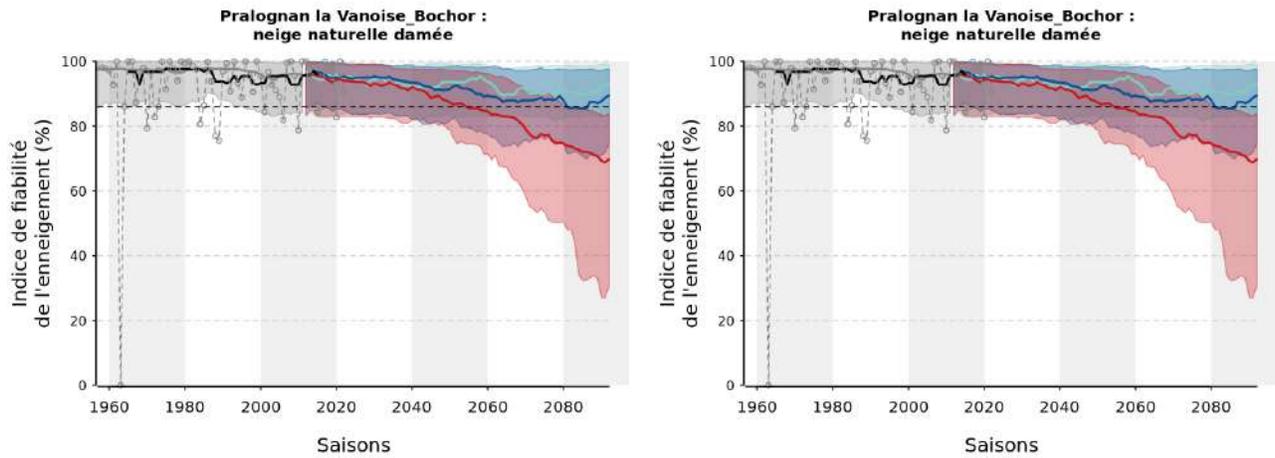


Figure 22 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement en neige naturelle damée (à gauche en considérant le domaine actuel actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

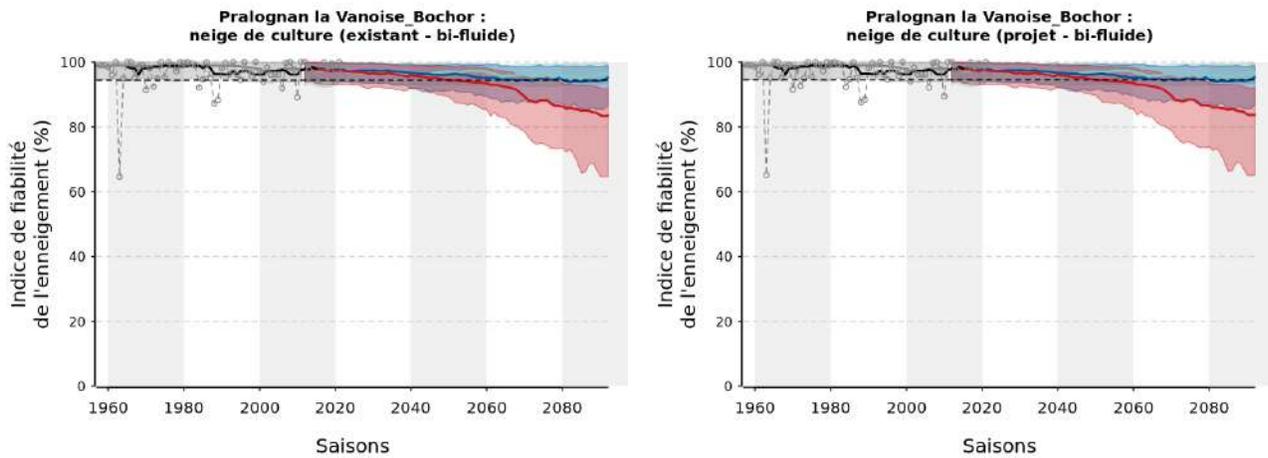


Figure 23 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement avec les équipements de production de neige (à gauche en considérant le domaine actuel actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

3.1.3 Taux de retour des mauvaises saisons

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 mauvaises saisons 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 mauvaises conditions d'enneigement qui, dans le passé, se présentaient 1 année sur 5. De fait, la fréquence de retour des mauvaises saisons augmente quand l'indice moyen de fiabilité décroît. Il faut bien noter que la référence et la période future correspondent à la même configuration d'enneigement : par exemple, pour l'estimation de la fréquence de retour des mauvaises années en climat futur tenant compte de la production de neige, le Q20 de référence est lui aussi calculé en tenant compte de la production de neige.

3.1.4 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.

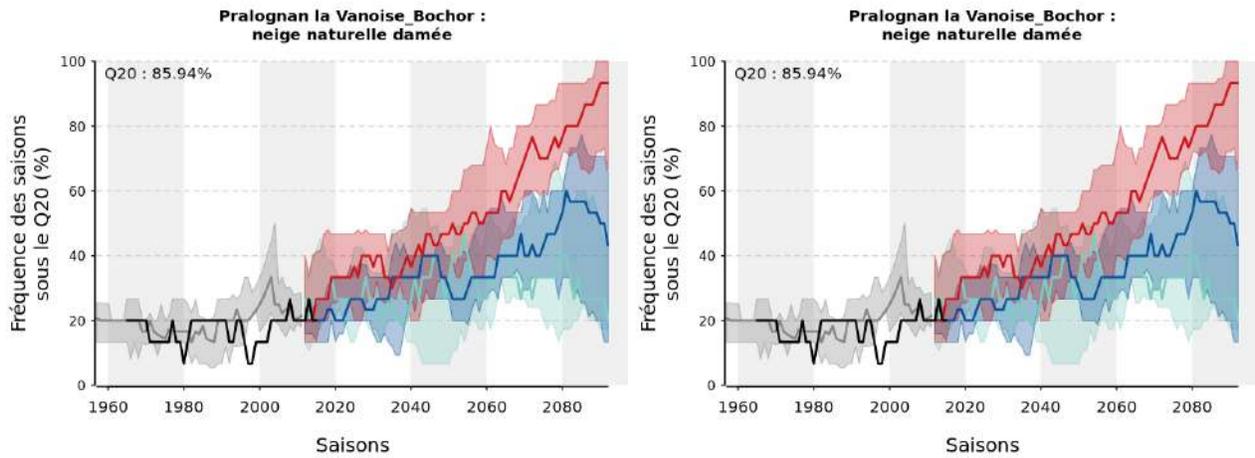


Figure 24 – Évolution du taux de retour des mauvaises saisons en neige naturelle damée (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

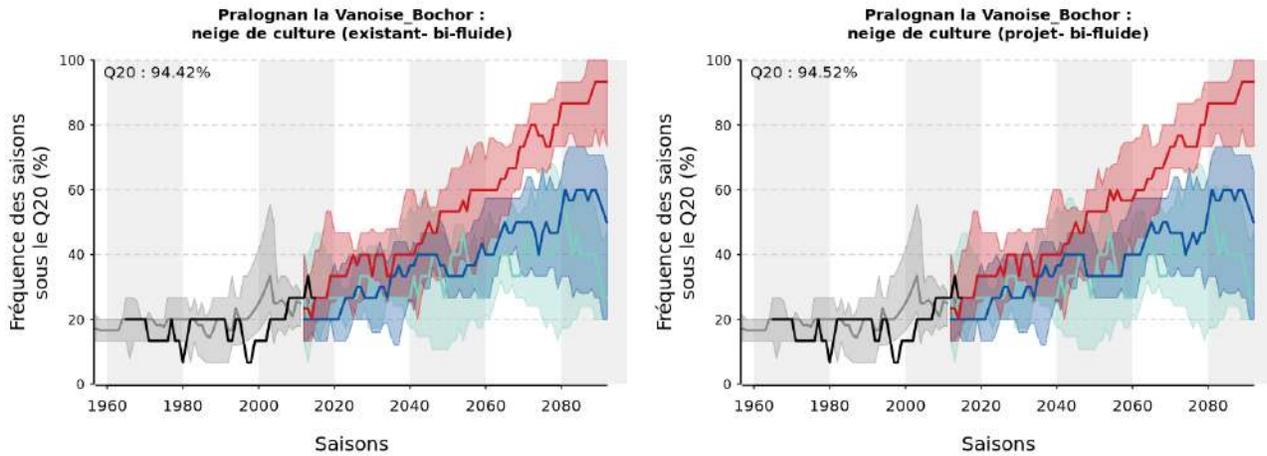


Figure 25 – Évolution du taux de retour des mauvaises saisons avec les équipements de production de neige (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

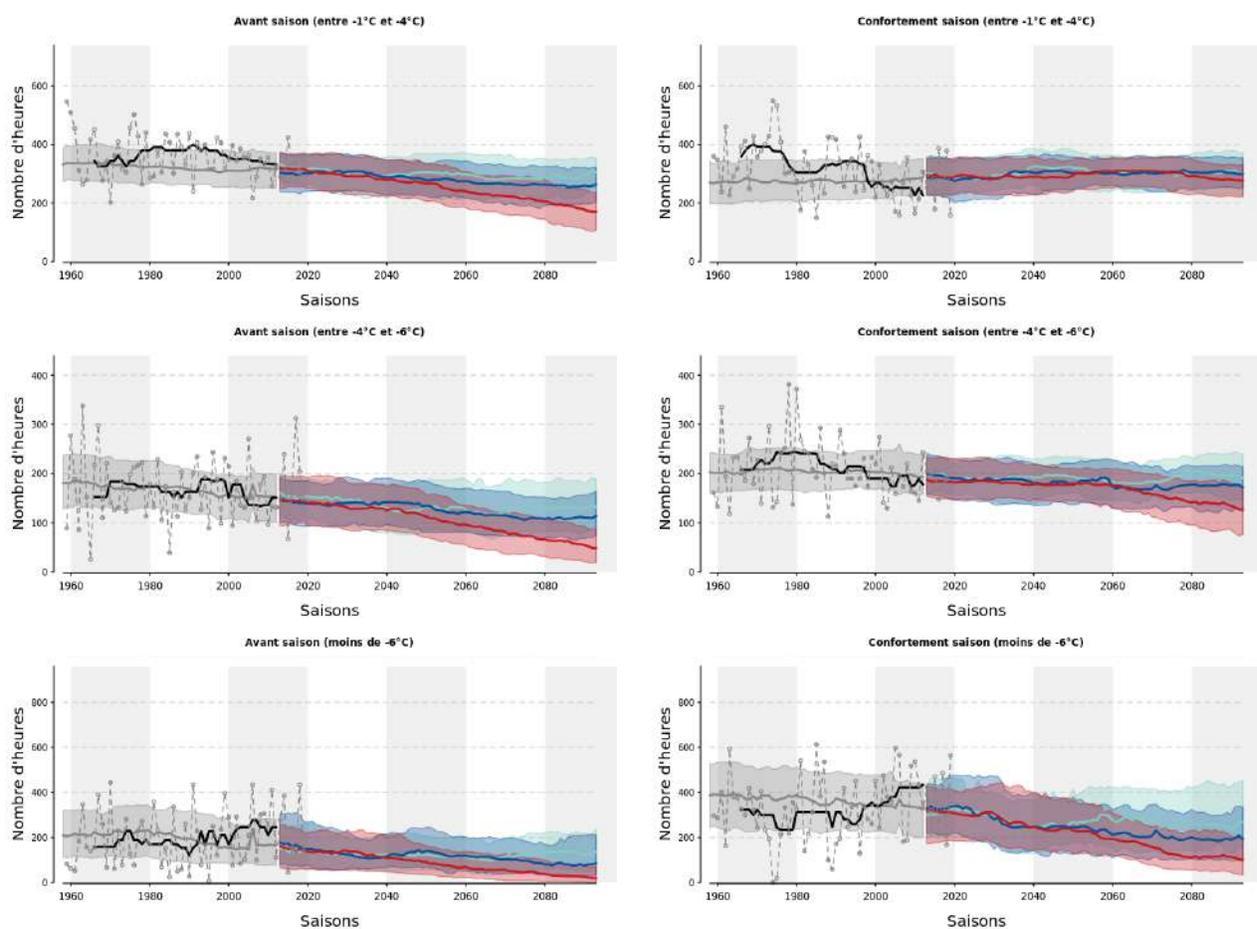


Figure 26 – Évolution du potentiel de froid à 1500 m (± 150 m), en fonction de la période de la saison (période "avant saison", du 01/11 au 20/12, et période de "confortement", du 21/12 au 31/01) et en fonction de l'intervalle de température considéré (entre -1°C et -4°C , entre -4°C et -6°C et $<-6^{\circ}\text{C}$).

