



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

Martin Gerbaux, Pierre Spandre, Hugues François, Emmanuelle George,
Samuel Morin

► To cite this version:

Martin Gerbaux, Pierre Spandre, Hugues François, Emmanuelle George, Samuel 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. *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, 2020, 108 (1), pp.1-20. 10.4000/rga.6724 . hal-02533068

HAL Id: hal-02533068

<https://hal.inrae.fr/hal-02533068>

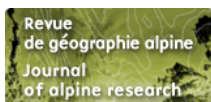
Submitted on 6 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine

108-1 | 2020
Eau, tourisme et montagne

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

Martin Gerbaux, Pierre Spandre, Hugues François, Emmanuelle George et Samuel Morin



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/rga/6724>
ISSN : 1760-7426

Éditeur

Association pour la diffusion de la recherche alpine

Référence électronique

Martin Gerbaux, Pierre Spandre, Hugues François, Emmanuelle George et Samuel 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* [En ligne], 108-1 | 2020, mis en ligne le 28 mars 2020, consulté le 03 avril 2020. URL : <http://journals.openedition.org/rga/6724>

Ce document a été généré automatiquement le 3 avril 2020.



La Revue de Géographie Alpine est mise à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

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

Martin Gerbaux, Pierre Spandre, Hugues François, Emmanuelle George et Samuel Morin

Remerciements : Ce travail a bénéficié d'un financement octroyé par Isère Tourisme / Conseil Départemental de l'Isère. Il a également été permis par les moyens apportés par le Laboratoire des EcoSystèmes et Sociétés en Montagne (LESSEM) et le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), complétés par les projets GICC ADAMONT, CDP Trajectories de l'IDEX Univ. Grenoble Alpes et LabEx OSUG@2020 et ITEM. Les échanges avec les acteurs des stations de sport d'hiver de l'Isère ont rendu possible l'analyse quantitative présentée dans ces travaux.

Introduction

- 1 Parmi les départements des Alpes françaises, l'Isère occupe la troisième place pour l'offre de sports d'hiver avec 12 % des infrastructures de remontées mécaniques et la quatrième place en termes de capacité d'accueil (7,6 % des lits touristiques) et de fréquentation (11,4 % des journées skieurs alpines). Les investissements sur les domaines skiables, en termes de remontées mécaniques, d'aménagement, de profilage des pistes et de sécurisation de l'enneigement ne sont pas négligeables dans l'ensemble des charges d'un opérateur et s'amortissent sur de nombreuses années. Il est légitime d'évaluer leur pertinence au regard des pratiques et conditions d'exploitation actuelles mais aussi futures, dans un contexte de climat changeant.

- 2 Du fait de sa place croissante et de son usage quasiment généralisé pour l'exploitation courante des domaines skiables (Steiger et Mayer, 2008), la prise en compte de la gestion de la neige (Steiger *et al.*, 2017) est indispensable pour toute étude d'analyse ou de prospective des conditions d'exploitation de ces domaines (Hock *et al.*, 2019). L'impact du changement climatique sur l'usage de la neige de culture est double : augmentation du besoin et dégradation des conditions de production. En effet, la fabrication de neige est elle-même sensible à l'évolution du climat, tant du point de vue des conditions météorologiques favorables pour la production (créneaux de froid) que du point de vue de la ressource en eau disponible pour la production (Spandre, 2016, Steiger *et al.* 2017.). Jusqu'à une époque récente, les principales études ont abordé la question de la vulnérabilité des stations de sports d'hiver au changement climatique sans tenir compte explicitement de ces facteurs (Abegg *et al.*, 2007, 2020). Le débat public autour de la question de l'aménagement des domaines skiables, dans le contexte du changement climatique passé et futur, ne peut s'exercer sereinement qu'en tenant compte de la gestion de la neige, dans la mesure où les projections climatiques concernant la raréfaction de la neige naturelle ne suffisent pas à fournir les éléments nécessaires à l'appréciation des enjeux ou des arbitrages.
- 3 Parmi l'ensemble des dispositifs de soutien public aux stations de montagne depuis leur construction, le choix de subventionner les installations de neige de culture par les Régions AuRA et Sud-PACA en 2016, suivies par des dispositifs départementaux dédiés, a contribué à renouveler le débat sur ces choix d'aménagement. C'est dans ce contexte que le Département de l'Isère, par l'entremise d'Isère-Tourisme (désormais Isère Attractivité), a commandé une étude scientifique portant sur la fiabilité de l'enneigement, complétée par des diagnostics des besoins en eau associés et des implications économiques. Cet article s'appuie sur les deux premiers volets de cette étude (qui s'est déroulée en 2017 et 2018), et résume un travail d'analyse des conditions d'enneigement naturel et géré des 24 stations de l'Isère, en climats actuel et futur, et les besoins en eau associés à la production de neige. Un premier temps a consisté à évaluer les conditions d'enneigement des domaines skiables isérois sur la période passée et à dresser un état des lieux des équipements en neige de culture existants et/ou en projet. Ces éléments ont permis de modéliser l'enneigement futur des stations et les besoins en neige de culture associés, en contexte d'évolution du climat. Un second temps a visé à utiliser les données simulées sur les stations pour alimenter des modèles hydrologiques dédiés, afin d'évaluer la disponibilité de la ressource par rapport aux besoins et, plus globalement, d'appréhender la multiplicité des pressions sur la ressource en eau pour chacune des stations. Le chaînage de ces méthodes constitue une approche intégrée originale, indispensable à une meilleure compréhension de la production de neige et de ses conséquences dans une perspective de changement climatique.

