

## CLIMSNOW, UN SERVICE CLIMATIQUE POUR ANTICIPER L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES CONDITIONS D'ENNEIGEMENT DES STATIONS DE SPORT D'HIVER

H. FRANÇOIS<sup>1</sup>, S. MORIN<sup>2</sup>, C. CARMAGNOLA<sup>2,3</sup>, R. SAMACOÏTS<sup>4</sup>, N. ANIORT<sup>4</sup>, L. GUILY<sup>3</sup>, J. SIMON<sup>3</sup>, J.M. SOUBEYROUX<sup>4</sup>, A. DROUIN<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université Grenoble-Alpes, INRAE Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes - LESSEM, 2 rue de la Papeterie - BP76, 38402 Saint-Martin-d'Hères CEDEX, hugues.francois@inrae.fr

<sup>2</sup> Université de Toulouse, Université Grenoble Alpes, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige (Toulouse, Grenoble)

<sup>3</sup> Dianeige, Grenoble

<sup>4</sup> Météo France, Toulouse

**Résumé :** La démarche de recherche scientifique à l'origine de ClimSnow avait pour objectif de combler une lacune de connaissance au sujet de l'impact du changement climatique sur les conditions d'exploitation des domaines skiables. Auparavant, les études abordaient la question de l'enneigement sous l'angle de l'enneigement naturel là où les gestionnaires avaient développé des méthodes de gestion de la neige avancées et adaptées à leur pratique professionnelle. Cette approche constituait un frein majeur pour que les acteurs de la filière s'approprient les enjeux du changement climatique. Lever ce verrou impliquait une démarche interdisciplinaire croisant connaissance des stations de sports d'hiver, portée par l'INRAE, et de l'étude de l'enneigement en montagne, amenée par le CNRM (Météo-France - CNRS) qui a débouché, outre les avancées de connaissances scientifiques, sur le service ClimSnow, produit de diagnostic des impacts du changement climatique dont les exploitants sont aujourd'hui demandeurs, renversant ainsi la perspective initiale.

**Mots-Clés :** changement climatique, impacts, domaine skiable, enneigement.

### Introduction

Si la matérialité du changement climatique est dorénavant acceptée par la majorité de la population, l'ampleur des questions qu'il soulève et les incertitudes associées à ses impacts sont autant de freins pour que les acteurs concernés prennent explicitement ce facteur en compte dans la définition de leurs stratégies à court et moyen termes, dans une perspective de long terme. Les stations de sports d'hiver n'échappent pas à cette situation et ce d'autant moins qu'elles composent avec une ressource, la neige, particulièrement variable d'une année sur l'autre et dont dépend directement l'ouverture de leur domaine skiable. Les hivers peu enneigés de la fin de la décennie 1980, début de la décennie 1990 ont particulièrement alerté les décideurs publics quant aux fragilités d'un secteur qui depuis les années 1960 avait été le fer de lance de l'aménagement du territoire montagnard et de développement économique et social des zones de montagne. Cette séquence a non seulement rappelé l'effet des conditions d'enneigement sur l'exploitation des stations de sports d'hiver mais surtout leur fragilité face à la succession des « hivers sans neige » comme le veut la dénomination héritée de cette période.

Cette situation est d'autant plus problématique que le deuxième pilier du tourisme de ski, outre la neige, sont les remontées mécaniques, reposant elles-mêmes sur des capitaux lourds. Si cette intensité capitaliste répond bien aux concepts de massification de la production et de la consommation de la période fordiste dans laquelle les stations émergent, elles héritent également des limites du modèle en termes de flexibilité productive. La réponse aux difficultés d'exploitation s'est alors traduit par une poursuite de la logique capitaliste en investissant dans les technologies de production de neige qui ont

dès lors suivi une double trajectoire d'amélioration des performances d'une part et de diffusion de l'autre (Spandre et al., 2015), ces deux dynamiques se renforçant mutuellement. En outre, le développement de la production de neige s'est accompagné d'un ensemble d'outils contribuant à la gestion de l'enneigement depuis le profilage des pistes jusqu'au monitoring du manteau neigeux (Berard-Chenu, 2021). L'ensemble de ces processus a permis d'améliorer les capacités d'exploitation en même temps que les conditions naturelles se dégradaient sous l'effet du changement climatique masquant ainsi en partie ses premiers impacts sensibles sur la réduction de l'enneigement (Berard-Chenu et al., 2022), sans garantie que ces technologies soient en mesure de jouer un rôle équivalent à l'avenir (Hock et al, 2019).