3.1.5 Besoin en eau pour la production de neige de culture

Les volumes simulés de besoin en eau expriment la demande 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 maximale 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). En général, 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 mais ne permet pas de répondre au besoin de production de neige,
- 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 (ce qui n'est généralement le cas nulle part dans un climat en réchauffement),
- hyp 2 : le besoin est stable ou croissant mais le potentiel froid diminue.

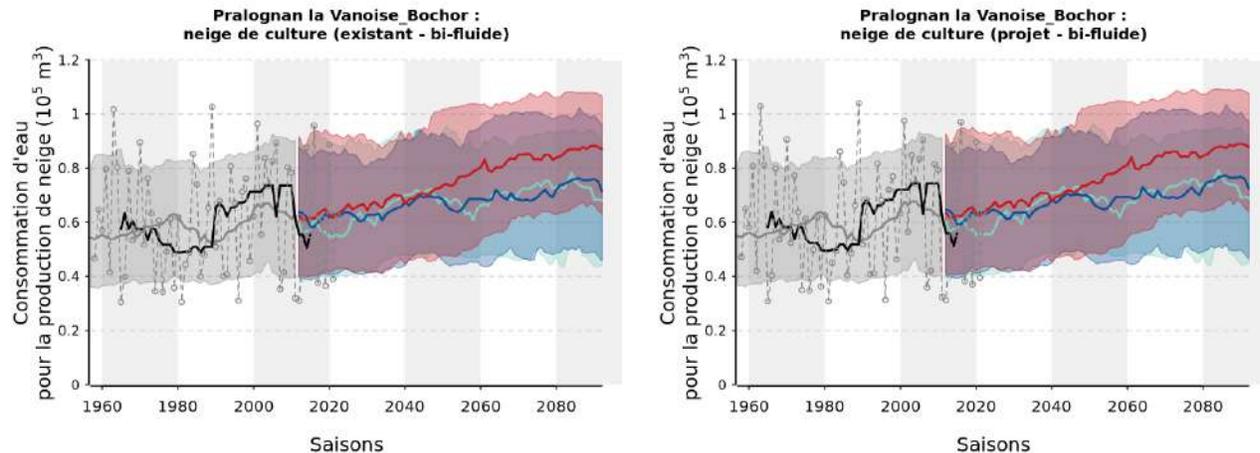


Figure 27 – Évolution de la consommation en eau pour la production de neige de culture. Le graphique de gauche correspond aux installations actuelles et celui de droite aux installations prévues dans les prochaines années. En vert sont représentées les observations de quantité d'eau utilisée pour la production de neige ces dernières années.

3.1.6 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, avec des installations de type "perches". Ces cartes 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.

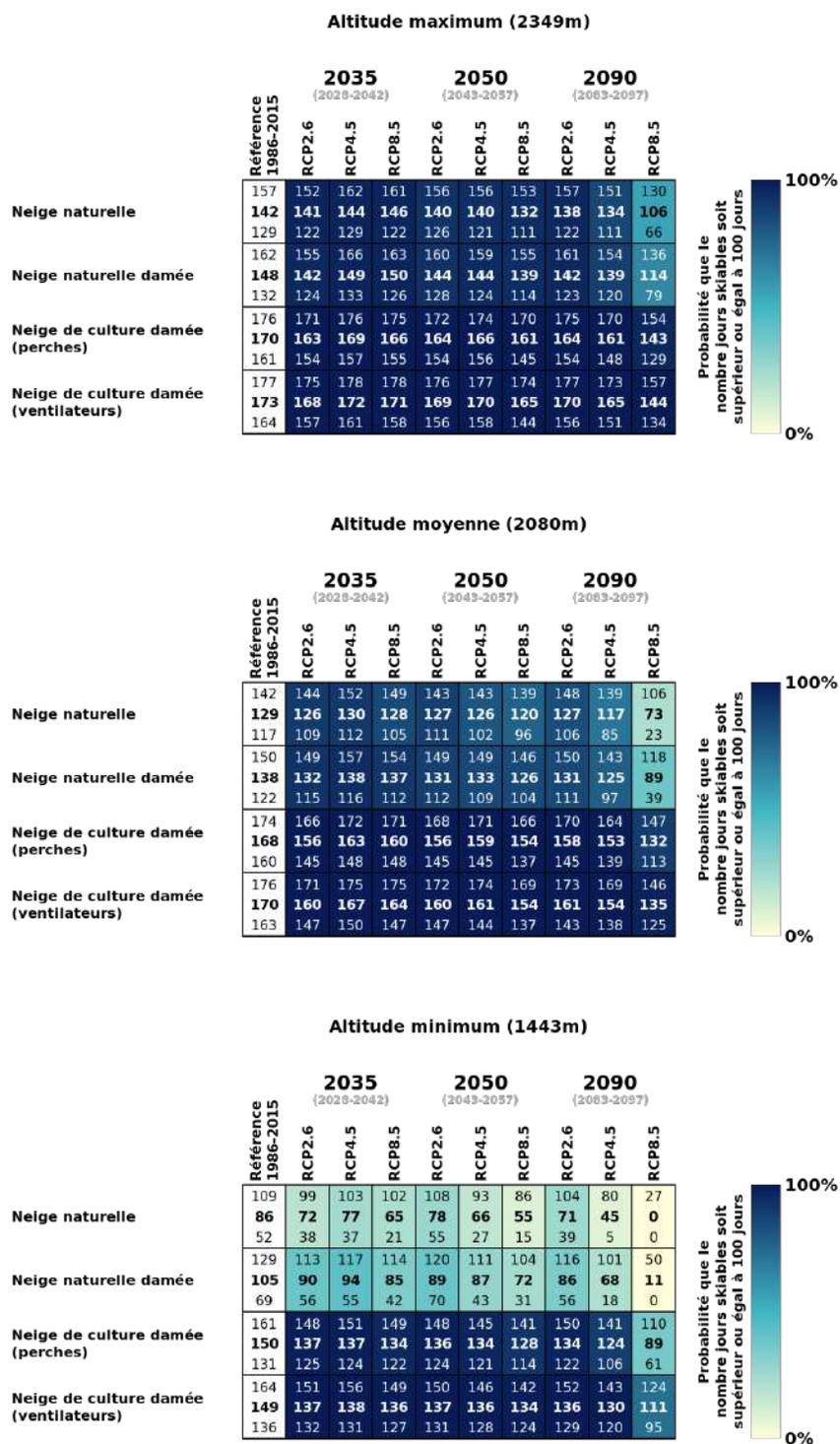


Figure 28 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible sur le domaine considéré, pour l'altitude minimum, moyenne et maximum (du bas vers le haut).

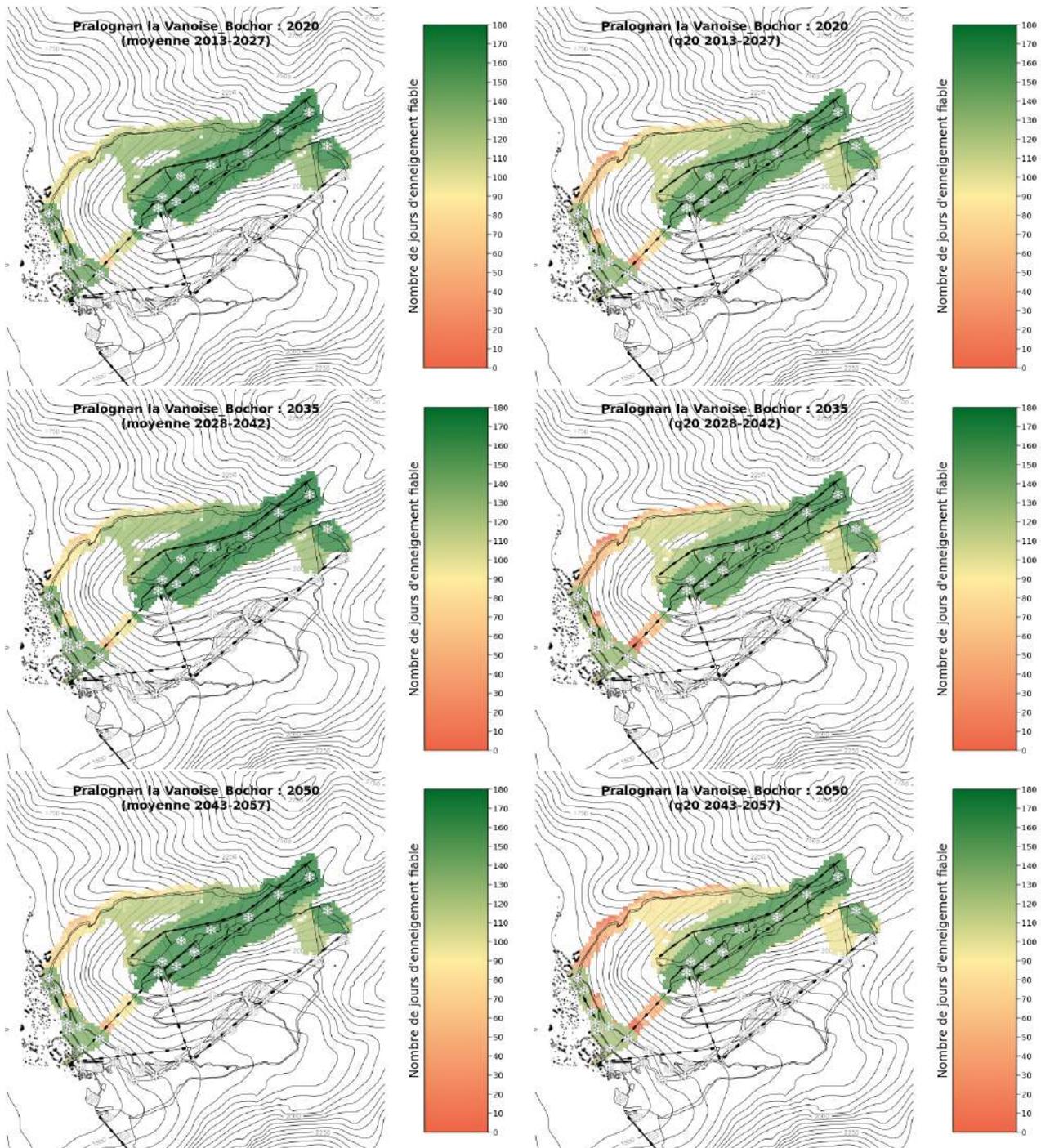


Figure 29 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP4.5 et les équipements actuels et en fonction de l’horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d’enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d’enneigement des saisons défavorables (Q20).

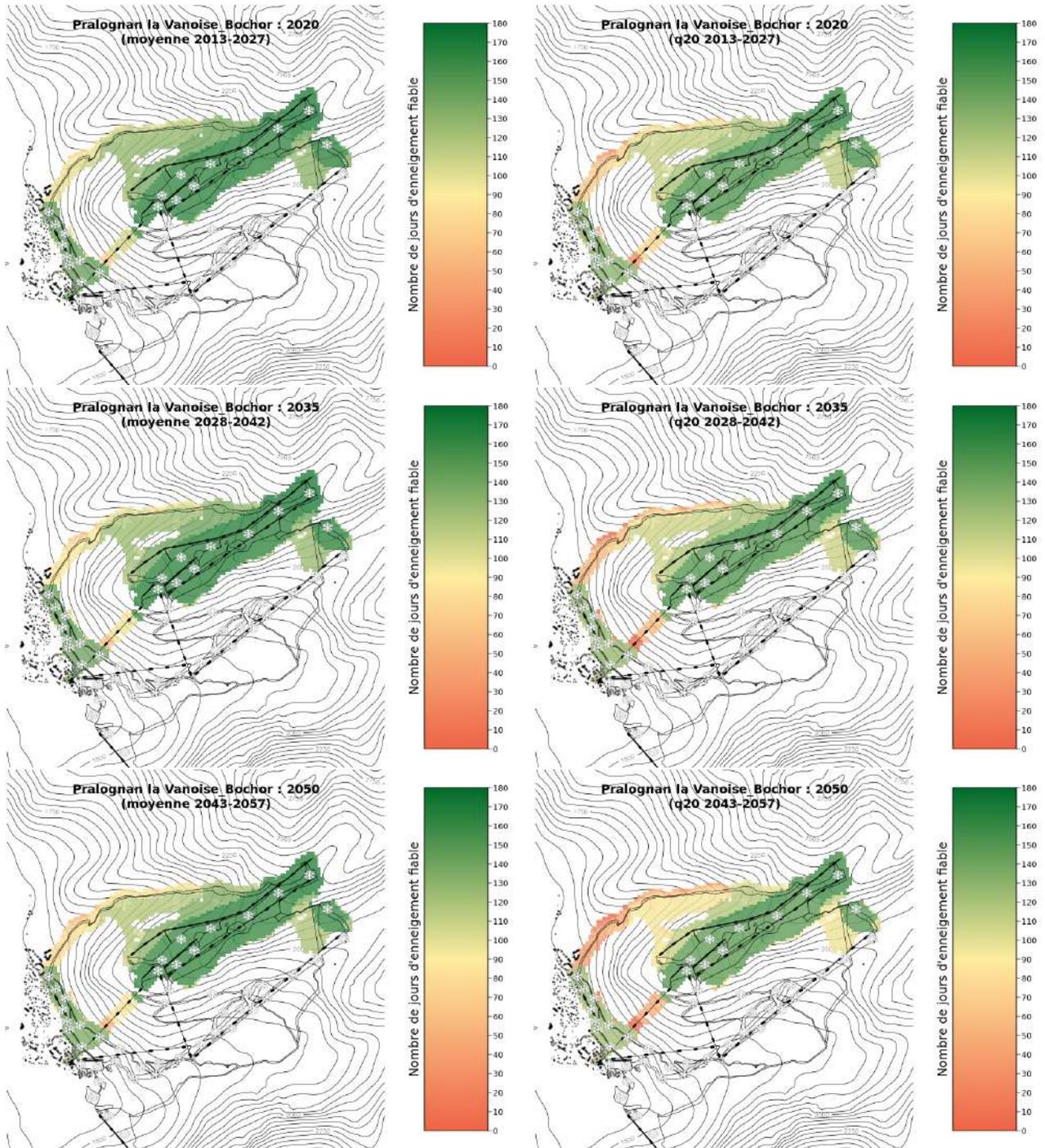


Figure 30 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP4.5 et les projets d'aménagement futurs et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons défavorables (Q20).