Cadre méthodologique

- 4 Au-delà d'une connaissance fine des domaines skiables du département et de leur gestion de la neige de culture, les outils suivants ont été développés ou employés afin de répondre aux problématiques de l'étude :
 - une modélisation explicite du manteau neigeux afin de calculer la fiabilité de l'enneigement et des besoins en eau nécessaires pour sécuriser l'enneigement ;

- une modélisation de la ressource en eau et des autres usages de l'eau sur le bassin pour caractériser l'adéquation ressource-besoins ;
- une régionalisation du changement climatique permettant de générer des chroniques météorologiques en climat futur à un pas de temps horaire, utilisables pour chaque domaine skiable.

Les domaines skiables du Département de l'Isère

- 5 Les 24 domaines skiables de l'Isère (Figure 1) cumulent 2015 ha et 1030 km de pistes. Ils sont distribués dans cinq massifs montagneux (avec en termes d'infrastructures de remontées mécaniques 21 % en Belledonne, 5 % en Chartreuse, 28 % dans les Grandes Rousses, 29 % en Oisans et 18 % pour le Vercors) et présentent une grande diversité de taille et d'altitude (<http://www.observatoire-stations.fr/carto.php>). Selon la classification Domaines Skiables de France, 2 sont considérés comme des très grands domaines, 4 des grands domaines, 3 des stations moyennes et 15 des petits domaines. Cette distribution est assez similaire à la distribution à l'échelle alpine, en nombre comme en infrastructures de remontées mécaniques : les petits domaines sont les plus nombreux (plus d'une station sur deux) mais ne représentent qu'une faible part des infrastructures (moins de 10 %).

Figure 1 - Localisation des domaines skiables alpins Isérois

- 6 [Image non convertie]
M. Gerbeaux, P. Spandre, H. François, E. George, S. Morin, 2020.
- 7 En 2017, 14 des 24 domaines isérois étaient équipés en neige de culture, dont 12 prévoyaient d'accroître leur capacité de production. Quatre domaines pas encore équipés l'envisageaient également d'ici à 2025 (horizon temporel correspondant aux projets actuellement en cours d'étude). La surface totale équipée en neige de culture dans le département a doublé entre 2001 et 2016 (de 271 ha à 536 ha, soit environ 27 % de la surface totale de pistes) et devrait nettement augmenter à l'horizon 2025, pour atteindre 854 ha, soit plus de 42 % de la surface totale de pistes, si tous les projets d'équipements des stations recensés lors de l'étude se réalisent.
- 8 Afin de modéliser l'enneigement des domaines, la base de données *BD Stations* (INRAE) a été mobilisée pour fournir les données structurelles sur les domaines skiables (données sur les remontées mécaniques, localisation géographique, informations quantitatives). Cette base couplée à un modèle numérique de terrain permet de déterminer un domaine skiable potentiel (Figure 2), composé de l'ensemble des pixels accessibles par gravité depuis le haut des remontées mécaniques et qui donnent accès par gravité au bas d'une remontée mécanique au sein de la station considérée. Ces « enveloppes gravitaires » (François *et al.*, 2016) délimitées de manière systématique pour l'ensemble des stations ont ensuite été retravaillées avec les gestionnaires des domaines skiables concernés afin de les affiner (ce qui permet d'obtenir des résultats les plus en phase possible avec les observations de terrain, Abegg *et al.* 2020) tout en conservant le principe d'une enveloppe globale dont une partie seulement est effectivement couverte par les pistes (environ 10 %, à déterminer individuellement). Les zones potentiellement couvertes par la neige de culture au moment de l'entretien et celles qui seront concernées par les projets à venir ont été définies avec les exploitants en respectant ce

critère de la proportion de surface totale équipée. Ces échanges ont également permis la collecte de données complémentaires (consommation et approvisionnement en eau, pilotage des installations et fréquentation) nécessaires pour contextualiser notre approche et ainsi comparer les valeurs issues des simulations avec celles mesurées.