Tout l'enjeu est alors de disposer d'éléments permettant d'évaluer la contribution future des pratiques de gestion de la neige au regard de l'évolution des conditions climatiques, afin de mesurer le risque climatique qui pèse sur les stations individuelles, sur leurs territoires support d'une part comme sur la filière du tourisme hivernal et de montagne d'autre part. Il s'agit d'un enjeu central pour l'avenir des stations de sports d'hiver et la définition de stratégies d'adaptation au changement climatique. La fiabilisation de l'enneigement permet de conforter les moyens existants, tirés de l'exploitation des domaines skiables, mais limite les possibilités d'explorer des voies de développement différentes. Pour apporter un éclairage précis à ce sujet, une chaîne de modélisation complexe permettant d'intégrer le damage et la production de neige à l'évaluation de la fiabilité de l'enneigement passé et futur des domaines skiables a été développée. Cette communication apporte dans un premier temps des précisions sur les outils mobilisés et, dans un second temps, la démarche de transfert opérationnel de ce dispositif scientifique qui a permis de formaliser le service climatique ClimSnow en s'appuyant sur le savoir-faire du bureau d'études Dianeige, spécialisé dans l'aménagement et de la gestion des domaines skiables.

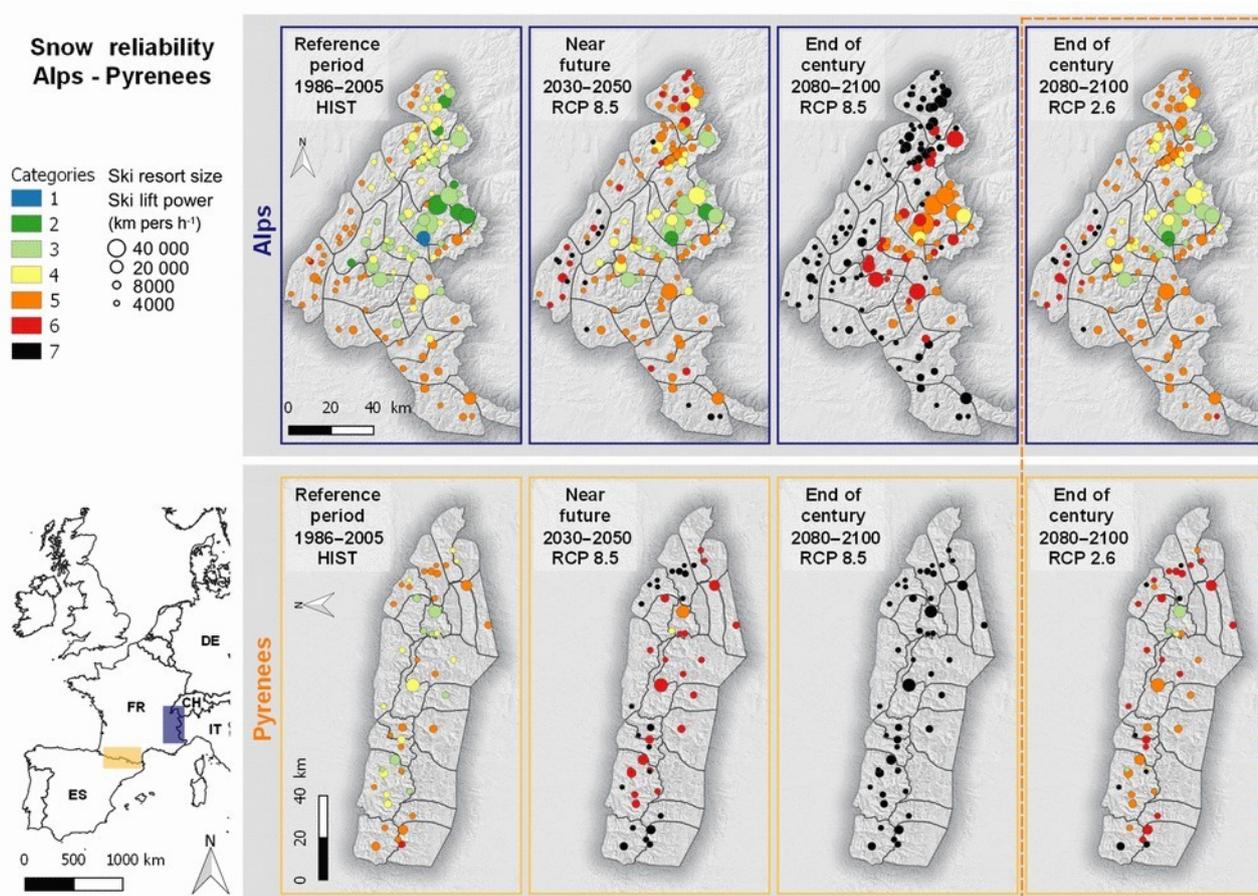
## 1. Les fondements scientifiques de la modélisation et la quantification de l'enneigement des domaines skiables

