

Enneigement des massifs montagneux et stations de sports d'hiver dans une France à +2,7 et +4 °C

Hugues François^{1*}, Raphaëlle Samacoïts², Carlo Carmagnola^{3,4},
Jean-Michel Soubeyroux², Matthieu Lafaysse⁴, Samuel Morin^{4,5}

1. Université Grenoble Alpes, Inrae Auvergne-Rhône-Alpes Lyon-Grenoble, Lessem, Grenoble

2. Direction de la climatologie et des services climatiques, Météo-France, Toulouse

3. Abest Horizons, Meylan

4. CNRM, Centre d'études de la neige, Météo-France / CNRS / Université Grenoble Alpes / Université de Toulouse, Grenoble

5. CNRM, Météo-France / CNRS / Université de Toulouse, Toulouse

Résumé

Cet article synthétise l'évolution de l'enneigement dans les massifs montagneux français et ses conséquences pour les stations de sports d'hiver, dans le cadre de la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (Tracc), qui considère des niveaux de réchauffement national de +2,7 °C et de +4 °C, depuis la période préindustrielle, en 2050 et 2100, respectivement. Les résultats indiquent une diminution du nombre de jours avec au moins 5 cm de neige naturelle au sol, variable selon l'ensemble montagneux et l'altitude. Dans les Alpes du Nord, à 1 800 m d'altitude, la valeur médiane, de l'ordre de 5,5 mois pour la période 1976-2005, baisse de 1 mois à +2,7 °C et de 2 mois à +4 °C. Sans production de neige, la proportion de stations avec risque de faible enneigement très élevé est de 90 % à +2,7 °C, et de 100 % à +4 °C. Ces valeurs sont ramenées à 10 % et 86 % si 45 % des pistes sont couvertes par la production de neige, avec une hausse de la demande en eau de 50 à 70 % par rapport à la période 1976-2005 avec 30 % des pistes couvertes. L'étude montre de grandes différences d'évolution de l'enneigement d'une station à l'autre, ainsi que de l'efficacité et des limites de la production de neige.

Abstract – Snow cover in mountains and winter sports resorts in a France at +2.7 and +4 °C

This article summarizes the evolution of snow cover in French mountain ranges, and its consequences for ski resorts, within the framework of the French reference trajectory for adaptation, of +2.7°C and +4°C, since the pre-industrial period, in 2050 and 2100, respectively. The results show a reduction in the number of days with at least 5 cm of natural snow on the ground, varying according to mountain range and altitude. In the Northern Alps, at 1800 m elevation, the median value of around 5.5 months for the period 1976-2005 decreases by 1 month at +2.7°C and 2 months at +4°C. Without snow production, the proportion of resorts with a very high snow supply risk to ski tourism is 90% at +2.7°C, and 100% at +4°C. These values are reduced to 10% and 86% if 45% of ski pistes are covered by snowmaking facilities, with a increase in water demand for snowmaking from +50% to +70% compared to the 1976-2005 period with 30% of ski pistes covered. The study shows major differences in trends in snow conditions from one resort to another, as well as in terms of the efficiency and limits of snowmaking.



Station de La Plagne, le 28 novembre 2020.
Photo : Lucas Bérard-Chenu.

*hugues.francois@inrae.fr

Le changement climatique, en particulier le réchauffement passé et à venir, influence fortement les conditions d'enneigement des massifs montagneux français. Ceci a des conséquences notamment pour les écosystèmes locaux, le cycle de l'eau, les risques naturels liés à la neige et les conditions d'exploitation des domaines skiables [1, 2]. L'évolution future du climat en zones de montagne est abordée traditionnellement par descente d'échelle et ajustement de projections climatiques planétaires, selon divers scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Ces dernières années, des analyses des risques climatiques par niveau de réchauffement planétaire, plutôt que par scénario et échéance,

ont émergé en particulier dans les rapports du Giec [3]. Le niveau de réchauffement peut également être appréhendé à l'échelle régionale. Ces approches permettent l'usage combiné de plusieurs générations de modèles de climat, en les associant aux niveaux de réchauffement d'intérêt. Afin de fournir des informations les plus claires et compréhensibles possible en appui aux démarches d'adaptation au changement climatique en France et dans le cadre du futur 3^e plan national d'adaptation au changement climatique (Pnacc3), une trajectoire de référence de réchauffement pour l'adaptation au changement climatique (Tracc) a été élaborée, retenant comme trajectoire centrale un réchauffement sur le

territoire hexagonal de +2 °C, +2,7 °C et +4 °C aux échéances respectives de 2030, 2050 et 2100 par rapport à la période préindustrielle (1850-1900). Ceci correspond à la traduction moyenne de niveaux de réchauffement planétaires de +1,5 °C, +2 °C et +3 °C environ par rapport à 1850-1900, correspondant grossièrement au respect des engagements actuels de décarbonation annoncés par les États membres de la convention cadre des Nations unies sur le changement climatique (Cnucc) dans le cadre de l'Accord de Paris (2015) [4].

Parmi les activités météo-dépendantes les plus directement concernées par ces enjeux d'adaptation, les stations de sports d'hiver sont particulièrement sensibles au régime climatique dans lequel se déploie leur activité. Pour cette activité touristique qui se distingue des autres par son intensité capitalistique [5], composer avec la variabilité naturelle de l'enneigement est en soi une gageure. Le risque de faible enneigement [1] constitue une clef de lecture majeure de la compatibilité entre la continuité des activités des stations et le régime climatique. Par le passé, la filière des sports d'hiver a apporté des réponses techniques en développant les outils et méthodes de gestion de l'enneigement et de préparation des pistes au sein des domaines skiables. La production de neige est désormais considérée comme une pratique ordinaire en stations de sports d'hiver [6] permettant de réduire l'effet de la variabilité naturelle de l'enneigement. Bien que ce ne soit pas le but dans lequel elle a été conçue, cette technologie constitue désormais un élément central de la réponse au changement climatique et devient un facteur structurant des stratégies d'adaptation. Où et jusqu'à quand est-il pertinent de privilégier cette option ou d'en explorer d'autres ? Il s'agit d'une question cruciale pour les acteurs en charge du développement des stations appelant une meilleure compréhension des dynamiques de l'enneigement face au réchauffement. En effet, le recours à la production de neige peut également contribuer à des formes de maladaptation [1, 7], d'une part en confortant le secteur touristique, fortement émetteur de gaz à effet de serre principalement du fait du transport, et d'autre part en s'inscrivant dans une dépendance au sentier des modes de développement économique de ces territoires [5] mobilisant les actifs et les acteurs locaux pour une activité dont il devient alors de plus en plus difficile de dégager des moyens d'action pour contribuer à leur transition.

Les études antérieures ont montré à la fois la contribution potentielle de la production de neige et les limites de cette stratégie d'adaptation, notamment en fonction des stations et de l'intensité du réchauffement climatique, dans les massifs français [8]. Ces résultats ont été généralisés à l'échelle européenne [1] en mobilisant un cadre renouvelé d'analyse du risque de faible enneigement fondé sur le niveau de réchauffement planétaire. La présente étude caractérise l'évolution de l'enneigement, qu'il soit naturel ou géré, dans les massifs montagneux français, en fonction du niveau de réchauffement du territoire national [4].

Méthodes et données

Réanalyses et simulations de l'enneigement

Cette étude se fonde sur l'utilisation de deux réanalyses des conditions météorologiques de surface utilisées en France hexagonale :

- Safran [9], couvrant les Alpes, les Pyrénées et la Corse ;
- Safran-France [10], qui correspond à l'extension sur l'ensemble du territoire national de Safran initialement déployé dans les massifs montagneux.