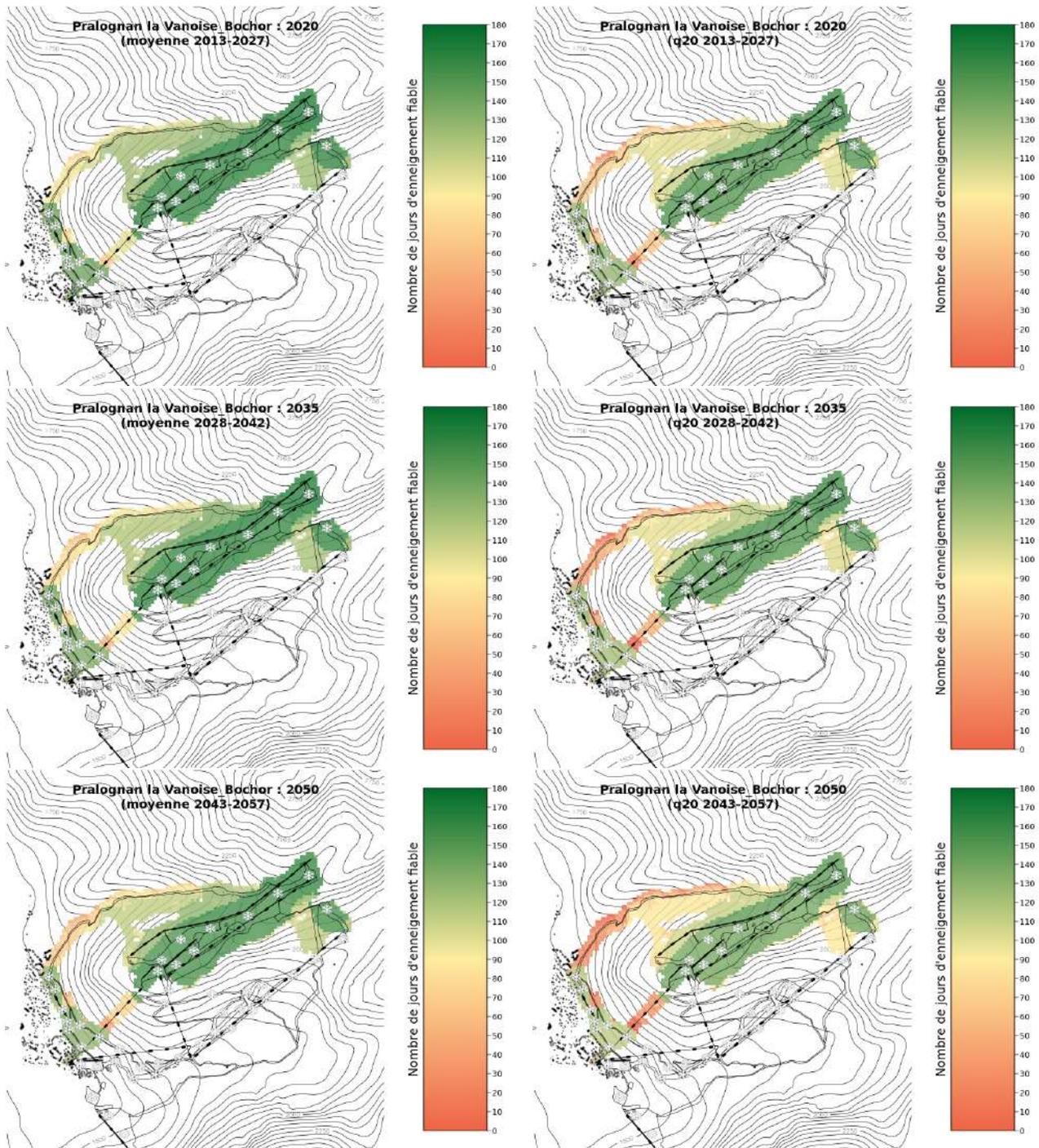


Figure 31 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP8.5 et les équipements actuels et en fonction de l’horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d’enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d’enneigement des saisons défavorables (Q20).

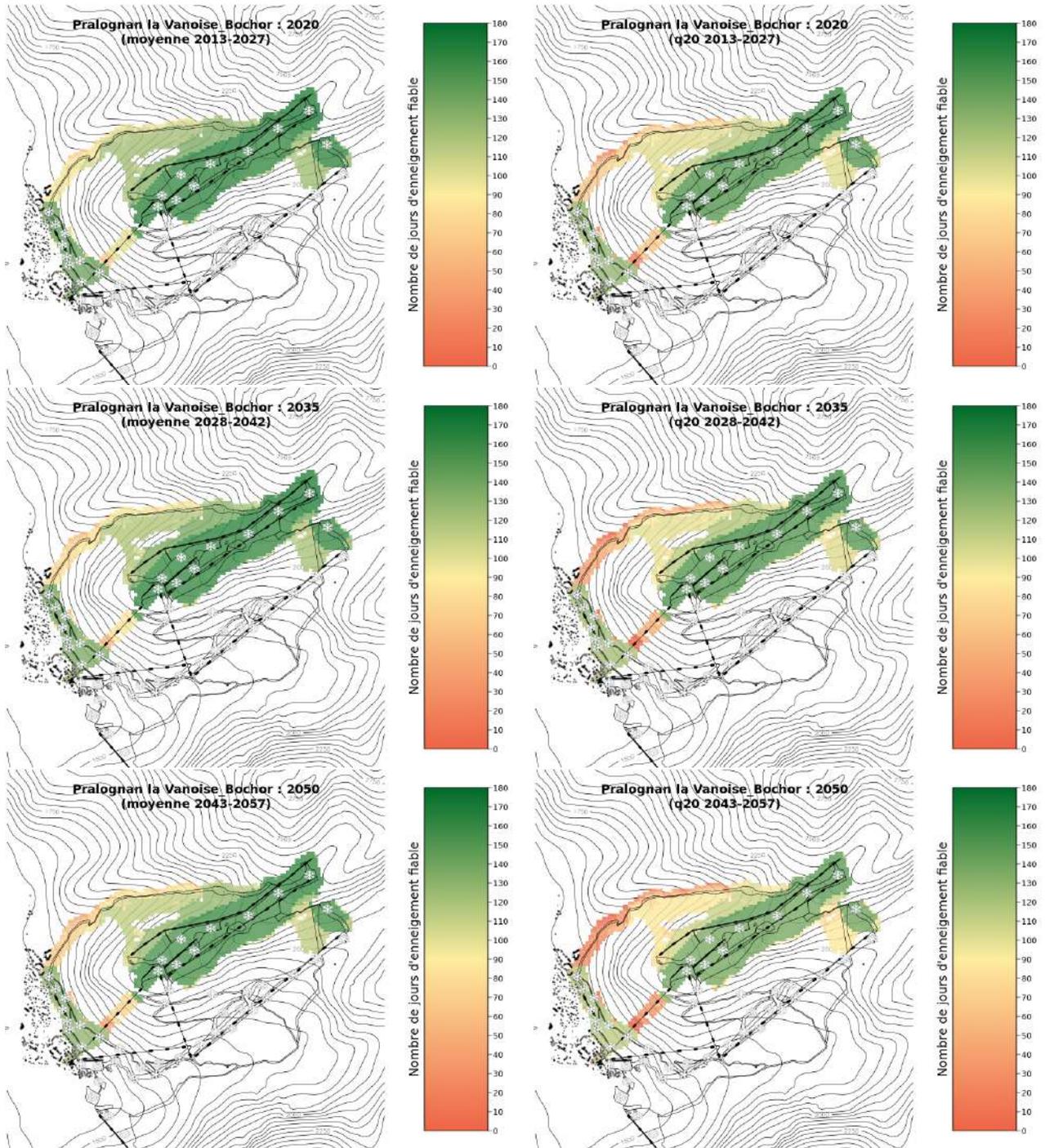


Figure 32 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP8.5 et les projets d'aménagement futurs et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons défavorables (Q20).

3.2 PRALOGNAN-FONTANETTES

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

Les images ci-après présentent les installations du secteur.

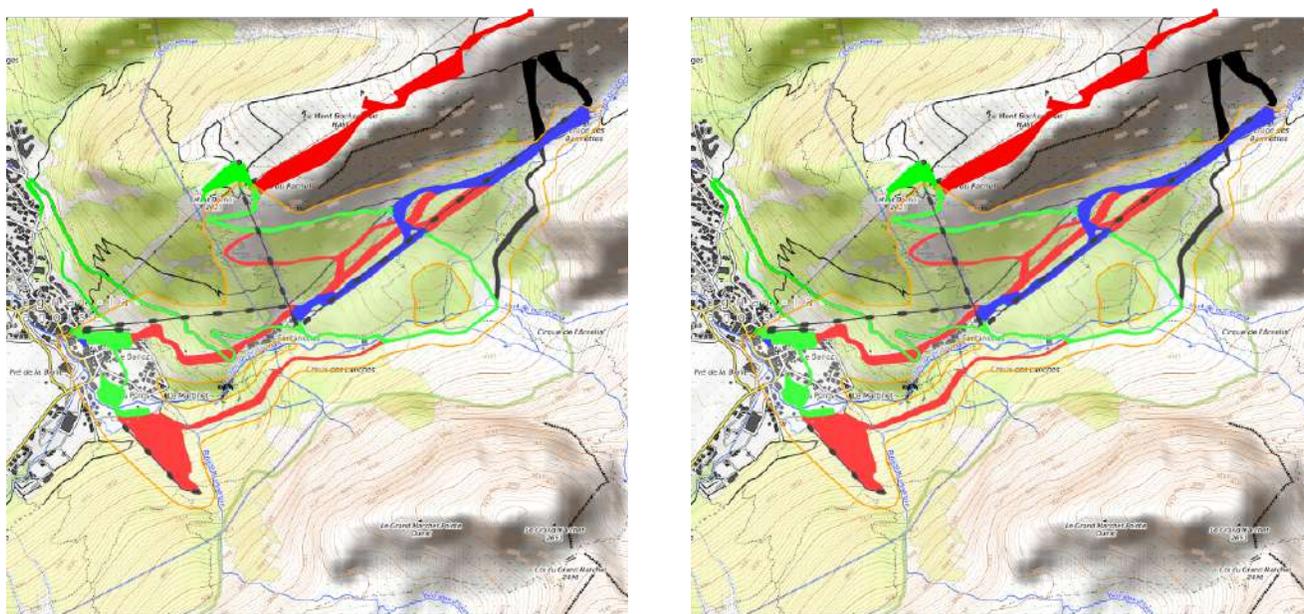


Figure 33 – Carte du domaine et de ses pistes (les couleurs correspondent aux niveaux de difficulté). A gauche l'état actuel, à droite la prise en compte des projets.