La quantification de la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables prenant en compte les pratiques de gestion de la neige en station de sports d'hiver est issue des travaux de recherche communs entre le Centre d'Etudes de la Neige (CNRM, Météo-France - CNRS) et l'INRAE depuis 2012. Les premiers croisements de ces méthodes et outils ont ainsi permis d'établir les bases méthodologiques de l'approche en croisant des résultats de la modélisation spatiale des domaines skiables et des simulations de manteau neigeux en intégrant uniquement les processus gouvernant l'évolution du manteau neigeux naturel (François et al., 2014). Il s'agit donc d'une méthode fournissant des résultats agrégés à l'échelle de chaque domaine skiable au sein desquels l'évaluation de l'enneigement est réalisée en appliquant la simulation de manteau neigeux correspondant aux caractéristiques de localisation, d'altitude, de pente et d'orientation de chaque pixel qui le compose.

Sur cette base, plusieurs initiatives de recherche successives et complémentaires ont permis d'affiner et de développer la modélisation de l'enneigement des domaines skiables :

- La thèse de P. Spandre a permis de développer **Crocus Resort** (Spandre et al., 2016), version enrichie du modèle de manteau neigeux à base physique Crocus développé au CNRM, en implémentant les effets du damage et de la production de neige.
- Dans le cadre de ce travail de thèse, la représentation spatiale des enveloppes gravitaires de domaine skiable développée par l'INRAE dans la **BD Stations** a également pu être affinée, notamment au regard de la représentation spatiale des zones couvertes par les installations de production de neige.
- Le programme GICC **ADAMONT** a permis de développer un jeu de données de projections climatiques compatibles avec la chaîne de modélisation SAFRAN-Crocus en utilisant des méthodes de descente d'échelle / débiasage des simulations régionales EUROCORDEX (Verfaillie et al., 2017).