Safran fournit une estimation des conditions météorologiques au pas de temps horaire, par tranche d'altitudes de 300 mètres, au sein de zones jugées climatologiquement homogènes, en combinant une ébauche provenant de prévisions météorologiques et de climatologies, avec des observations *in situ* et des radiosondages. Dans le cas de Safran, il s'agit de « massifs », alors que dans Safran-France, il s'agit de « zones Symposium ». En effet, en général, les données Safran-France sont exploitées sur une grille régulière d'une résolution de 8 km, mais la donnée primaire est générée au sein de ces « zones Symposium ». Les données Safran sont utilisées comme référence pour l'ajustement par la méthode Adamont [11] de projections climatiques régionales (modèles climatiques régionaux, RCM, de l'ensemble Euro-Cordex, utilisés en descente d'échelle des modèles de climat planétaires, GCM, de l'ensemble CMIP5). Les données atmosphériques Safran ainsi que celles issues des projections climatiques alimentent le modèle de manteau neigeux Crocus, avec ou sans prise en compte de la gestion de la neige (damage et production de neige), ce qui permet de simuler

l'évolution du manteau neigeux en climats passé (réanalyses et simulations climatiques historiques) et futur. Dans le cas où la production de neige est simulée par Crocus, le modèle calcule la demande en eau annuelle mobilisée pour la production de neige [8]. La figure 1 présente une cartographie des massifs et zones Symposium pris en compte pour ces études, couvrant les ensembles montagneux des Alpes du Nord, Alpes du Sud, Pyrénées françaises, Jura, Massif Central, Vosges et Corse. Les cartes b et c de la figure 1 illustrent la valeur médiane du nombre de jours où l'épaisseur de neige dépasse 5 cm à 1 200 m et 1 800 m d'altitude sur terrain plat et horizontal, de novembre à avril inclus, pour l'ensemble de ces zones et pour la période de référence 1976-2005 utilisée dans le cadre de cette étude. Les agrégations à l'échelle de massifs montagneux combinant plusieurs massifs ou zones Symposium sont des moyennes pondérées par la surface de ces massifs au niveau d'altitude retenu (± 150 m d'altitude). Cette figure illustre les grands traits de la climatologie de l'enneigement des ensembles montagneux français, avec un enneigement médian plus substantiel, à altitude donnée, dans les massifs de moyenne montagne et les Alpes du Nord que dans les Alpes du Sud et les Pyrénées.

Approche méthodologique par niveau de réchauffement en France selon la Tracc

Afin de disposer de résultats par niveau de réchauffement sur la France, les projections climatiques et leurs déclinaisons en matière d'enneigement simulé ont été traitées comme suit. Pour chacun des 10 couples GCM/RCM utilisés (inclus dans l'ensemble des simulations utilisées par le projet Explore2, en appui du jeu Tracc-2023 mis à disposition sur le portail Drias, parmi lesquelles des simulations d'enneigement utilisant le modèle Crocus sont disponibles), est estimée la première période de 20 ans au cours de laquelle des niveaux de réchauffement de +2 °C, +2,7 °C et +4 °C sont atteints en moyenne nationale par rapport à la période 1850-1900. Cette moyenne nationale correspond ici à des projections résultant d'ajustements des RCM Euro-Cordex par rapport à la réanalyse Safran-France à l'échelle de l'ensemble du territoire hexagonal et de la Corse [12]. Les données d'enneigement sont donc sélectionnées pour chaque couple GCM/RCM et chaque

niveau de réchauffement pour la période de 20 ans ainsi identifiée, et des traitements de données sont appliqués aux indicateurs annuels d'enneigement. Le nombre de jours où la quantité de neige dépasse un certain seuil est calculé avec des critères différents selon qu'on s'intéresse à l'évolution de l'enneigement naturel (hauteur de neige au sol d'au moins 5 cm) ou de la neige sur piste (équivalent en eau d'au moins 100 kg m^{-2} noté SWE). Pour chacune des séries de données obtenues, nous calculons des valeurs caractéristiques, la médiane et les 20^e et 80^e centiles sur la base des 20 valeurs annuelles pour chaque GCM/RCM et chaque niveau de réchauffement. Des statistiques multi-modèles sont ensuite calculées, plus particulièrement la médiane des valeurs de centiles 20, 50 et 80 obtenues précédemment pour chacun des 10 couples GCM/RCM pour chaque niveau de réchauffement. Cette approche permet de s'affranchir de l'effet des différences de dynamique spatio-temporelle de réchauffement entre les simulations climatiques planétaires et régionales existantes [12]. *De facto*, cette méthode réduit fortement l'effet de la variabilité interne du climat, tant au niveau planétaire que régional, ainsi qu'une partie de l'incertitude de modélisation, y compris celle portant sur la réponse des modèles aux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Cette approche conduit à simplifier la présentation et la quantification des changements d'enneigement par niveau de réchauffement, facilitant ainsi l'identification des principaux enjeux d'adaptation, sans nier qu'une partie des incertitudes et sources de variabilité sont masquées dans les résultats communiqués.

Représentation des domaines skiables

Les principales caractéristiques des domaines skiables français sont recensées au sein de la base de données (BD) Stations. Son fondement est la présence de remontées mécaniques sur le territoire des communes, entraînant l'obligation de gestion du service public instituée par la loi Montagne du 9 janvier 1985. Plusieurs modalités de gestion, directe ou déléguée, découlent de cette obligation pour l'organisation de l'exploitation de ces appareils qui articule la structuration des collectivités locales et l'exploitant du domaine skiable. Plusieurs combinaisons peuvent découler de ce cadre légal, selon les modalités d'organisation des collectivités (soit