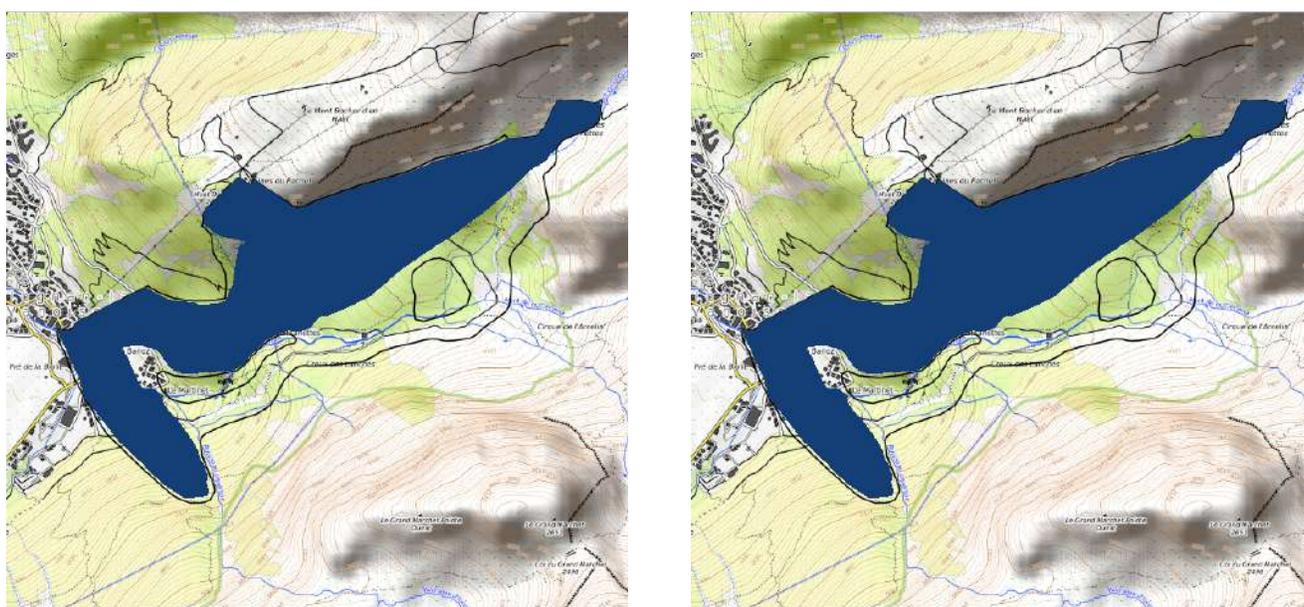


Figure 34 – Zones couvertes par la neige de culture. A gauche l'état actuel, à droite la prise en compte des projets.

3.2.2 Indice de fiabilité de l'enneigement

L'indice de fiabilité de l'enneigement est calculé chaque année pour l'ensemble du domaine skiable et pour la période de plus grande fréquentation de la station (vacances d'hiver : Noël et février). 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 les périodes de forte fréquentation) 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 au plus 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 (médiane, situation caractéristique de l'enneigement rencontrée au pire une année sur 2)
- Enveloppes : 1 chance sur 5 (meilleures et pires saisons)
- Lignes horizontales en pointillé : Q20 de la période de référence 1986- 2015

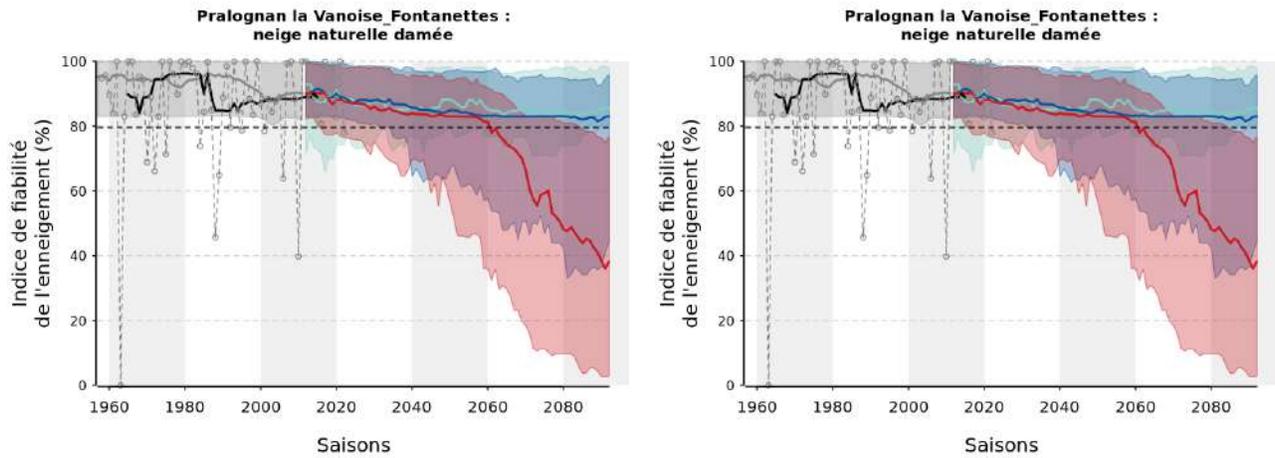


Figure 35 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement en neige naturelle damée (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

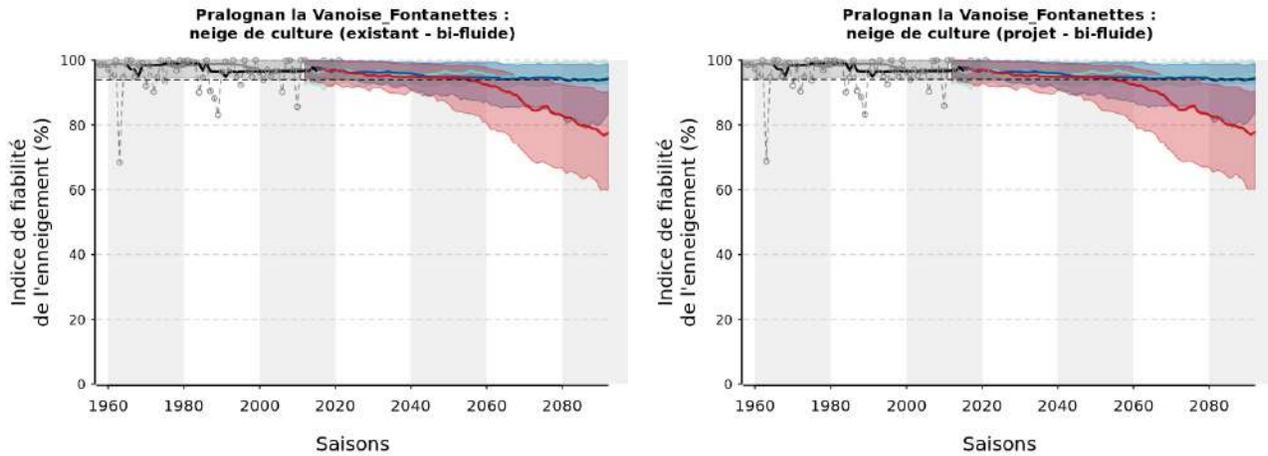


Figure 36 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement avec les équipements de production de neige (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

3.2.3 Taux de retour des mauvaises saisons

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 mauvaises saisons 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 mauvaises conditions d'enneigement qui, dans le passé, se présentaient 1 année sur 5. De fait, la fréquence de retour des mauvaises saisons augmente quand l'indice moyen de fiabilité décroît. Il faut bien noter que la référence et la période future correspondent à la même configuration d'enneigement : par exemple, pour l'estimation de la fréquence de retour des mauvaises années en climat futur tenant compte de la production de neige, le Q20 de référence est lui aussi calculé en tenant compte de la production de neige.

3.2.4 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.

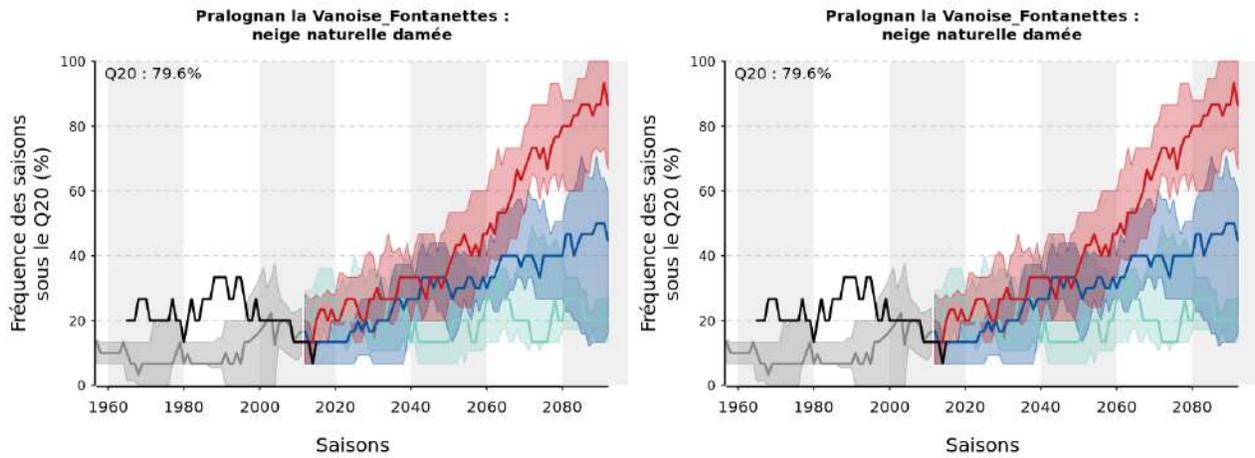


Figure 37 – Évolution du taux de retour des mauvaises saisons en neige naturelle damée (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

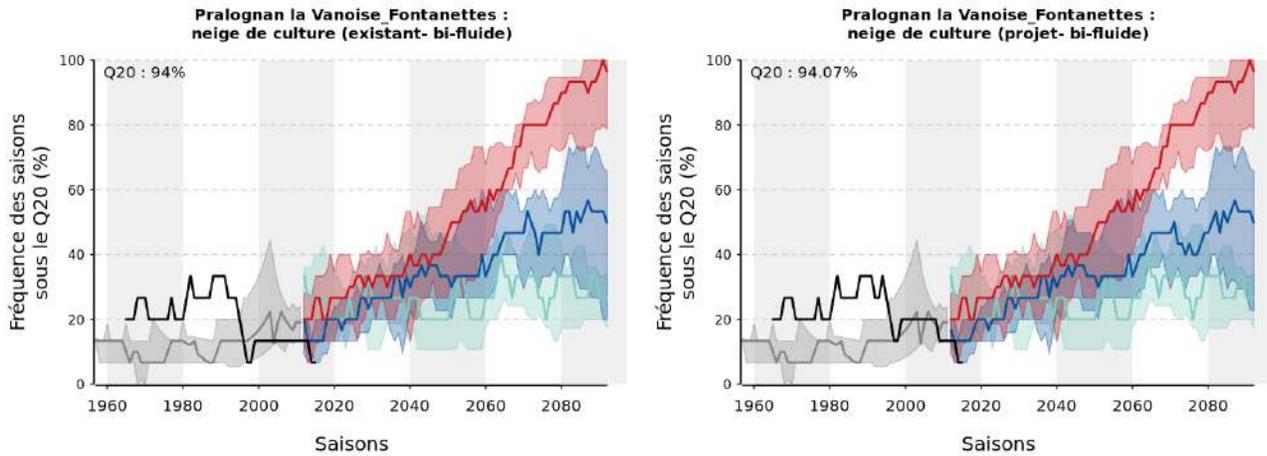


Figure 38 – Évolution du taux de retour des mauvaises saisons avec les équipements de production de neige (à gauche en considérant le domaine actuel, à droite avec la prise en compte des projets).