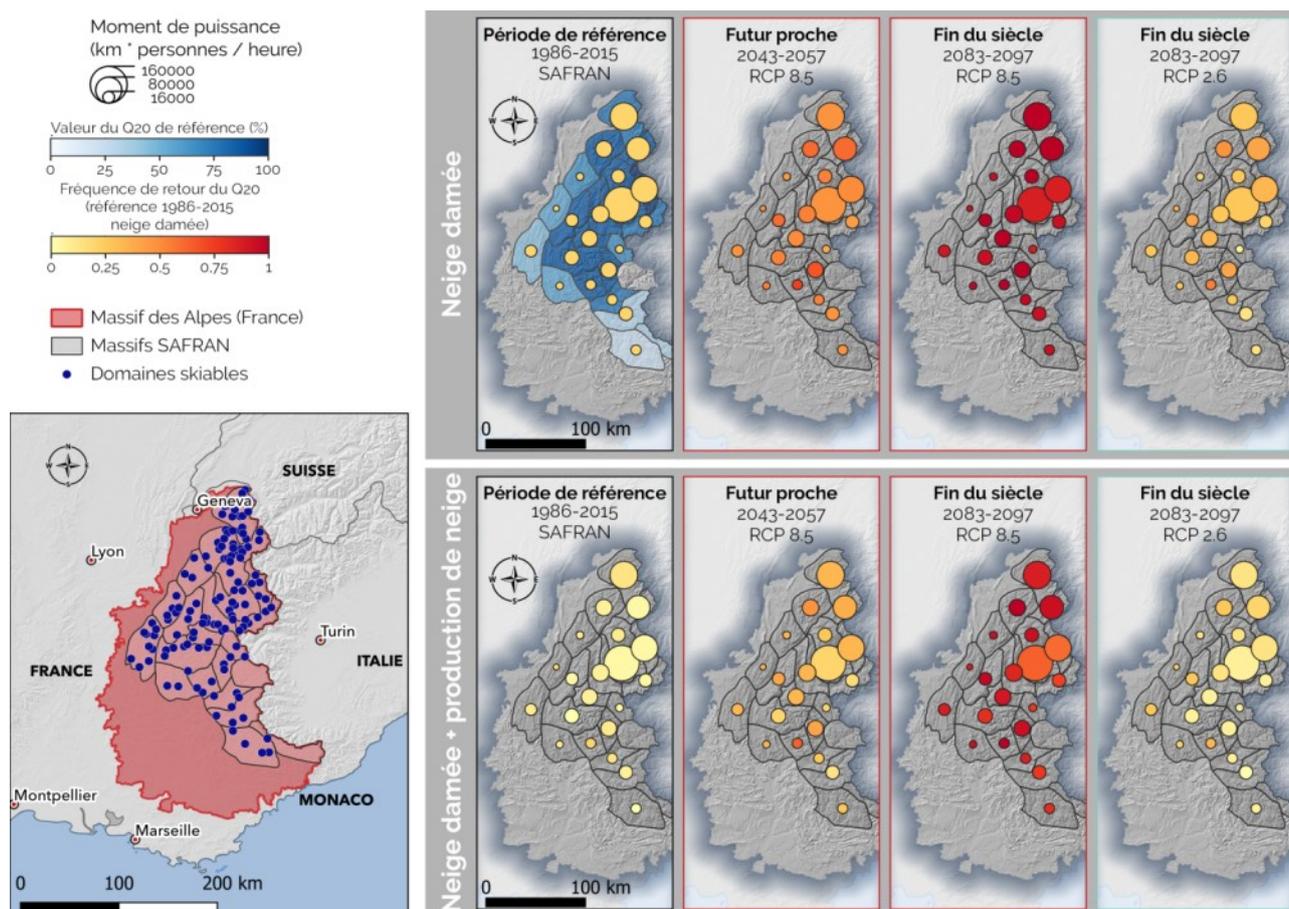
Deux formes d'analyse ont ainsi permis de proposer une meilleure compréhension des impacts du changement climatique sur l'enneigement naturel et géré. L'étude des altitudes limites de fiabilité de l'enneigement (snow reliability line) et de leur évolution en fonction des massifs et du contexte climatique à venir (Spandre et al., 2019b). Cette approche consiste à comparer différentes altitudes du domaine skiable (pied des pistes, altitude moyenne) avec celle au dessus de laquelle une quantité suffisante de neige est disponible pendant suffisamment longtemps (règle dite « des 100 jours », Abegg et al., 2006). L'ajout de différentes modalités de gestion de neige (naturelle, damée, en fonction de différents taux de couverture du domaine skiable), l'utilisation de différentes altitudes caractéristiques ainsi que l'utilisation d'une approche probabiliste pour tenir compte de la variabilité de l'enneigement et les incertitudes de la modélisation permettent d'enrichir la lecture de cette information relativement limitée car réduisant la complexité des domaines skiables à une limite altitudinale. Une typologie des conditions d'exploitation en 7 catégories, des plus favorables aux plus défavorables, a ainsi pu être établie et appliquée aux massifs des Alpes et des Pyrénées (figure 1).



**figure 1.** Limite d'altitude de fiabilité de l'enneigement dans les Alpes et les Pyrénées à différentes périodes et en fonction des scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Les catégories 1, 2 et 3 illustrent les stations de ski où les conditions d'enneigement naturel sont fiables. Les catégories 4 et 5 illustrent les stations de ski où les conditions d'enneigement sont fiables grâce à la fabrication de neige de culture. Les catégories 6 et 7 illustrent les stations de ski où la fabrication de neige n'est plus efficace pour réduire l'effet du manque de neige naturelle aux plus basses altitudes de la station (Spandre et al., 2019b).