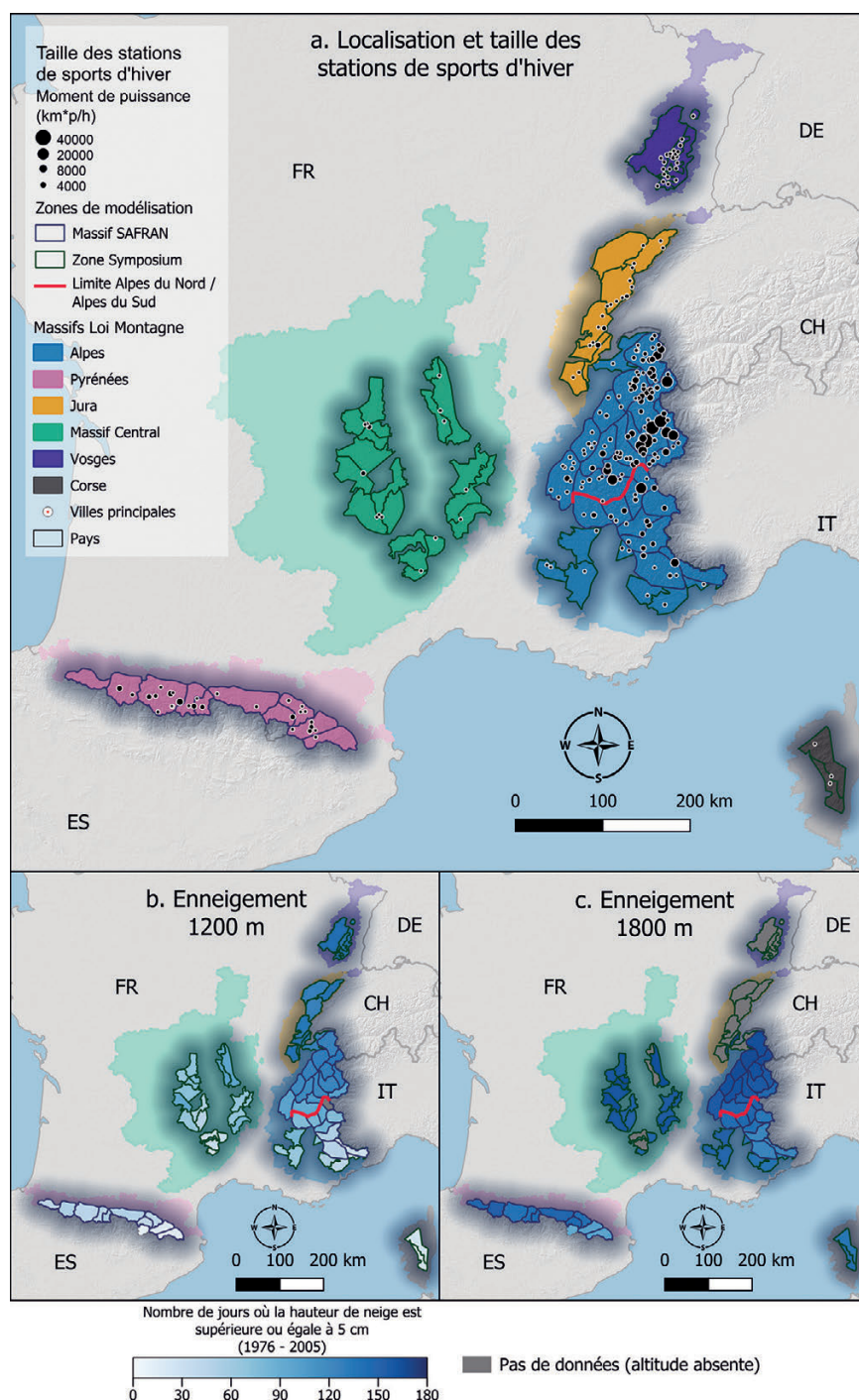


Figure 1. Localisation des zones considérées pour cette étude : (a) localisation et taille des stations de sports d'hiver ; médiane du nombre de jours par saison hivernale (novembre à avril compris) durant lesquels la hauteur de neige au sol est d'au moins 5 cm pour la période de référence 1976-2005 aux altitudes (b) 1 200 m et (c) 1 800 m, sur la base de simulations Safran-Crocus en neige naturelle.

indépendamment, soit en se regroupant en EPCI ou syndicat mixte) et les modalités de gestion choisies (soit en assumant la gestion directement, soit en la déléguant à un ou plusieurs exploitants de droit privé, y compris avec un statut parapublic). Pour la présente étude, nous retenons ce dernier échelon d'analyse et le regroupement de remontées mécaniques exploitées par une même entité, l'unité de gestion, tous statuts confondus. C'est à cette échelle que nous caractérisons les domaines skiables en articulant des données attributaires

(taille du parc de remontées mécaniques, altitudes caractéristiques) et une information spatiale originale prenant la forme d'enveloppes gravitaires. Ces dernières résultent d'une modélisation spatiale croisant les linéaires représentant les remontées mécaniques dans la BD Topo (IGN) avec le modèle numérique de terrain (IGN BD Alti à une résolution de 25 m) de manière à sélectionner l'ensemble des pixels qui permettent de rejoindre, par gravité, le bas d'un appareil dans la station depuis leur sommet [13]. Cette approche permet de prendre

en compte l'hétérogénéité interne des domaines skiables et l'organisation du parc de remontées mécaniques, notamment en tenant compte de la répartition altitudinale du moment de puissance (MP, unité conventionnelle de mesure de la contribution d'un appareil au fonctionnement d'un domaine skiable tenant compte à la fois de son débit et du dénivelé parcouru, exprimée en personne km h⁻¹) tout en couvrant un grand nombre de stations recensées dans la BD Stations. Ce sont ainsi 226 domaines skiables de tailles variables répartis sur cinq ensembles montagneux, à l'exclusion de la Corse très faiblement dotée (trois stations), qui sont pris en compte pour cette étude (tableau 1).

Évolution de l'enneigement naturel dans les ensembles montagneux français selon la Tracc

Dans une France à +4 °C en moyenne annuelle à l'horizon 2100 par rapport à la période préindustrielle, le changement médian calculé de température hivernale (décembre-janvier-février) par rapport à 1976-2005, tous massifs de montagne confondus, est de +3,4 °C à 1 200 m d'altitude et de +3,7 °C à 1 800 m. Pour l'été (juin-juillet-août), ce changement est de +4,7 °C à 1 200 m et de +4,9 °C à 1 800 m. Par rapport à 1976-2005, le changement au niveau national est de +3 °C pour l'hiver et de +4 °C pour l'été, traduisant le fait que le réchauffement futur attendu est plus fort en été qu'en hiver au niveau national [4]. Ceci confirme que le réchauffement attendu en montagne est plus marqué que la moyenne nationale, de l'ordre de +0,4 à +0,7 °C en hiver et de +0,7 à +0,9 °C en été, soit un surcroît de réchauffement de l'ordre de 10 à 20 % selon les saisons et l'altitude.

La figure 2 présente une synthèse par ensemble montagneux de l'enneigement naturel, en fonction du niveau de réchauffement national, pour plusieurs altitudes représentatives des différences d'enneigement dans les ensembles montagneux. Pour la période 1976-2005, les figures indiquent la bonne adéquation entre la réanalyse Safran et l'ensemble de projections climatiques pendant la période historique. Les résultats en projection climatique montrent la plus forte sensibilité de l'enneigement des altitudes les plus basses au réchauffement par rapport aux altitudes les plus hautes,

notamment à 2 400 m, à laquelle la diminution de l'enneigement est moins marquée. L'effet combiné de l'altitude et de la latitude apparaît tout particulièrement aux altitudes de 1 800 m et 1 200 m. Sur la période de référence 1976-2005, les ensembles montagneux de moyenne montagne les plus au nord, Jura et Vosges, présentent un enneigement comparable, à 1 200 m d'altitude (valeurs médianes respectives de 132 et 136 jours d'enneigement, soit environ 4 mois et demi à 5 mois), avec l'enneigement à 1 800 m dans les Alpes du Sud et les Pyrénées (132 jours dans les deux cas). Ces ensembles montagneux de moyenne montagne voient leur enneigement diminuer drastiquement dans un climat plus chaud, avec un nombre de jours de respectivement 78 (-61, soit 2 mois) et 112 (-62) à +2,7 °C, puis 46 (-86, soit près de 3 mois) et 56 (-80) à +4 °C pour le Jura et les Vosges, respectivement. Au contraire, le Massif Central, plus au sud, connaît un enneigement inférieur à l'ensemble des massifs montagneux dès la période de référence, à altitude égale (médiane de 65 jours). Les ensembles montagneux présentant les altitudes les plus hautes connaissent des évolutions différenciées, ceux les plus au sud montrant une diminution de leur enneigement plus marquée, par exemple à 1 800 m, de 132 à 83 et 48 jours d'enneigement à +2,7 °C et +4 °C dans les Alpes du Sud ou de 132 à 77 et 41 jours dans les Pyrénées, par rapport aux Alpes du Nord qui passent de 158 à 132 et 100 jours d'enneigement à +2,7 °C et +4 °C.