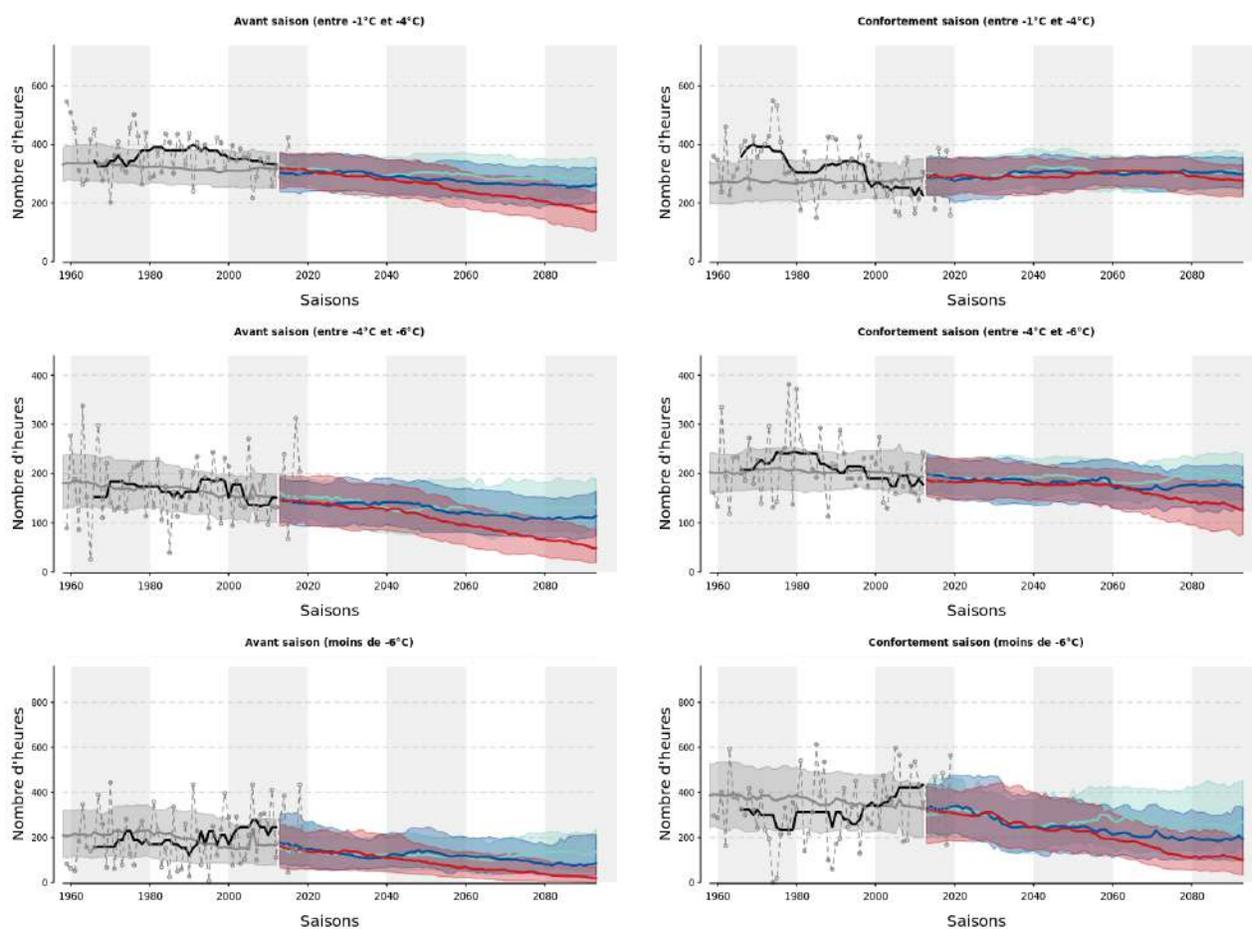


Figure 39 – Évolution du potentiel de froid à 1500 m (± 150 m), en fonction de la période de la saison (période "avant saison", du 01/11 au 20/12, et période de "confortement", du 21/12 au 31/01) et en fonction de l'intervalle de température considéré (entre -1°C et -4°C , entre -4°C et -6°C et $<-6^{\circ}\text{C}$).

3.2.5 Besoin en eau pour la production de neige de culture

Les volumes simulés de besoin en eau expriment la demande 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 maximale 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). En général, 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 mais ne permet pas de répondre au besoin de production de neige,
- 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 (ce qui n'est généralement le cas nulle part dans un climat en réchauffement),
- hyp 2 : le besoin est stable ou croissant mais le potentiel froid diminue.

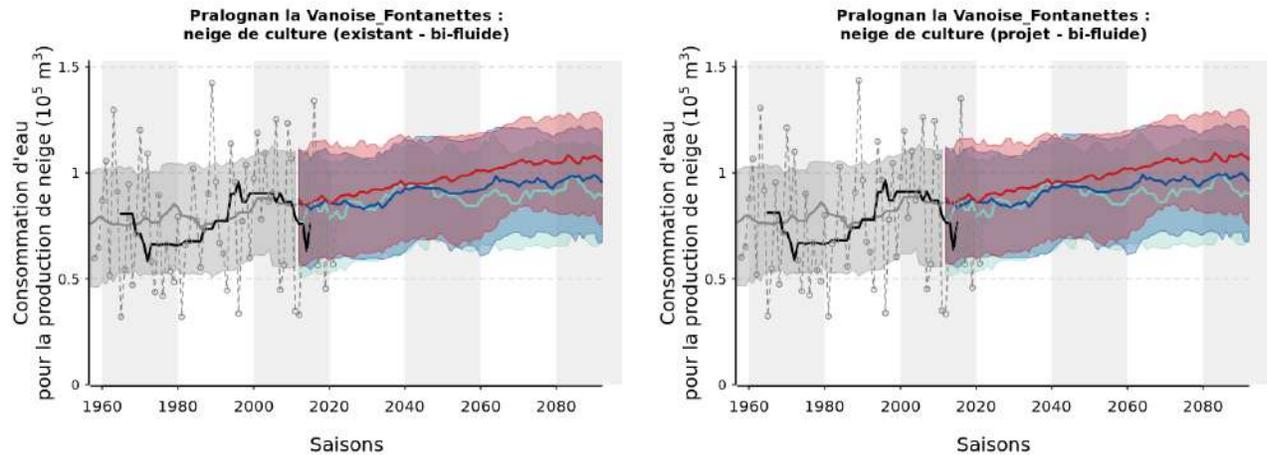


Figure 40 – Évolution de la consommation en eau pour la production de neige de culture. Le graphique de gauche correspond aux installations actuelles et celui de droite aux installations prévues dans les prochaines années. En vert sont représentées les observations de quantité d'eau utilisée pour la production de neige ces dernières années.

3.2.6 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, avec des installations de type "perches". Ces cartes 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.

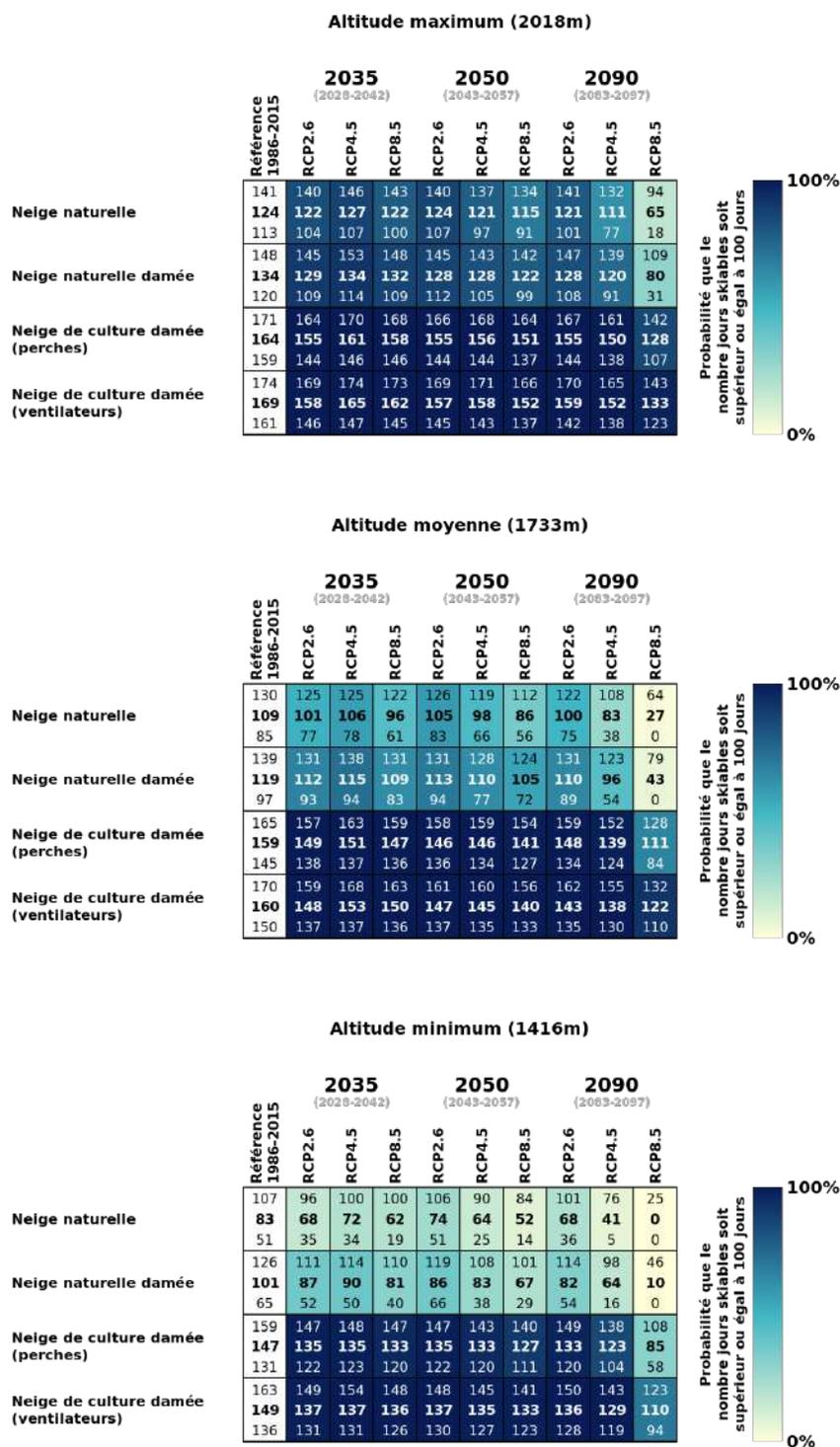


Figure 41 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible sur le domaine considéré, pour l'altitude minimum, moyenne et maximum (du bas vers le haut).

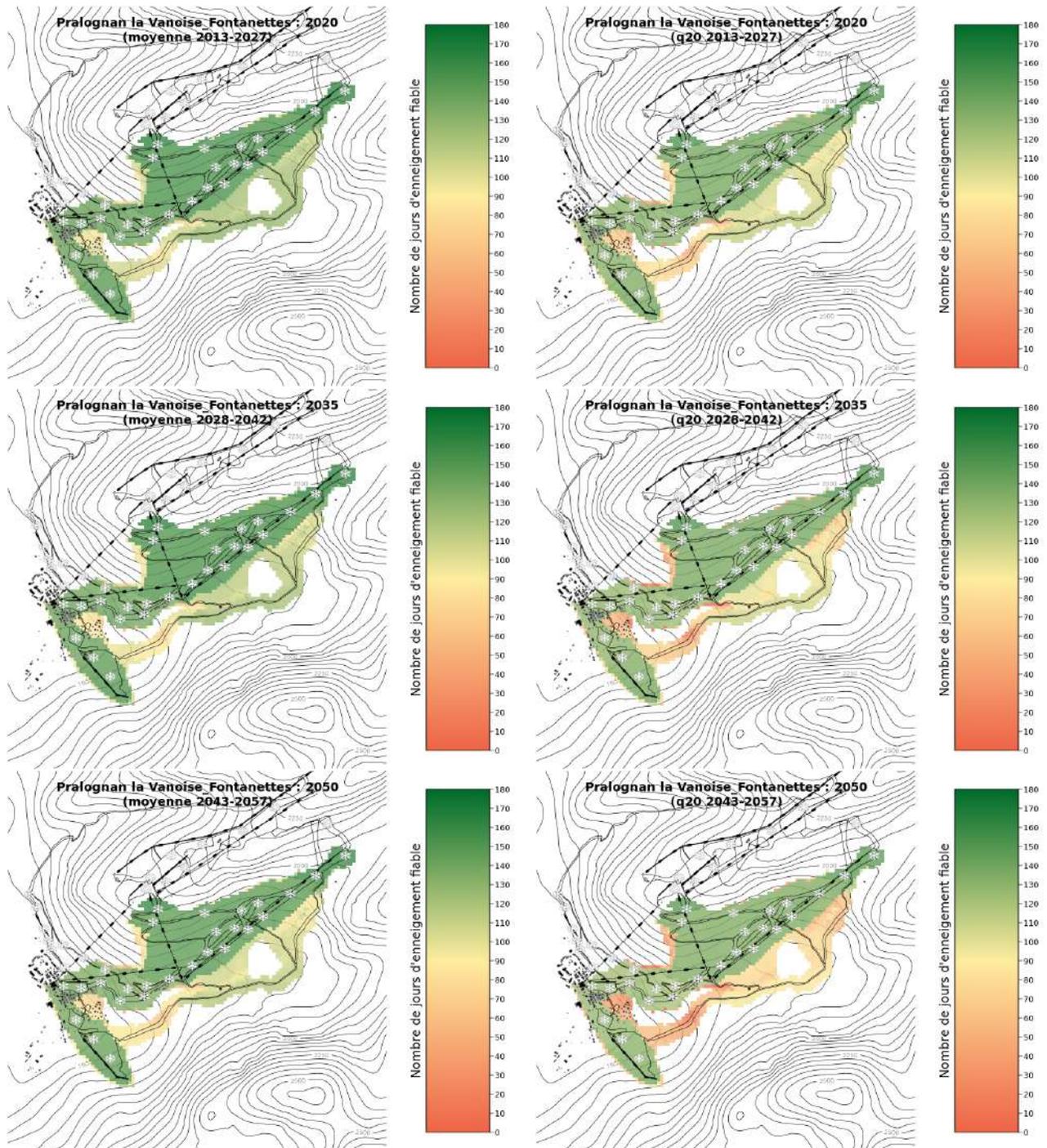


Figure 42 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP4.5 et les équipements actuels et en fonction de l’horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d’enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d’enneigement des saisons défavorables (Q20).