La définition d'un indice de fiabilité de l'enneigement caractéristique d'une saison touristique hivernale (Spandre et al., 2019a) permet quant à elle d'intégrer explicitement toute la complexité des domaines skiables pour proposer une vision à la fois plus complète et plus compacte des impacts du changement

climatique en synthétisant de nombreuses informations. Ce type d'analyse a notamment conduit à proposer une analyse de risque climatique, en complément de l'analyse de l'évolution de l'indice de fiabilité au fil du temps, fondée sur la reproduction des conditions d'exploitation les plus défavorables. Pour cela, une donnée d'enneigement "critique" de référence est calculée, correspondant au vingtième centile sur la période de référence passée 1986-2015 (saisons 1986-1987 à 2015-2016), permettant de caractériser l'enneigement typique d'une année faiblement enneigée. Ceci permet ensuite d'étudier la fréquence des saisons à venir où la valeur de l'indice de fiabilité est inférieure ou égale à cette valeur caractéristique des conditions d'exploitation difficile. Cette approche a ainsi été mobilisée pour analyser la situation dans les Pyrénées (François et al., 2021) et dans les Alpes (Figure 2, Arlot et al., 2022).



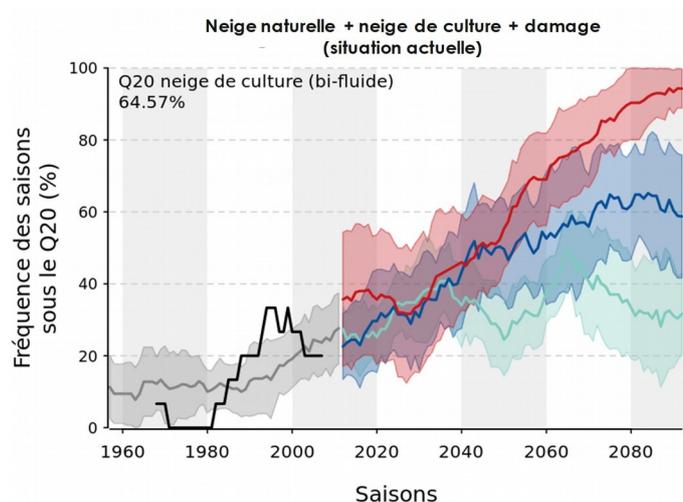
**figure 2.** Les données individuelles calculées pour chaque station sont agrégées à l'échelle de chaque massif (moyenne pondérée par le moment de puissance du parc de remontées mécaniques) et la valeur de référence est calculée pour les simulations en neige damée entre 1986 et 2015 (échelle de couleurs bleues) et les cercles de couleur représentent la fréquence de retour des saisons durant lesquelles l'indice de fiabilité de chaque massif est inférieur ou égal à sa valeur de référence (Arlot et al., 2022).

Au-delà de la caractérisation globale des impacts du changement climatique, ces travaux ont également souligné les spécificités des situations de chaque station, non seulement au regard de l'exposition au risque climatique, mais également au regard de son outil de production et de sa dynamique d'équipement. La mise en place du service climatique ClimSnow répond à ce besoin de prendre en compte les particularités des individus sur la base d'un accompagnement personnalisé.

## 2. ClimSnow, transfert opérationnel des méthodes et résultats de la recherche vers un outil de diagnostic personnalisé

Afin de répondre à des questionnements d'acteurs locaux sur les questions de stratégies de développement des stations de sports d'hiver dans la perspective du changement climatique en tenant compte des spécificités de chaque domaine skiable, des informations complémentaires doivent être intégrées, ce qui s'inscrit dans le cadre d'un service dédié, que constitue ClimSnow. Développé sous forme prototype en réponse à une commande du Conseil Départemental de l'Isère / Isère Attractivité en 2017-2018 (Gerbaux et al., 2020), ce service valorise et enrichit les outils scientifiques, et s'inscrit dans le cadre d'un partenariat entre Météo-France et Dianeige, en lien avec INRAE. Le croisement de l'expertise et des compétences de chacun des partenaires a ainsi abouti au développement d'une chaîne opérationnelle qui vient compléter les travaux scientifiques en apportant une forme de médiation essentielle à l'appropriation des résultats complexes issus de ClimSnow. L'intermédiation par Dianeige débute en amont de la réalisation de la production de l'étude ClimSnow par l'expression du besoin qui préside à la collecte des données géographiques correspondantes. La définition amont des enjeux permet de guider la rédaction d'un rapport circonstancié et l'appropriation des résultats par les commanditaires pour contribuer aux délibérations visant à définir les orientations stratégiques pour l'évolution des aménagements de leur domaine skiable.