Les niveaux d'enneigement naturel calculés à l'altitude moyenne (pondérée par leur moment de puissance, c'est-à-dire la capacité d'export des remontées mécaniques) des stations dans chacun des massifs montrent de plus faibles disparités qu'à altitude fixe d'un massif

montagneux à l'autre, ce qui traduit pour la période de référence une certaine adéquation avec le choix des altitudes les plus favorables pour leur implantation. Cela apparaît plus particulièrement pour les massifs montagneux qui disposent d'une plage d'altitude plus étendue, notamment dans les Alpes du Sud, le caractère méridional ou des altitudes maximales plus faibles n'offrant pas aux autres massifs montagneux la même résistance au réchauffement.

L'analyse présentée sur la figure 2 constitue une vue d'ensemble de l'évolution de l'enneigement naturel dans les massifs montagneux français, pertinente pour de nombreuses fonctions du manteau neigeux : ressource en eau (dont couverture et alimentation des glaciers), influence sur la faune, la flore, les dimensions culturelle et esthétique. En ce qui concerne les conditions d'exploitation des domaines skiables, il est indispensable de tenir compte du damage et de la production de neige, composantes courantes des modalités de gestion de la ressource neige dans les stations [6].

Estimation du risque de faible enneigement des stations de sports d'hiver

Le rapport OCDE d'Abegg *et al.* [14] a popularisé la « règle des 100 jours » stipulant que pour être « viable » une station de sports d'hiver doit bénéficier d'un enneigement suffisant, au moins 30 cm de neige naturelle, pendant au moins 100 jours sur l'ensemble de la saison hivernale. Cette approche a depuis été reprise et affinée afin

Tableau 1. Synthèse des principales caractéristiques des stations de sports d'hiver (domaines skiables pour la pratique du ski alpin) des ensembles montagneux analysés dans cette étude (2019).

	Nombre de stations	Moment de puissance (MP) total (personne km ⁻¹)	Part du MP (%)	MP minimum (personne km ⁻¹)	MP maximum (personne km ⁻¹)	Altitude moyenne minimum (m)	Altitude moyenne maximum (m)	Altitude moyenne pondérée par le MP (m)
Alpes du Nord	107	675 755	69,14	16	39 787	984	2 501	1 903
Alpes du Sud	32	148 864	15,30	28	26 571	1 345	2 204	1 985
Pyrénées	28	100 463	10,33	14	12 822	1 438	2 292	1 844
Jura	22	18 966	1,95	26	7 245	803	1 275	1 222
Massif Central	14	17 332	1,78	39	4 950	1 135	1 545	1 462
Vosges	23	14 570	1,50	18	4 031	625	1 175	1 060
Ensemble	226	975 950	100	14	39 787	625	2 501	1 876

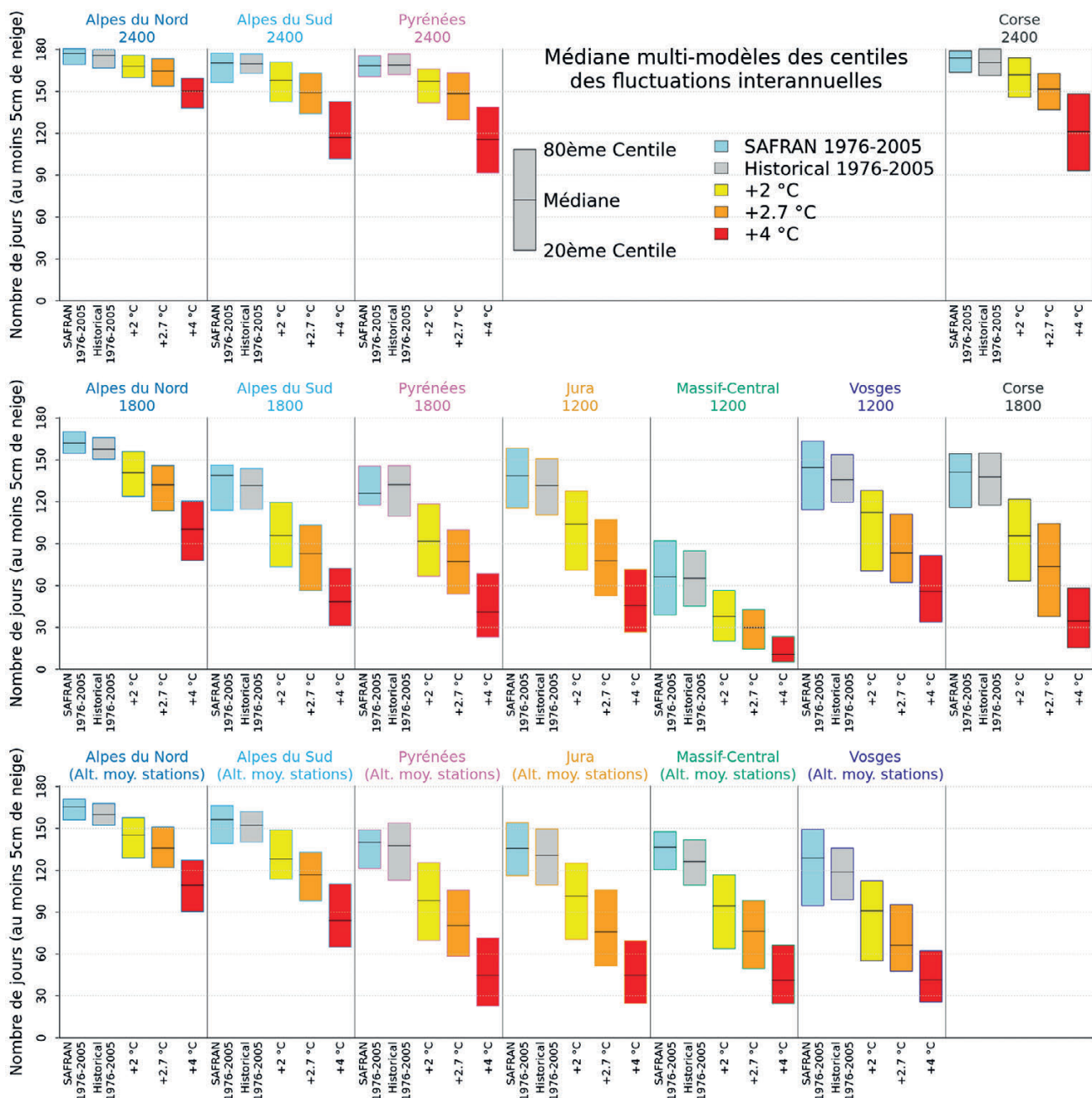


Figure 2. Synthèse par grand ensemble montagneux (Alpes du Nord, Alpes du Sud, Pyrénées françaises, Jura, Massif Central, Vosges, Corse) des caractéristiques de l'enneigement (nombre de jours pour lesquels l'épaisseur de neige dépasse 5 cm (SWE > 100 kg/m²) de novembre à avril inclus), en fonction de l'altitude (à haute altitude, 2 400 m, sur les figures du haut et, sur les figures du milieu, des altitudes inférieures à 2000 m adaptées en fonction des altitudes présentes dans chaque massif, soit 1 800 m pour les Alpes, les Pyrénées et la Corse, 1 200 m pour le Jura, le Massif Central et les Vosges). Les agrégations à l'échelle d'ensembles montagneux combinant plusieurs massifs ou zones Symposium sont des moyennes pondérées par la surface de chaque bande d'altitude (altitude considérée $\pm$ 150 m) au sein des différents massifs. Figures du bas : valeurs du nombre de jours où l'équivalent en eau de la neige dépasse 100 kg m⁻² obtenues à l'altitude moyenne des domaines skiables, pondérées par le moment de puissance cumulé dans chaque massif montagneux. Pour chaque altitude/ensemble montagneux, sont présentées des valeurs issues de la réanalyse Safran-Crocus (médiane et 20^e et 80^e centiles des valeurs annuelles de la période 1976-2005) ainsi que les simulations climatiques correspondant aux niveaux de réchauffement de la Tracc (médianes intermodèles des valeurs médianes et des 20^e et 80^e centiles des valeurs annuelles, respectivement). Par exemple, les valeurs affichées pour le 20^e centile correspondent à la valeur caractéristique en dessous de laquelle les valeurs annuelles se trouvent une année sur cinq en moyenne. La médiane correspond à la valeur dépassée en moyenne une année sur deux.