Figure 2 - Exemple de carte du domaine skiable (domaine gravitaire et secteurs enneigés artificiellement – actuel ou en projet) et des bassins versants associés, localisant les autres usages de la ressource en eau

9 [Image non convertie]

M. Gerbeaux, P. Spandre, H. François, E. George, S. Morin, 2020.

Modélisation de l'enneigement

- 10 Les conditions d'enneigement sur chacun des domaines skiables ont été modélisées en utilisant le modèle SURFEX/ISBA-Crocus (Brun *et al.*, 1992 ; Vionnet *et al.*, 2012) avec les récents développements baptisés Crocus-Resort permettant la prise en compte explicite de la production de neige et du damage (Spandre *et al.*, 2016, Spandre *et al.*, 2019). Dans les zones de montagnes françaises, Crocus est généralement utilisé en association avec le Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige (SAFRAN) (Durand *et al.*, 1993). SAFRAN a déjà été employé dans un grand nombre d'études dans les Alpes françaises (Martin *et al.*, 1994 ; Gerbeaux *et al.*, 2005 ; Durand *et al.*, 2009a ; 2009b ; Lafaysse *et al.*, 2011 ; François *et al.*, 2014). SAFRAN opère à une échelle dite de « massifs » au sein desquels les conditions météorologiques sont supposées homogènes et ne dépendre que de l'altitude et des caractéristiques du pixel considéré (pente, orientation). Les données météorologiques sont fournies par pas altitudinal de 300 m et à une résolution horaire. SAFRAN assimile des données issues de modèles numériques du temps à grande échelle et des observations de surface (stations automatiques, observations manuelles) dont la base de données couvre les 58 ans de 1958 à 2016 (Durand *et al.*, 2009b).
- 11 Reposant sur ces travaux, Crocus-Resort permet donc de modéliser l'évolution du manteau neigeux, au pas de temps horaire, en incluant le damage et la production de neige tels que pratiqués par les opérateurs (quand et où). La production est possible, de 18 h à 8 h le lendemain matin, si la température humide est inférieure à -2°C et si la vitesse de vent est inférieure à 4,2 m/s. Pour les stations françaises, le taux moyen d'équipement en enneigneurs (de 2,5 à 3,1 perches par hectare de piste) mène dans Crocus à une production maximale journalière de 60 kg/m² de neige sur les surfaces équipées.
- 12 Le schéma de production de neige de culture a été déterminé en fonction des études antérieures réalisées sur les pratiques professionnelles (Spandre *et al.*, 2015, 2016 ; Spandre, 2016) et qui ont été confortées par nos échanges avec les responsables de domaines skiables de l'Isère. La saison hivernale est divisée en trois temps :
 1. Du 1^{er} novembre au 15 décembre, une sous-couche de 30 cm de neige de culture (150 kg/m²) est produite, si les conditions météorologiques le permettent, quel que soit l'enneigement au cours de cette période.
 2. Du 15 décembre à fin février, de la neige est produite, si les conditions météorologiques le permettent, pour maintenir une épaisseur totale de neige sur la piste de 60 cm.
 3. Après le 1^{er} mars, il n'y a plus de production.

- 13 Les chroniques d'enneigement sur la période 1958-2016 ont pu ainsi être calculées en chaque point du domaine skiable. Pour chaque station, et pour chaque hiver, on peut calculer la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables, et le volume d'eau nécessaire associé.
- 14 La fiabilité de l'enneigement des domaines skiables est un indice défini comme étant la proportion du domaine skiable qui présente une quantité de neige d'au moins 100 kg m^{-2} (équivalent à 20 cm de neige damée à 500 kg m^{-3}) en tenant compte de la neige naturelle, de l'adjonction de neige de culture et du damage de l'ensemble. Il prend donc en compte la représentation spatiale du domaine skiable et la variabilité interne au domaine skiable des conditions d'enneigement. Cet indice quotidien de caractérisation de l'enneigement est calculé pour chaque journée entre le 1^{er} novembre et le 15 mai. La moyenne de cet indice est calculée (chaque année) pour la période des vacances de Noël (20 décembre – 5 janvier) et pour la période des vacances scolaires d'hiver (5 février – 5 mars) en prenant la moyenne des indices quotidiens pour chaque période. L'indice de fiabilité annuel d'une station est défini comme la combinaison de l'indice sur les vacances de Noël (pondération de 10 %) et de l'indice sur les vacances scolaires d'hiver (pondération de 90 %). Cet indice a été baptisé « vacances combinées ». Ces indicateurs ont été calculés pour les conditions d'enneigement de neige naturelle, de neige naturelle damée et de neige naturelle damée avec le taux d'équipement en neige de culture actuel ou futur.
- 15 Le volume d'eau nécessaire pour la production de neige de culture est calculé à partir de la production simulée par le modèle pour tout le domaine skiable. La surface exacte de piste est prise en compte pour permettre la comparaison avec les volumes d'eau fournis par chaque station sur la période passée.