Les résultats issus de ClimSnow se présentent comme un jeu d'indicateurs restitués sous formes de graphiques, cartes et tableaux, assortis de leur description et de préconisations. Outre l'évolution de l'enneigement naturel et géré, ClimSnow permet de quantifier le besoin en eau associé à la production de

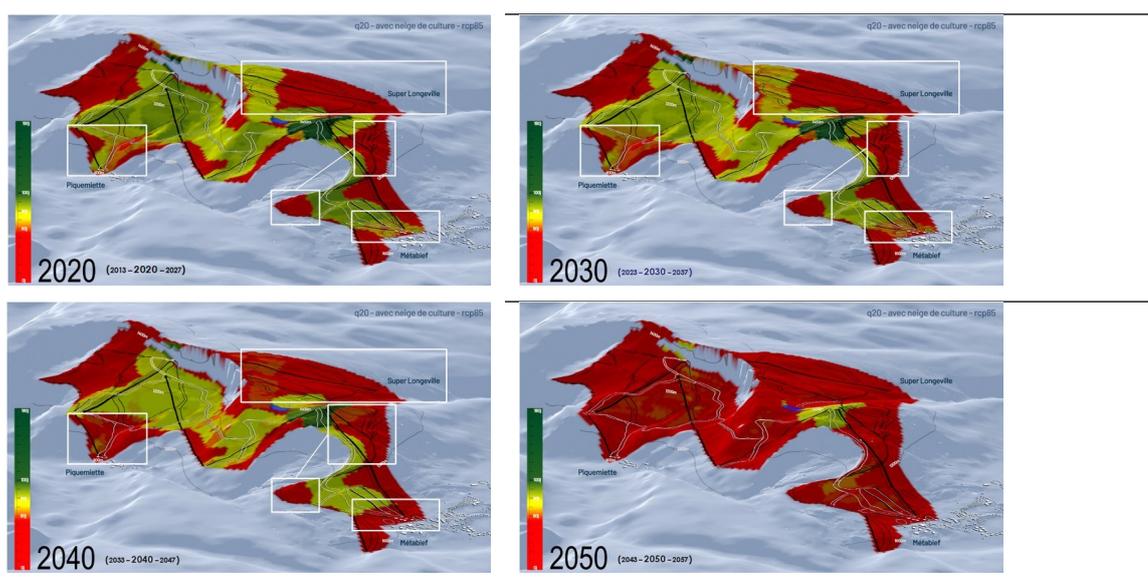


neige, qui peut être combiné à d'autres sources d'information au sujet de l'évolution de cette ressource pour nourrir les démarches de planification territoriale.

L'évolution temporelle en fonction des scénarios d'émission de gaz à effet de serre permet de faire un lien direct avec les représentations utilisées par le GIEC concernant l'évolution des températures. Ici, nous représentons le taux de retour du Q20 historique. Ce type de figure (voir Figure 3) montre ainsi toute l'importance de la trajectoire climatique suivie, notamment à partir du milieu de siècle où la divergence entre les scénarios est plus marquée.

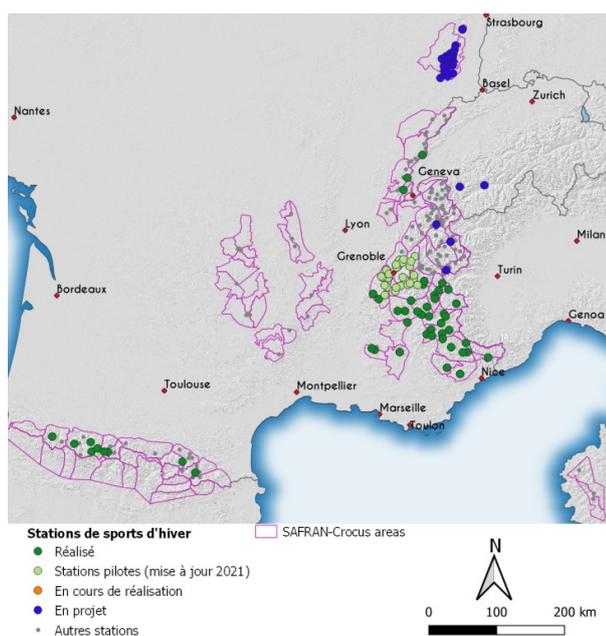
**figure 3.** Evolution du taux de retour du Q20 représentatif des hivers où les conditions d'exploitation sont les plus défavorables en fonction du temps et des scénarios d'émissions de GES (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5)