de proposer des indicateurs complémentaires permettant de caractériser le risque climatique des domaines skiables. L'altitude de fiabilité de l'enneigement [6, 14] a ainsi été étendue à la prise en compte de la gestion de la neige [15], tout en demeurant très simplificatrice dans son approche. En complément de ces approches réductrices

par la représentation limitée de la complexité topographique des domaines skiables et de l'hétérogénéité de leur enneigement, l'analyse du risque de faible enneigement par station [1, 8] propose quant à elle une approche plus fine fondée sur l'analyse de la récurrence des conditions d'exploitation défavorables en fonction du contexte climatique,

via une représentation explicite du domaine skiable et de l'emplacement des dispositifs de production de neige. Dans cette étude, nous présentons une analyse du risque de faible enneigement par station au sein des ensembles montagneux français fondée sur une représentation explicite des caractéristiques des stations.

En croisant les données définissant l'enveloppe gravitaire caractérisant un domaine skiable avec les données d'enneigement naturel damé avec ou sans prise en compte de la production de neige (cf. *supra*), il est possible de calculer un indicateur quotidien de la fraction du domaine skiable disposant d'un enneigement considéré comme suffisant (ici 100 kg m^{-2}). Ces valeurs quotidiennes sont agrégées à l'échelle annuelle en tenant compte des périodes les plus critiques pour l'activité touristique (vacances de Noël et d'hiver [8]), fournissant ainsi un indice de fiabilité de l'enneigement des stations tenant compte de leurs caractéristiques, mais adossées à des données géographiques génériques et pour des valeurs fixées du taux de couverture en équipement de production de neige. Dans la lignée d'études précédentes, en particulier à l'échelle européenne [1], nous définissons l'enneigement caractéristique d'une année peu enneigée comme le 20^e centile de cet indice de fiabilité pendant une période de référence. Cette métrique, calculée comme la médiane des percentiles 20 (noté Q20_ref) obtenus pour les dix simulations climatiques historiques couvrant la période 1976-2005, caractérise le faible enneigement en neige naturelle damée rencontré en moyenne une année sur cinq. Sur cette base, nous calculons le risque de faible enneigement comme la fréquence à laquelle l'indice de fiabilité prend une valeur égale ou inférieure à ce Q20_ref. L'enneigement est également considéré insuffisant si l'indice de fiabilité est inférieur à la proportion du domaine skiable couverte par des installations de production de neige. En effet, dans les cas où la production de neige est prise en compte, l'évaluation du risque prend en considération la capacité de la production de neige à fiabiliser l'enneigement au moins à la hauteur du taux de couverture considéré (c'est-à-dire si le taux de couverture est de 50 % de la surface des pistes, on s'attend à avoir un indice de fiabilité au moins égal à 50 % du moment de puissance de la station étudiée pour considérer que l'enneigement est satisfaisant une année donnée [1]). Par construction, en lien avec les logiques d'équipement observées, l'estimation de la localisation des parties couvertes priorise les zones basses, les plus exposées au risque de faible enneigement avant de s'étendre en remontant progressivement en altitude si le taux de couverture augmente. L'accroissement de la surface couverte peut alors permettre d'atteindre des niveaux d'indice de fiabilité supérieurs à la valeur du Q20_ref en simulant une production de neige dans les parties les

plus hautes, où les conditions de température sont plus favorables à la production et où l'enneigement naturel peut au demeurant être déjà suffisant, sans que cette évolution marginale n'apporte de réponse aux problèmes d'enneigement dans les zones plus basses. Augmenter le taux de couverture en installations de production de neige ne conduit donc pas toujours à réduire le risque de faible enneigement, en particulier si les coûts financiers et environnementaux liés à cette pratique sont pris en compte (ce qui est indirectement le cas dans notre approche, puisqu'une saison n'est qualifiée de satisfaisante que si son enneigement dépasse à la fois la valeur du Q20_ref et la proportion de surface du domaine skiable couverte par des équipements de production de neige).

La figure 3 représente les valeurs individuelles de Q20 pour les 226 stations françaises et le niveau de risque en fonction du niveau de réchauffement Tracc, avec et sans prise en compte de la production de neige, à hauteur de 45 % de surface équipée. La valeur moyenne du taux de couverture est actuellement de l'ordre de 40 %, avec de fortes variations d'une station à l'autre [5]. La figure montre que la valeur qualifiant le faible enneigement de référence (Q20_ref) est très différente d'une station à l'autre, globalement liée à l'altitude des stations, mais avec de fortes variations d'une station et d'un ensemble montagneux à l'autre. Le niveau de risque augmente en fonction du niveau de réchauffement, avec ou sans production de neige, mais de manière contrastée en fonction des situations individuelles. À +4 °C de réchauffement national, le risque est très élevé pour l'ensemble des stations françaises, c'est-à-dire que le faible enneigement de référence est rencontré au moins une année sur deux. Avec 45 % de couverture en production de neige, le tableau est contrasté à +2,7 °C de réchauffement, mais le risque est très majoritairement « très élevé » à +4 °C de réchauffement, avec une certaine hétérogénéité pour les niveaux de réchauffement intermédiaires. Ceci démontre l'intérêt d'une approche individuelle de l'évolution de l'enneigement de stations : partout plus défavorable dans un climat plus chaud, l'ampleur de cette réduction et l'effet de la production de neige demeurent dépendants du contexte local.

La figure 4 fournit une analyse agrégée à l'échelle des massifs montagneux des situations individuelles représentées sur la figure 3, au prorata de leur moment de puissance. L'utilisation des *burning embers* [3] se focalise sur la

notion de risque de faible enneigement, représentée par une palette de couleurs matérialisant le niveau de risque. Cette approche représente un risque climatique en fonction du niveau de réchauffement (ici régional), permettant de comparer différentes situations entre elles, qu'il s'agisse de contextes différents ou d'implémentations de stratégies d'adaptation. Dans le cas du risque de faible enneigement des stations de sports d'hiver, cette approche a été déployée par François *et al.* [1] sur l'ensemble des régions de montagne européennes, et elle est représentée ici en fonction du niveau de réchauffement en France (niveau de la Tracc). Sans production de neige, le risque de faible enneigement croît très fortement avec le niveau de réchauffement, quel que soit l'ensemble montagneux. Il est toutefois indispensable de garder en tête que les résultats agrégés prennent en compte la taille des stations : le taux de retour des conditions défavorables est ainsi calculé indépendamment pour chaque station, puis moyenné au prorata de leur moment de puissance total. Ainsi, au niveau national, sans production de neige, 39 % du moment de puissance des domaines skiables atteint un niveau de risque de faible enneigement très élevé dès +2 °C, 90 % à +2,7 °C et 100 % à +4 °C. En considérant une couverture des pistes à hauteur de 45 % de leur surface par les équipements de production de neige, les valeurs obtenues sont de 1, 10 et 86 %, respectivement, avec une hausse de 40 à 70 %, en fonction des niveaux de réchauffement, de la demande en eau pour la production de neige par rapport à 1976-2005 avec 30 % de taux de couverture. Les Alpes du Nord représentent près de 70 % du moment de puissance total des ensembles montagneux, elles pèsent donc fortement dans la synthèse nationale. Les autres ensembles montagneux montrent des situations très contrastées. Dans les Alpes du Nord, la demande en eau augmente en fonction du niveau de réchauffement. En revanche, dans les autres ensembles montagneux, cette hausse est limitée par la diminution de la capacité de production du fait des contraintes de température sur la capacité de production. *In fine*, l'augmentation constatée à +4 °C au niveau national correspond à une hausse importante du besoin de production sans pour autant se traduire par une réduction significative du risque de faible enneigement.