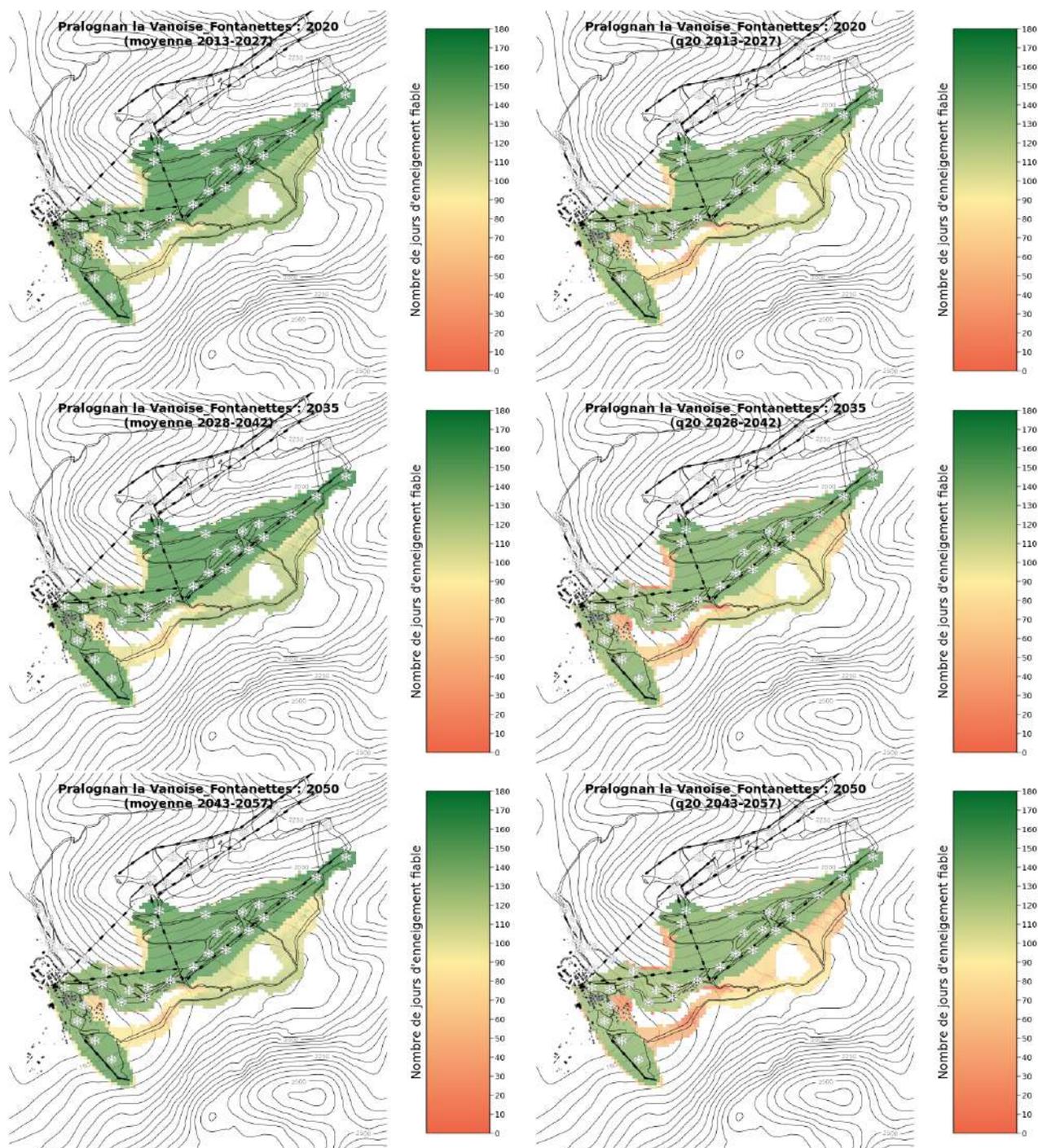


Figure 43 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP4.5 et les projets d'aménagement futurs et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons défavorables (Q20).

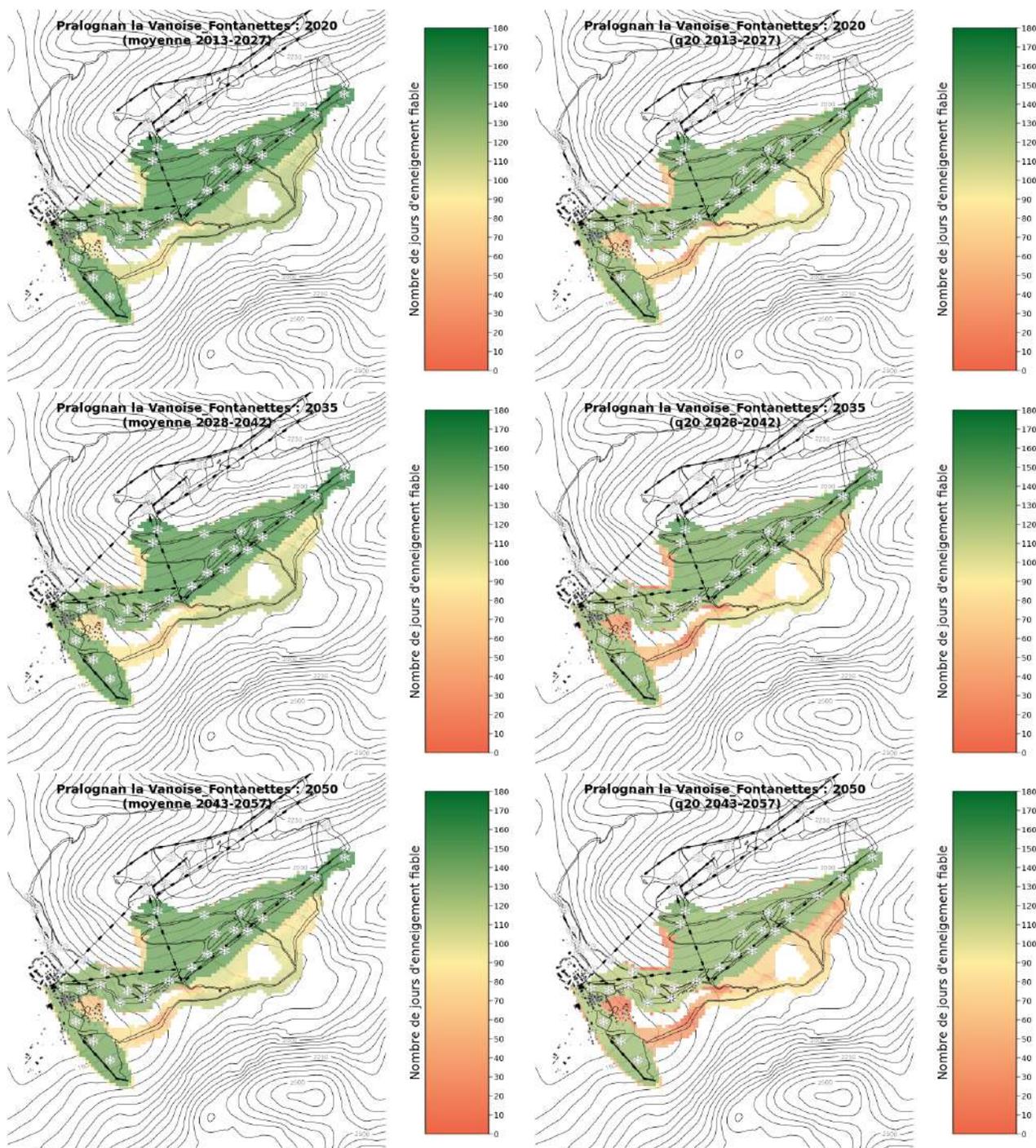


Figure 44 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP8.5 et les équipements actuels et en fonction de l’horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d’enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d’enneigement des saisons défavorables (Q20).

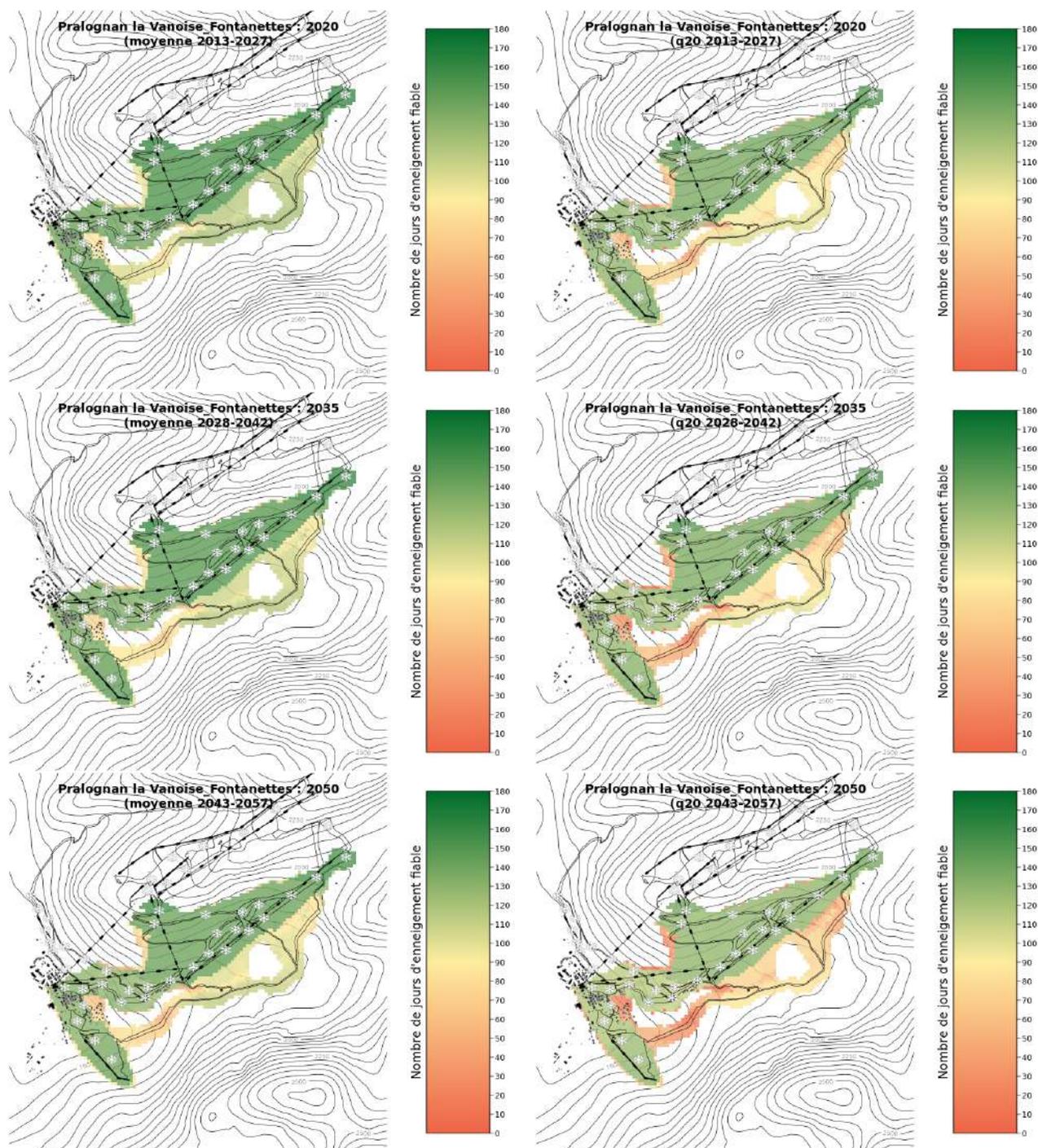


Figure 45 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP8.5 et les projets d'aménagement futurs et en fonction de l'horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d'enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d'enneigement des saisons défavorables (Q20).

4 DOMAINE DE SKI NORDIQUE DE PRALOGNAN-LA-VANOISE

4.1 PRALOGNAN-NORDIQUE

4.1.1 Caractéristiques du domaine

L'image ci-après présente l'état du domaine skiable.