Le partenariat avec un bureau d'études spécialisé dans le domaine et rôlé à la relation avec les exploitants permet également d'adopter les formes de représentations vers des visualisations parfois moins rigoureuses du point de vue académique mais qui font plus directement sens pour le destinataire des études telles que l'illustrent les cartes de la figure 4. En outre, il existe un enjeu direct de crédibilisation plus ou moins forte des résultats avec la demande des acteurs de terrains de mixer les résultats issus de la chaîne de traitement afin de limiter la représentation des sorties prenant en compte la production de neige au stricte périmètre des pistes couvertes là où nos simulations sont évaluées sur la base d'approches plus globales, cohérentes avec l'approche par enveloppes gravitaires de domaines skiables.



**figure 4.** Evolution du nombre de jours « skiables » au sein du domaine skiable en fonction de 4 périodes lors des saisons où les conditions d'exploitation sont les plus difficiles (Q20 projeté) dans le cas du scénario RCP 8.5 en tenant compte de la production de neige au regard de la couverture du domaine existante. Ces figures montrent un effet de seuil entre 2040 et 2050 où la production de neige ne permet plus de répondre au besoin.

La demande d'analyses individuelles peut également être portée par des collectivités moins directement impliquées dans la gestion des domaines skiables (en France les remontées mécaniques sont un service public sous la responsabilité des communes ou de groupements de communes) telle que les Régions, les Département ou des Établissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) au sein desquels figurent plusieurs domaines skiables. Si l'expérience nous a montré que dans cette configuration l'enjeu d'appropriation reste variable pour les gestionnaires directs de la neige en station elle a permis de développer des formes de représentation répondant au besoin de ciblage des politiques publiques telle que ce fut le cas pour la Région Sud-PACA en 2021 et 2022 avec la production d'une carte synthétique de l'ensemble des situations individuelles.



Aujourd'hui, compte tenu des commandes institutionnelles et des commandes individuelles, plus de 100 diagnostics ClimSnow ont pu être réalisés (cf. Figure 5) et cet outil fait désormais autorité auprès des décideurs publics. D'un côté, la démarche scientifique contribue aux travaux de la communauté dans ce domaine et plus largement à l'étude des impacts du changement climatique ce qui permet d'abonder les réflexions au sujet des stratégies d'adaptation. De l'autre, elle a permis d'explicitement mettre l'évolution du climat à l'agenda des gestionnaires de domaines skiables et est directement recommandée par le Plan Avenir Montagne et le rapport parlementaire sur le tourisme de montagne et les enjeux du changement climatique (Battistel et Gayte, 2022).

**figure 5.** Carte des stations pour lesquelles une évaluation de la fiabilité de l'enneigement fondée sur ClimSnow est réalisée

ou sera prochainement réalisé.

## Conclusion

Le service ClimSnow constitue une traduction opérationnelle d'un effort de recherche de long terme, ayant abouti à la co-construction d'une information climatique pertinente pour tenir compte de l'évolution du risque climatique au cours du 21ème siècle sur les conditions d'exploitation des stations de sport d'hiver afin de nourrir les réflexions et démarches d'adaptation et de transition. Issu d'un partenariat entre organismes de recherche, associant des acteurs des filières concernées, et concrétisé sous l'égide d'un bureau d'étude spécialisé, ClimSnow constitue aujourd'hui un des exemples les plus aboutis de service climatique au niveau national (ONERC, 2022). Cette contribution fournit les éléments de contexte qui ont présidé à son développement et sa concrétisation opérationnelle. Le service ClimSnow opérationnel a vocation à évoluer à l'avenir afin de continuer d'apporter des éléments tangibles aux débats au sujet de la transition des territoires de montagne.