Parmi les ensembles montagneux les plus méridionaux, la production de neige a des effets différents dans les Alpes du Sud et dans les Pyrénées, l'altitude de ces ensembles montagneux ne

permettant pas toujours de compenser l'effet de la latitude. À +2 °C et sans production de neige, la part du moment de puissance total des stations caractérisées par un niveau de risque de faible enneigement très élevé est de 31 et 95 % respectivement dans les Alpes du Sud et les Pyrénées. Ces valeurs sont réduites à 2 % et 1 % en prenant en compte une couverture des pistes à 45 % par les installations de production de neige. Cette limite apparaît dès que le taux de couverture en équipements de production de neige atteint 30 %, qui n'améliore que marginalement les conditions d'exploitation à partir de +2 °C. Au-delà de 30 % de couverture, les Alpes du Sud voient une diminution du risque de faible enneigement bien que le gain marginal diminue à chaque incrément et que le niveau de risque augmente de nouveau avec une couverture à 75 %. À plus basse latitude, les Pyrénées ne tirent pas les mêmes avantages de la production de neige quel que soit le taux de couverture, avec des

conséquences particulièrement marquées dans l'hypothèse d'un taux de couverture de 75 %.

Les Pyrénées, ensemble montagneux le plus méridional de l'Hexagone, illustrent particulièrement bien les effets contrastés de la production de neige. Sans production de neige, les stations y sont affectées par un fort risque de faible enneigement dès +2 °C (95 % des stations en risque très élevé à +2 °C de réchauffement national, cf. *supra*), alors que dans les Vosges et le Jura ce chiffre est de 28 et 43 % des stations, respectivement, mais alors qu'une production de neige couvrant 45 % des pistes réduit le risque très élevé à 1 % du moment de puissance des stations dans les Pyrénées, ce chiffre ne descend qu'à 11 et 7 % pour les Vosges et le Jura. Les Pyrénées présentent par ailleurs un point commun avec les ensembles montagneux de moyenne montagne en ce qui concerne l'évolution de la demande en eau en fonction du niveau de

réchauffement, qui diminue, à 30 % du domaine couvert, en fonction du niveau de réchauffement, notamment à partir de +2,7 °C, avec une baisse de 20 %, contrairement aux Alpes du Nord où la demande en eau croît avec la hausse de température (+10 % à +2,7 °C et +20 % à +4 °C). Alors que les conditions naturelles d'enneigement se dégradent, une baisse de la demande en eau n'est pas le signe d'une diminution de la demande, mais plutôt d'une moindre capacité de production (absence de créniaux de production favorables pour répondre à la demande). Ainsi, de plus grandes surfaces couvertes par les installations de production sont généralement associées à une demande en eau plus élevée, mais ce n'est pas systématique, car la production de neige est limitée par les conditions de température. En moyenne montagne, cela se traduit par une évolution très marquée du risque de faible enneigement, quelle que soit la proportion du domaine couvert, dès le premier niveau de réchauffement.

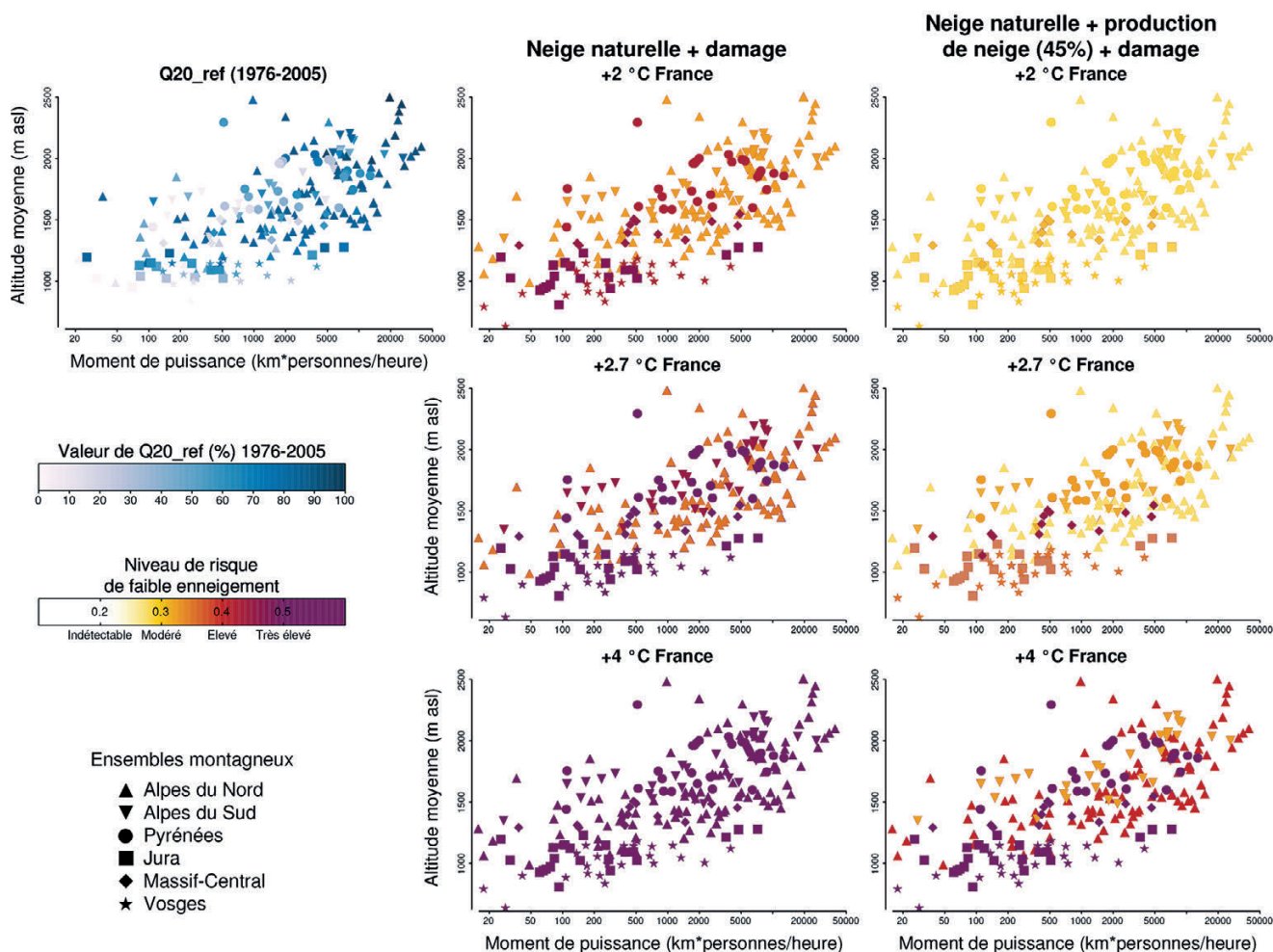


Figure 3. Illustration du risque de faible enneigement pour chacune des 226 stations françaises, basé sur leur indice d'enneigement. En haut à gauche, valeur de référence caractérisant l'enneigement des 20 % des pires saisons (Q20_ref) pour la période 1976-2005. Colonne du milieu : risque de faible enneigement (fraction des années dont l'enneigement est inférieur au Q20_ref) pour 2, 2,7 et 4 °C de réchauffement sur la France en neige naturelle damée et, colonne de droite, en tenant compte d'un taux de couverture de 45 % d'équipements de production de neige dans les stations considérées. Chaque point représente une station de ski donnée, caractérisée par son altitude (ordonnée) et son moment de puissance total (abscisse, échelle logarithmique), le symbole représentant son ensemble montagneux. Le niveau de risque caractérise la fréquence de survenue de conditions d'enneigement plus défavorables que le niveau du Q20_ref.