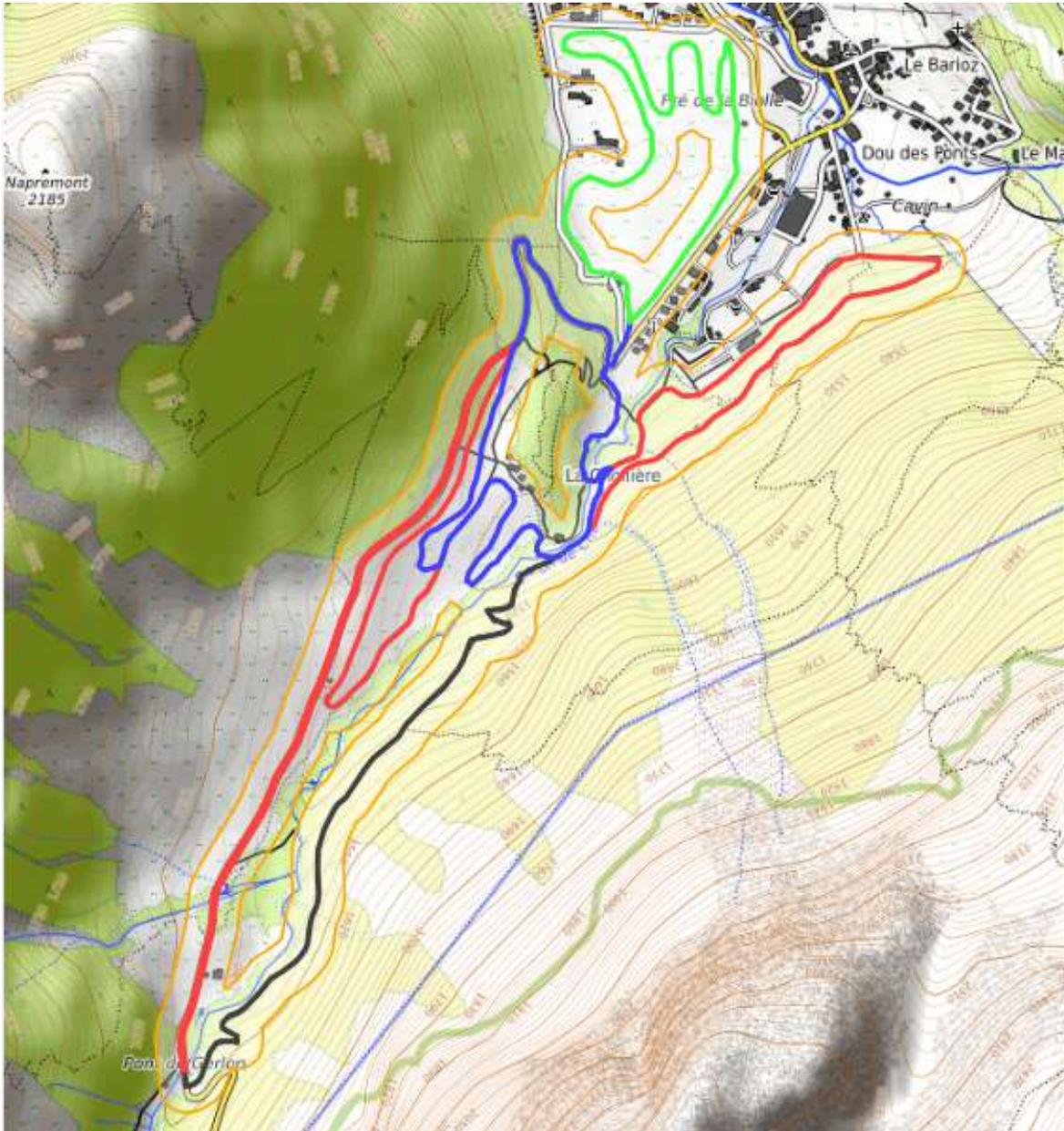


Figure 46 – Domaine nordique de Pralognan.

4.1.2 Indice de fiabilité de l'enneigement

L'indice de fiabilité de l'enneigement est calculé chaque année pour l'ensemble du domaine skiable et pour la période de plus grande fréquentation de la station (vacances d'hiver : Noël et février). 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 les périodes de forte fréquentation) 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 au plus 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 (médiane, situation caractéristique de l'enneigement rencontrée au pire une année sur 2)
- Enveloppes : 1 chance sur 5 (meilleures et pires saisons)
- Lignes horizontales en pointillé : Q20 de la période de référence 1986- 2015

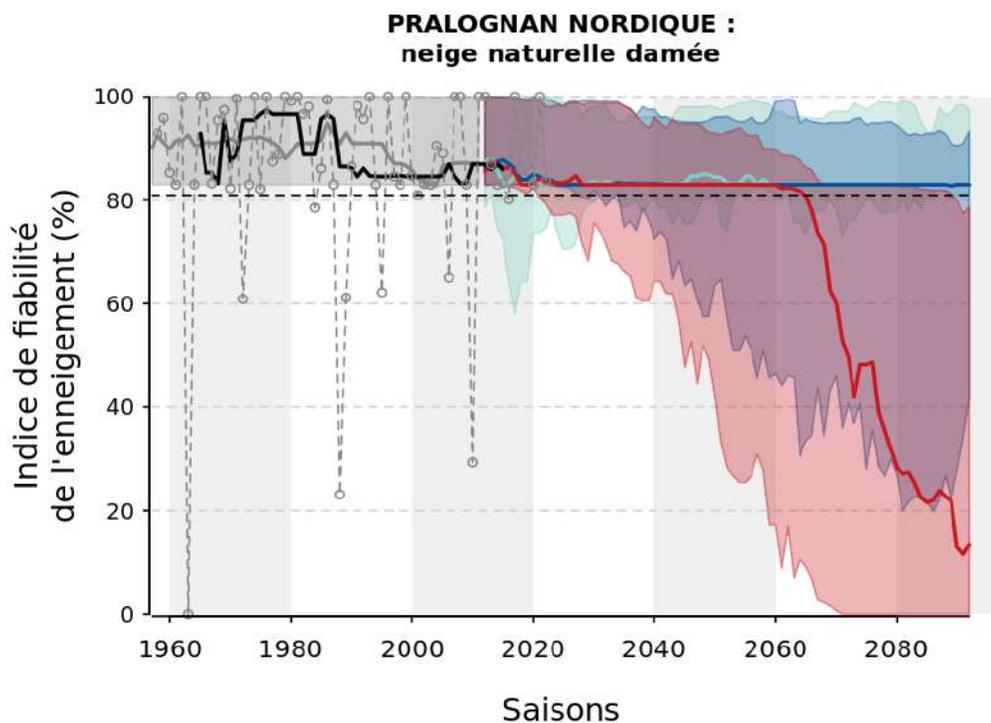


Figure 47 – Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement en neige naturelle damée, considérant le domaine actuel.

4.1.3 Taux de retour des mauvaises saisons

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 mauvaises saisons 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 mauvaises conditions d'enneigement qui, dans le passé, se présentaient 1 année sur 5. De fait, la fréquence de retour des mauvaises saisons augmente quand l'indice moyen de fiabilité décroît. Il faut bien noter que la référence et la période future correspondent à la même configuration d'enneigement : par exemple, pour l'estimation de la fréquence de retour des mauvaises années en climat futur tenant compte de la production de neige, le Q20 de référence est lui aussi calculé en tenant compte de la production de neige.

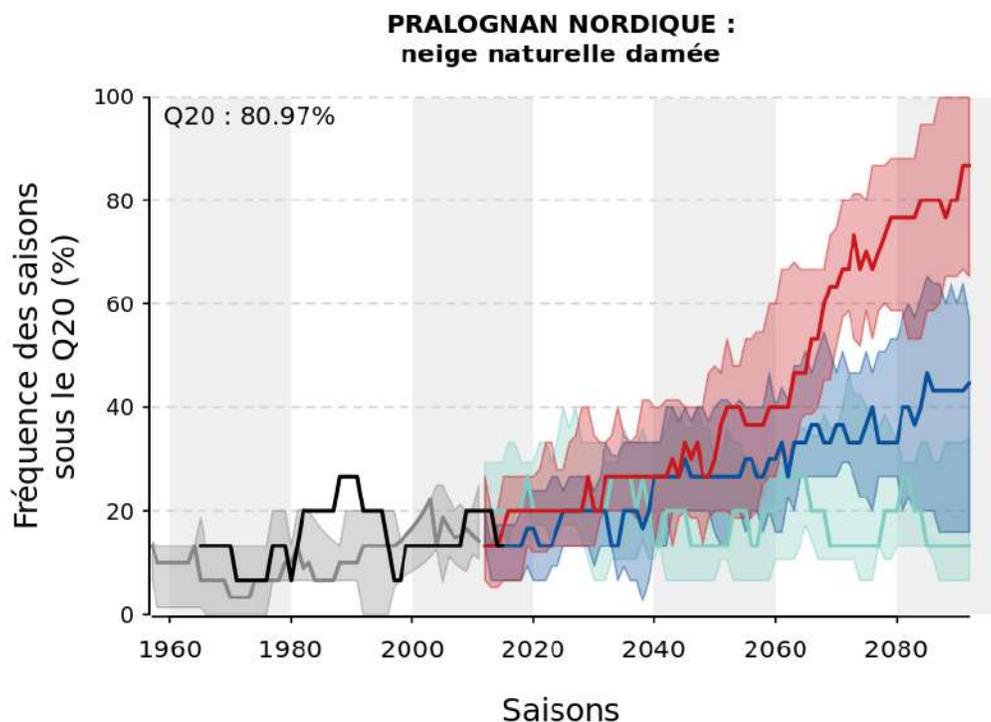


Figure 48 – Évolution du taux de retour des mauvaises saisons en neige naturelle damée, en considérant le domaine actuel.

4.1.4 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 la configuration "neige 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.

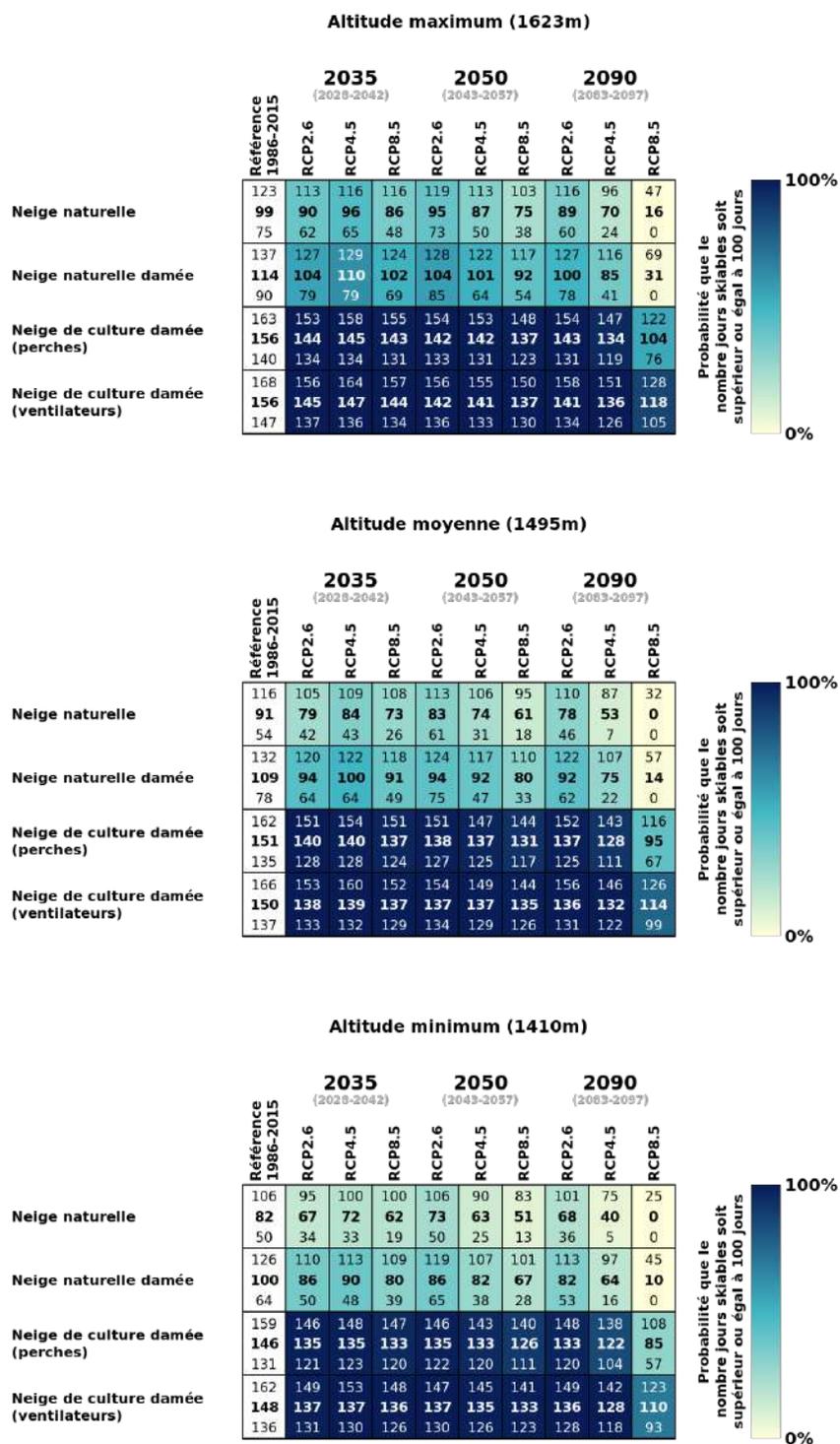


Figure 49 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible sur le domaine considéré, pour l'altitude minimum, moyenne et maximum (du bas vers le haut).