Par exemple, un des axes de développement concerne l'articulation des résultats de ClimSnow avec les enjeux de l'évolution des ressources en eau et du partage de ses usages. Ceci requiert de poursuivre un effort de recherche et de transfert, afin de demeurer à l'état de l'art dans le domaine de la modélisation climatique (prochaines générations de modèles de climat à résolution spatiale croissante, augmentation de la robustesse des simulations et de la caractérisation des incertitudes), de la simulation de la neige sur piste tenant compte des évolutions technologiques et de représentations plus fines des pratiques de gestion de la neige, d'analyses multi-agents des conséquences de l'évolution de l'enneigement sur la demande touristique au delà de la stricte analyse de l'offre permis par ClimSnow actuellement. Les perspectives sont nombreuses et s'intègrent dans le cadre du développement des services climatiques, à l'interface des disciplines des bases physiques du climat, de l'étude des impacts, de l'adaptation et de la vulnérabilité, dans un cadre transdisciplinaire en relation avec les filières et les territoires, toute en prêtant attention au modèle économique de ce nouveau secteur destinée à produire et fournir une information climatique pertinente.

## Références

Battistel, M.N. et L. Gayte, Rapport d'information sur le tourisme de montagne et les enjeux du changement climatique. Assemblée Nationale, Commission des Affaires Economiques, [https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-eco/l15b5127\\_rapport-information](https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-eco/l15b5127_rapport-information), 2022.

Berard-Chenu, L., François, H., George, E., and Morin, S. : Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2019, *The Cryosphere*, 16, 863–881, <https://doi.org/10.5194/tc-16-863-2022>, 2022.

Arlot M.P., S.Morin, L. Tschanz, E. George, H. François, E. Jeanjean, Mise en prospective d'une approche intégrée et participative d'adaptation d'un territoire de montagne au changement climatique, in *La prospective au service de l'adaptation au changement climatique*, Rapport au Premier ministre et au Parlement de l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (<https://www.ecologie.gouv.fr/parution-du-rapport-annuel-observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc-0>), pp 196-211, 2022.

François, H., S. Morin, M. Lafaysse and E. George-Marcelpoil, Crossing numerical simulations of snow conditions with a spatially-resolved socio-economic database of ski resorts : a proof of concept in the French Alps, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 108, 98–112, doi : [10.1016/j.coldregions.2014.08.005](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.08.005), 2014.

François, H., Samacoïts, R., Carmagnola C., Soubeyroux J.M., Morin S., Perspectives d'enneigement dans les stations pyrénéennes de sports d'hiver, in *Cahier Régional Occitanie sur les Changements Climatiques - Édition 2021, Chapitre 9 - Tourisme*, pp 201 - 205, [https://reco-occitanie.org/crocc\\_2021/](https://reco-occitanie.org/crocc_2021/), 2021.

Gerbaux, M., P.Spandre, Hugues François, E. George et S. Morin, Fiabilité de l'enneigement et disponibilité des ressources en eau pour la production de neige dans les domaines skiables du Département de l'Isère (France), en conditions climatiques actuelles et futures, *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, 108-1, <https://dx.doi.org/10.4000/rga.6724>, 2020.

Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Kääb, S. Kang, S. Kutuzov, Al. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove, and H. Steltzer, 2019: High Mountain Areas. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 131-202. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.004>, 2019.

ONERC, La prospective au service de l'adaptation au changement climatique, Rapport au Premier ministre et au Parlement de l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (<https://www.ecologie.gouv.fr/parution-du-rapport-annuel-lobservatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc-0>), 2022.

Spandre, P., H. François, D. Verfaillie, M. Lafaysse, M. Déqué, N. Eckert, E. George and S. Morin, Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts, *Sci. Rep.*, 9, 8043, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44068-8>, 2019a.

Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Pons, M., Vernay, M., Lafaysse, M., George, E., and Morin, S. : Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps : relevance of snowmaking as a technical adaptation, *The Cryosphere*, 13, 1325-1347, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1325-2019>, 2019b.

Spandre, P., S. Morin, M. Lafaysse, Y. Lejeune, H. François and E. George-Marcelpoil, Integration of snow management processes into a detailed snowpack model, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 125, 48-64, doi: [10.1016/j.coldregions.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.01.002), 2016.

Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M. : The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257-4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>, 2017.