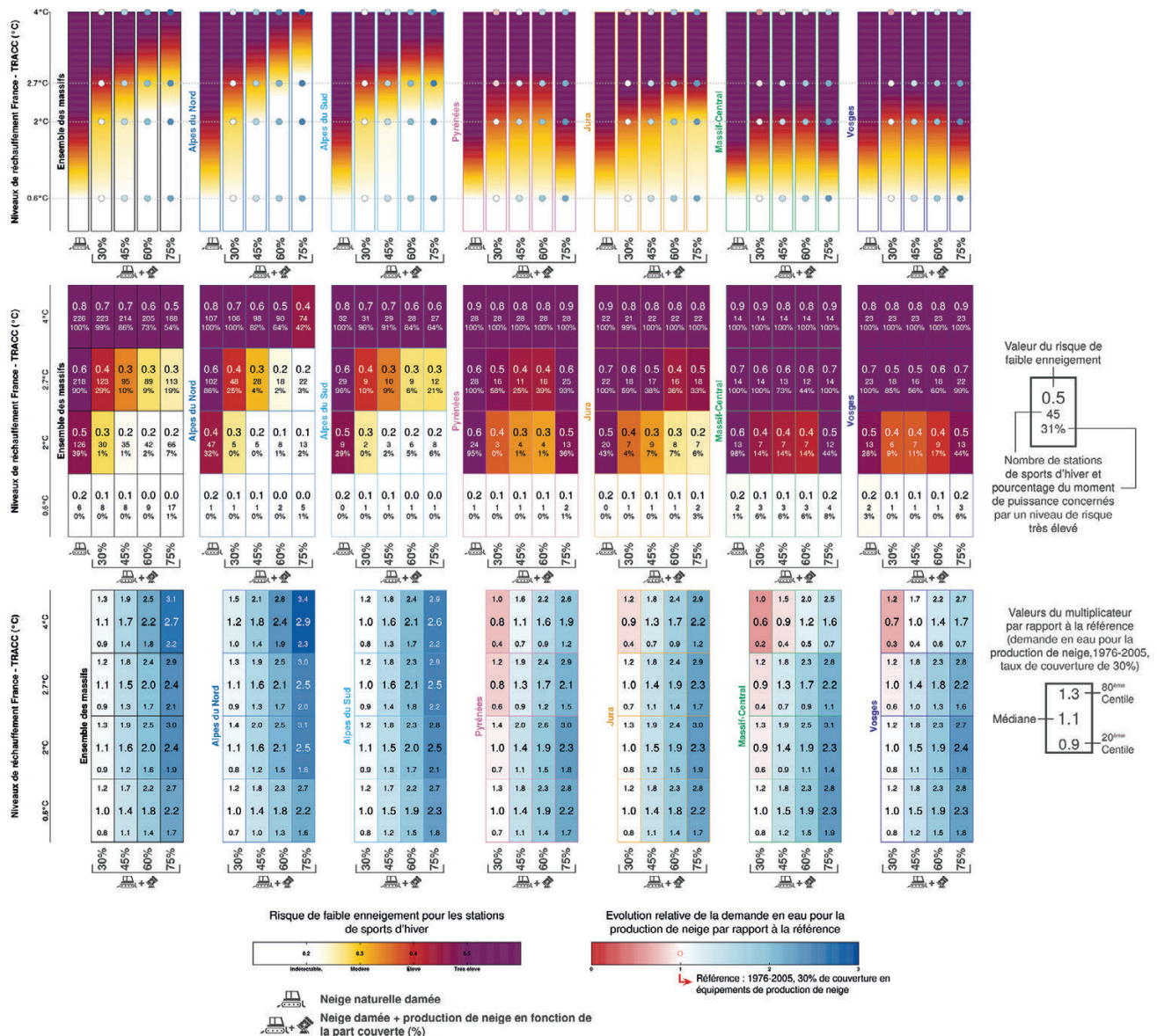


Figure 4. Évaluation du risque de faible enneigement en fonction du niveau de réchauffement en France (Tracc), à l'échelle nationale (gauche) et pour chaque ensemble montagneux considéré dans cette étude. La représentation sous forme de *burning embers* [3], ligne supérieure, permet de synthétiser les risques associés aux conséquences du changement climatique et de comparer différentes formes d'exposition, les lignes suivantes explicitant, sous forme de matrice, les valeurs associées du risque de faible enneigement et de la demande en eau pour la production de neige en fonction du niveau de couverture. Le niveau de réchauffement à +0,6 °C correspond à la période de référence 1976-2005 sur laquelle la valeur du Q20_{ref} est calculée, définissant ainsi la valeur de référence du risque de faible enneigement. Les estimations de risque de faible enneigement sont fournies en neige naturelle damée et pour plusieurs taux de couverture en équipements de production de neige (30, 45, 60 et 75 %) des stations considérées. La série de graphiques du bas de la figure fait référence à l'évolution de la demande en eau pour la production de neige selon le taux d'équipement et le niveau de réchauffement. Sur la deuxième ligne, le nombre de stations et la part du moment de puissance correspondante évoluent en fonction de l'exposition au risque et présentent le décompte des stations exposées à un très haut niveau de risque.

Si l'ensemble de ces résultats dresse un tableau assez tranché du risque climatique selon les ensembles montagneux, il cache néanmoins l'hétérogénéité entre les stations considérées (voir figure 3). Les effets de la pondération par le moment de puissance exposés pour la comparaison entre les ensembles montagneux (figure 4) s'appliquent au sein de chaque ensemble montagneux et sont d'autant plus marqués que l'écart entre le moment de puissance entre stations est important. En outre, cette approche du risque est relative à chaque station et la base du calcul, caractérisant l'enneigement naturel damé pendant la période

de référence, peut prendre des valeurs très variables des unes aux autres, masquant ainsi des conditions de départ très contrastées [5].

Discussion et conclusion

Les analyses conduites jusqu'à présent concernant l'influence du changement climatique sur l'enneigement dans les massifs montagneux français privilégiaient principalement une approche par scénario. L'élaboration de

la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (Tracc) permet la mise en œuvre d'une approche par niveau de réchauffement cohérente avec l'évolution du climat connue et projetée au niveau national [4,12]. Ces progrès récents permettent de présenter une vision globale de l'effet du réchauffement climatique au niveau national sur la réduction de l'enneigement naturel et de celui géré dans les stations de sports d'hiver (damage et production de neige). Le présent article profite également de l'extension de la BD Stations à l'ensemble des stations de

sports d'hiver françaises pour décrire la situation des stations dans les massifs de moyenne montagne, permettant là aussi une analyse globale des stations françaises. L'analyse du risque de faible enneigement via l'indice de fiabilité de l'enneigement, représenté par exemple par des *burning embers*, tient compte des caractéristiques de chaque station. Elle repose sur une approche relative, fondée sur les caractéristiques de l'enneigement passé à l'échelle de stations individuelles, intégrant ainsi la diversité des modes de développement des différentes stations de sports d'hiver et de leur territoire support, contrairement à des approches fondées par des seuils fixes pour évaluer la « viabilité » d'une station de sports d'hiver [14]. Le risque de faible enneigement permet en outre d'évaluer les perspectives à venir à l'aune de l'expérience des conditions d'enneigement connues et offre ainsi un cadre plus propice pour que les acteurs concernés perçoivent les conséquences du changement climatique vis-à-vis de leur expérience vécue localement, et l'approche mise en place pour ce travail permet de quantifier l'évolution concomitante du besoin en eau associée à la mise en œuvre de la production de neige dans un climat plus chaud. Les résultats déclinés ici à l'échelle des ensembles montagneux français se révèlent cohérents avec ceux obtenus à l'échelle des grands massifs de montagne européens [1] tout en apportant une représentation affinée des différences entre massifs montagneux.