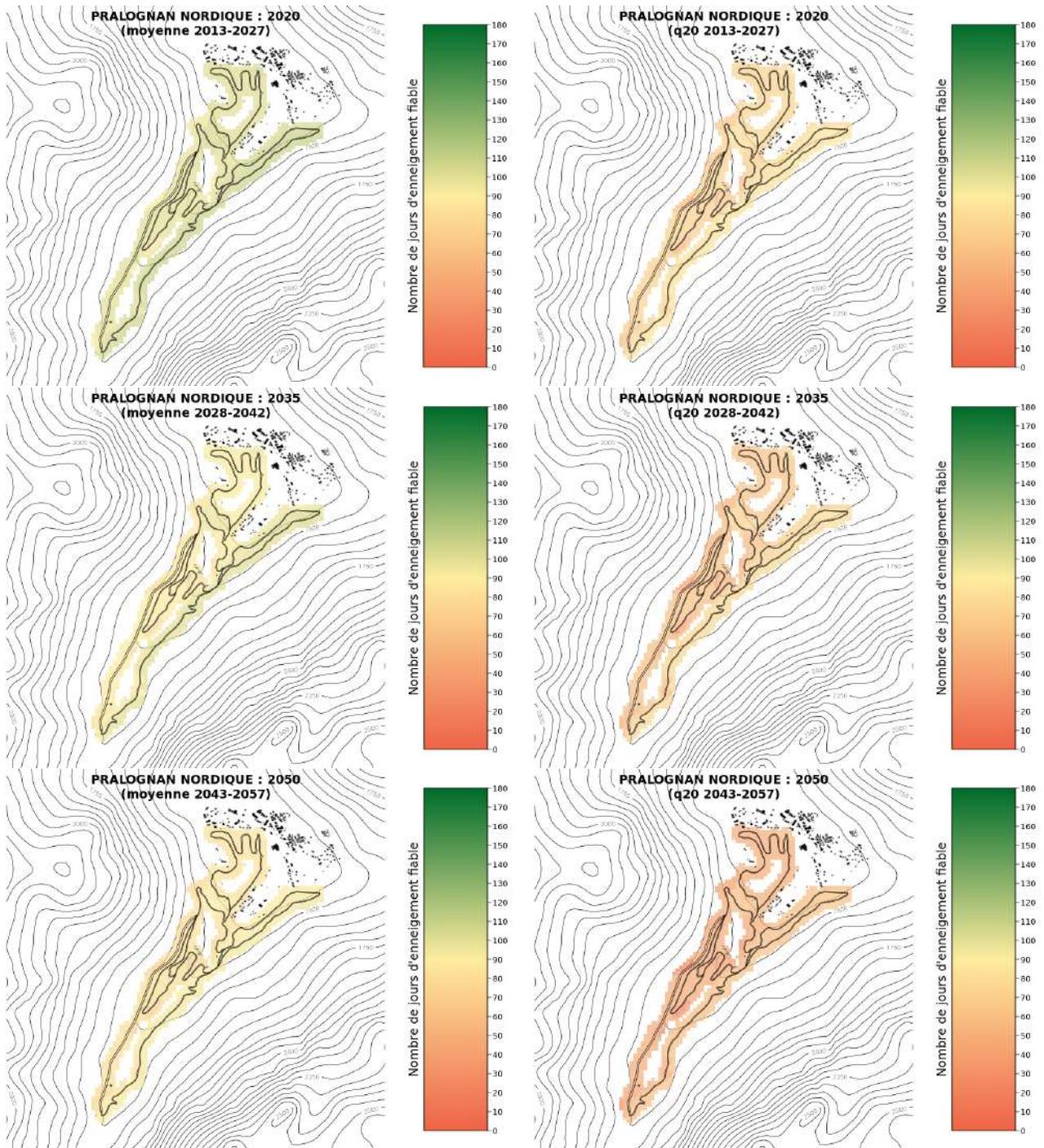


Figure 50 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP4.5 et les équipements actuels et en fonction de l’horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d’enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d’enneigement des saisons défavorables (Q20).

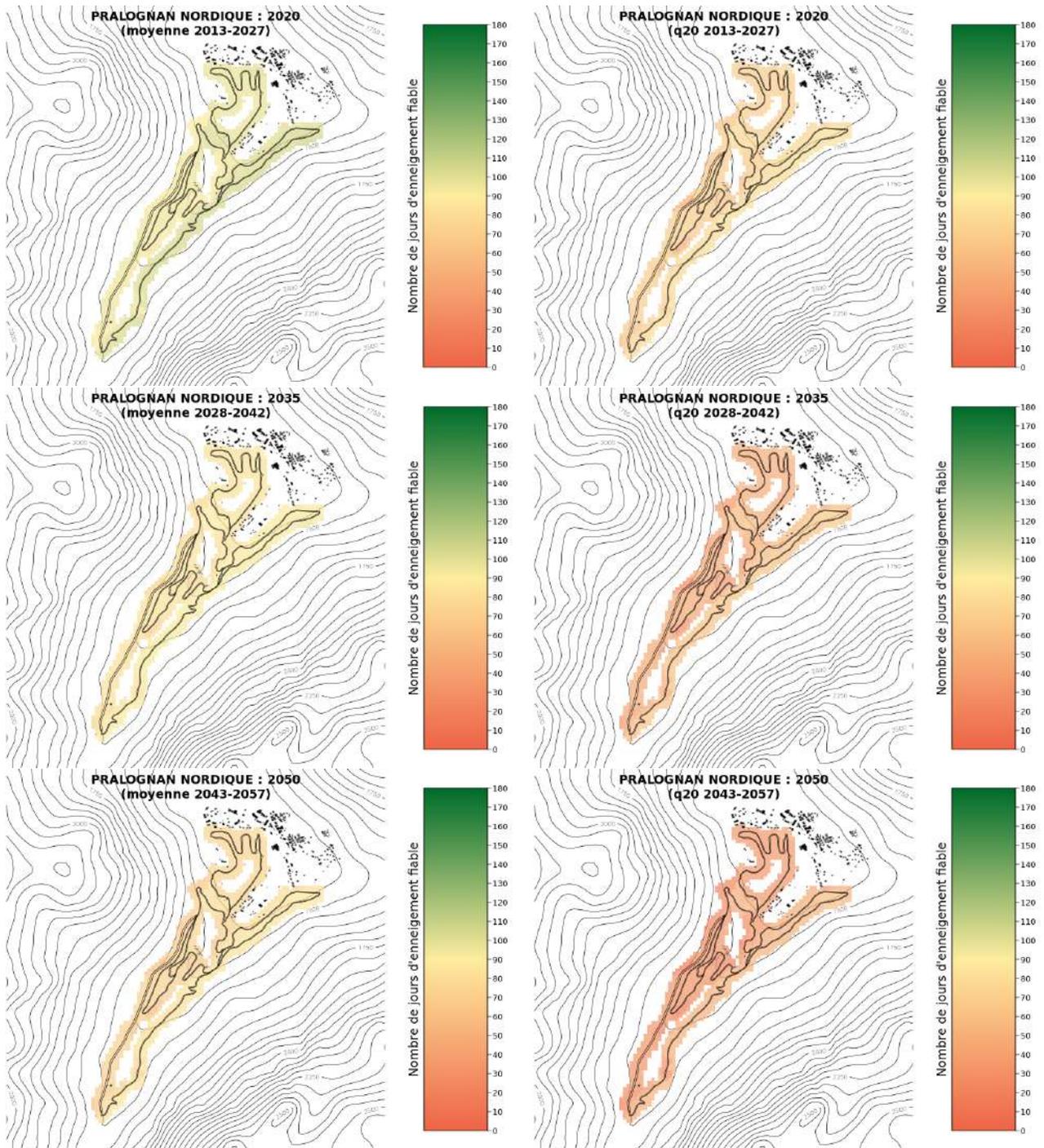


Figure 51 – Nombre de jours pendant lesquels la pratique du ski sera possible, en prenant en compte le scénario RCP8.5 et les équipements actuels et en fonction de l’horizon temporel considéré (du haut vers le bas : périodes de 15 ans centrées sur 2020, 2035, 2050). La colonne de gauche montre les conditions d’enneigement des saisons moyennes (Q50) et celle de droite les conditions d’enneigement des saisons défavorables (Q20).

5 ANALYSES

5.1 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 Pralognan-La-Vanoise, on constate que pendant la période historique (1986-2015) l'indice de fiabilité lors des saisons faiblement enneigées aurait été de 83% en prenant en compte la neige naturelle damée, 93% avec les équipements actuels de production de neige et toujours 93% avec l'intégration des projets. 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 légère baisse dans les prochaines décennies. A partir de 2045 environ, 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 50% en 2050 (neige naturelle damée, scénario RCP8.5). C'est à dire que les « mauvaises » saisons passeront de 2 années sur 10 à 5 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 ou sans la prise en compte des projets.

Le tableau suivant montre les indices de fiabilité pour la station de Pralognan-La-Vanoise,

Pralognan-La-Vanoise	Indice de fiabilité de l'enneigement, en % (RCP8.5 - Q20)		
	1986-2015	2028-2042	2043-2057
Alpin (neige naturelle damée)	83	74	67
Alpin (avec neige de culture)	93	90	86
Alpin (avec neige de culture + projets)	93	90	86
Nordique	81	66	40

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

5.2 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 Pralognan-La-Vanoise, à l’horizon 2050 et en considérant le scénario RCP8.5, on peut dégager les constats suivants :

- Au point culminant du domaine (2349 mètres), les durées d’enneigement en neige naturelle damée seront de 114 jours lors des saisons défavorables, 139 jours lors des saisons moyennes et jusqu’à 155 jours lors des saisons favorables. Pendant la période historique, ces valeurs étaient égales à 132, 148 et 162 jours, respectivement. 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 seraient comprises entre 145 jours lors des saisons défavorables et 170 jours lors des saisons favorables.
- A l’altitude moyenne du domaine (1859 mètres), les durées d’enneigement en neige naturelle damée seront 86 jours lors des saisons défavorables, 114 jours lors des saisons moyennes et jusqu’à 134 jours lors des saisons favorables. Pendant la période historique, ces valeurs étaient égales à 111, 128 et 140 jours, respectivement. 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 seraient comprises entre 132 jours lors des saisons défavorables et 158 jours lors des saisons favorables.
- A l’altitude minimum du domaine (1407 mètres), les durées d’enneigement en neige naturelle damée seront de 27 jours lors des saisons défavorables, 66 jours lors des saisons moyennes et jusqu’à 100 jours lors des saisons favorables. Pendant la période historique, ces valeurs étaient égales à 64, 100 et 125 jours, respectivement. 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 seraient comprises entre 111 jours lors des saisons défavorables et 139 jours lors des saisons favorables.

5.3 La production de neige de culture

A Pralognan-La-Vanoise, 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 la baisse progressive de l’enneigement 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 dans les prochaines décennies une augmentation légère et graduelle, suivie par une stabilisation à partir de 2070 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.

5.4 Conclusion

Globalement, les résultats de ClimSnow montrent qu'à Pralognan-La-Vanoise les conditions d'enneigement se dégraderont dans les prochaines décennies, avec des saisons défavorables plus fréquentes et des conditions d'exploitation plus difficiles. Malgré cette baisse attendue de l'enneigement naturel, le damage des pistes (augmentant la durée d'enneigement) et l'apport de la neige de culture (qui reste globalement productible dans les prochaines décennies) permettront d'atténuer l'impact du changement climatique à l'horizon 2050. Les zones basses vont tout de même se fragiliser plus rapidement que le reste du domaine et leur viabilité pourra être garantie quasi uniquement grâce à la production de neige lors des saisons défavorables. Dans ce contexte, 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.