Sous l'effet du réchauffement climatique, l'enneigement des massifs montagneux français est d'ores et déjà en fort recul à basse et moyenne altitudes, ce qui a des conséquences notables pour les conditions d'exploitation des domaines skiables [2]. L'approche fondée sur la Tracc simplifie la présentation des effets du changement climatique à un niveau de réchauffement donné, ce qui a pour objectif d'accroître l'appropriation de cet enjeu par l'ensemble des parties prenantes concernées par l'action climatique : mieux mesurer les effets du changement climatique futur afin d'illustrer l'urgence collective à réduire massivement les émissions de gaz à effet de serre, et intégrer plus clairement les enjeux d'adaptation dans les réflexions sur l'évolution future des territoires de montagne. L'absence de référence temporelle explicite peut néanmoins aussi constituer une limite pour les acteurs économiques pour lesquels il peut être primordial de projeter leur action dans le temps, notamment quand l'enjeu relève de choix d'investissements envisagés au prisme de leurs durées d'amortissement. À l'échelle individuelle des stations, le développement de services climatiques, outils d'aide à la décision pour mieux tenir compte de l'évolution climatique dans les démarches prospectives, est déjà engagé et a favorisé un partage large d'informations au sujet de l'évolution climatique et de ses impacts attendus auprès des gestionnaires de domaines skiables français, par exemple le service

ClimSnow [16]. Ce dernier s'appuie sur des données spécifiques aux domaines skiables, contrairement à la présente étude qui s'appuie sur des hypothèses et données générales, qui demandent à être précisées pour répondre aux besoins de l'aide à la décision à l'échelle de stations individuelles. En revanche, une mise à jour de ce service et de ces informations au regard de la Tracc est envisagée à courte échéance, afin de permettre une meilleure compréhension de la déclinaison de ces impacts locaux en fonction du niveau de réchauffement, et afin de se mettre en conformité avec le 3^e Plan national d'adaptation au changement climatique (Pnacc). Les résultats présentés dans cette étude ont par ailleurs vocation à être mobilisés pour d'autres analyses et services climatiques au-delà du domaine d'application ayant trait à la situation des domaines skiables français.

Remerciements

Inrae/Lessem et CNRM/CEN sont membres des Labex OSUG@2020 (ANR-10-LABX-0056) et Item (ANR-15-Idex-0002). Ce travail a bénéficié d'aides de l'État gérées par l'ANR au titre de France 2030 portant les références ANR-22-Extr-0003 et ANR-22-Extr-0011 ainsi que du soutien du programme Life 2021-2027 dans le cadre du projet Pyrenees4clima.

Bibliographie

- [1] François H., Samacoïts R., Bird D.N., Köberl J., Prettenhaler F., Morin S., 2023. Climate change exacerbates snow-water-energy challenges for European ski tourism. *Nat. Clim. Change*, 13, 935-942. doi: 10.1038/s41558-023-01759-5
- [2] Hock R., Adler C., Caceres B., Gruber S., Hirabayashi Y., Jackson M. *et al.*, 2019. High mountain areas. In: Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V., Zhai P., Tignor M., Poloczanska E. *et al.*, eds. IPCC : Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. 1st ed., Cambridge University Press, 131-202. doi: 10.1017/9781009157964
- [3] Zommers Z., Marbaix P., Fischlin A., Ibrahim Z.Z., Grant S., Magnan A.K. *et al.*, 2020. Burning embers: towards more transparent and robust climate-change risk assessments. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 1, 516-529. doi: 10.1038/s43017-020-0088-0
- [4] Soubeyroux J.-M., Dubuisson B., Bernus S., Samacoïts R., Rousset F., Schneider M. *et al.*, 2024. *A quel climat s'adapter en France selon la TRACC ?* Météo-France. <https://hal.science/hal-04797481v3>
- [5] Berard-Chenu L., François H., Morin S., George E., 2023. The deployment of snowmaking in the French ski tourism industry: a path development approach. *Current Issues in Tourism*, 26, 3853-3870. doi: 10.1080/13683500.2022.2151876
- [6] Steiger R., Scott D., Abegg B., Pons M., Aall C., 2019. A critical review of climate change risk for ski tourism. *Current Issues in Tourism*, 22, 1343-1379. doi: 10.1080/13683500.2017.1410110
- [7] Scott D., Knowles N., Steiger R., 2024. Is snowmaking climate change maladaptation? *Journal of Sustainable Tourism*, 32, 282-303. doi: 10.1080/09669582.2022.2137729
- [8] Spandre P., François H., Verfaillie D., Lafaysse M., Déqué M., Eckert N. *et al.*, 2019. Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts. *Sci. Rep.*, 9, 8043. doi: 10.1038/s41598-019-44068-8
- [9] Vernay M., Lafaysse M., Monteiro D., Hagenmuller P., Nheili R., Samacoïts R. *et al.*, 2022. The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021). *Earth System Science Data*, 14, 1707-1733. doi: org/10.5194/essd-14-1707-2022
- [10] Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Soubeyroux J.-M., Blanchard M. *et al.*, 2010. Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 14, 459-478. doi: 10.5194/hess-14-459-2010
- [11] Verfaillie D., Déqué M., Morin S., Lafaysse M., 2017. The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models. *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257-4283. doi: 10.5194/gmd-10-4257-2017

- [12] Corre L., Ribes A., Bernus S., Drouin A., Morin S., Soubeyroux J.-M., 2025. Using regional warming levels to describe future climate change for services and adaptation: Application to the French reference trajectory for adaptation. *Climate Services*, 38, 100553. doi: 10.1016/j.cliser.2025.100553
- [13] François H., Morin S., Spandre P., Lafaysse M., Lejeune Y., George-Marcelpoil E., 2016. Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche, application aux Alpes françaises et introduction de la prise en compte des pratiques de gestion (damage et neige de culture). *La Houille Blanche*, 102, 66-84. doi: 10.1051/lhb/2016041
- [14] Abegg B., Agrawala S., Crick F., De Montfalcon A., 2007. Climate change impacts and adaptation in winter tourism. In: Agrawala S., ed. *Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- [15] Spandre P., François H., Verfaillie D., Pons M., Vernay M., Lafaysse M. *et al.*, 2019. Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation. *The Cryosphere*, 13, 1325-1347. doi: 10.5194/tc-13-1325-2019
- [16] François H., Morin S., Carmagnola C., Samacoïts R., Aniot N., Guily L. *et al.*, 2022. Climsnow, un service climatique pour anticiper l'impact du changement climatique sur les conditions d'enneigement des stations de sport d'hiver. 35^e colloque annuel de l'Association internationale de climatologie, Toulouse. http://www.meteo.fr/cic/meetings/2022/aic/resumes/montagne_eau_francois.pdf
-