Estimation de la ressource en eau

- 16 La ressource en eau a été calculée au niveau de chaque ouvrage de prélèvement pour la neige de culture et de manière plus globale sur l'ensemble des bassins versants impactés hydrologiquement par les installations d'enneigement. Les phénomènes hydrologiques sont très complexes, d'autant plus en montagne où les composantes nivales et glaciaires peuvent avoir une place prépondérante par rapport à une hydrologie de « plaine ». Les zones d'altitude sont généralement très pauvres en suivi et instrumentation des ressources en eau : il n'y a que peu d'endroit où il est possible d'accéder directement à la connaissance de la ressource. Ailleurs, il est nécessaire de l'extrapoler à partir d'informations plus lointaines ou de la reconstituer en prenant en compte les phénomènes hydrologiques qui la gouvernent.
- 17 Le choix a ainsi été fait de recourir à la modélisation hydrologique pour assurer deux objectifs :
- Être capable de fournir une estimation de débits disponibles sous forme de chronique, au droit des prises d'eau existantes ou envisagées pour la neige de culture,
 - Pouvoir estimer l'impact du changement climatique sur la ressource.
- 18 Il ne s'agit donc pas de simplement modéliser un débit au niveau d'une station hydrométrique, mais d'être capable de proposer un modèle qui soit robuste pour réaliser des transpositions de bassin versant ou vis-à-vis de l'utilisation de forçages climatiques différents de ce qui est actuellement observable.

- 19 Du fait de la forte composante nivale de l'hydrologie sur ces secteurs de montagne, le modèle hydrologique utilisé doit avoir un module neige de qualité suffisante. Nous avons retenu le modèle GR4J (développé à l'INRAE) qui permet de simuler au pas de temps journalier des débits à partir de séries de précipitations et d'évapotranspiration et qui peut être couplé au module de neige Cemaneige (Valéry 2010). Cemaneige permet de simuler au pas de temps journalier l'évolution du couvert neigeux sur un bassin versant et d'en estimer sa fonte, en discrétisant ce bassin en bandes d'altitude. Pour chaque bassin versant étudié, ce découpage altitudinal (hypsométrie) a été calculé à partir de son extension (déterminée en fonction de la topographie et de la géologie pour les formations aquifères) et d'un modèle numérique de terrain. Ce modèle hydrologique est alimenté à partir des mêmes données météorologiques SAFRAN utilisées pour la modélisation des conditions d'enneigement des domaines skiables, que ce soit sous climat actuel ou pour les extrapolations sous climat futur. Les données SAFRAN (disponibles par pas de 300 m en altitude) sont choisies pour être les plus proches de l'altitude médiane du bassin. Elles sont ensuite recalculées par le modèle hydrologique sur chaque bande d'altitude en utilisant un gradient altitudinal pour les températures et les précipitations, et fractionnées entre la pluie ou la neige selon la température sur la tranche d'altitude considérée.
- 20 Pour chaque bassin versant étudié, le modèle est calé sur une station hydrométrique pertinente, puis transposé à l'endroit où la ressource doit être estimée. Le calage des modèles a été fait de manière à maximiser leur potentiel de transposabilité, quitte à sacrifier un peu sur la qualité du calage. En effet, plus que de représenter exactement l'existant, c'est surtout l'évolution entre les régimes hydrologiques actuels et futurs qui nous intéresse. Ainsi, pour le modèle GR4J, nous avons supprimé la capacité d'échange d'eau entre bassins. Pour Cemaneige, nous avons aussi imposé des bornes sur le coefficient du modèle degré-jour K_f (entre 2 et 6 mm/°C/jour – Valéry *et al.*, 2014), afin que le modèle ne sur-réagisse pas à l'augmentation de température futur. Le critère d'optimisation retenu est généralement la maximisation de l'Efficienne KGE2 de Kling-Gupta (Gupta *et al.*, 2009), appliqué sur la racine carrée des débits afin de privilégier une bonne représentation des étiages. Chaque domaine skiable a ainsi nécessité une étude spécifique pour déterminer les points de prélèvements en eau (pour la neige de culture, mais aussi pour les autres usages) et les bassins versant associés.
- 21 Des chroniques de débit au pas de temps journalier ont alors été calculées sur la période d'observation météorologique (1958-2016) et sur la période de projection climatique (1950-2100). Cette estimation de la ressource peut alors être comparée à la demande en eau, que ce soit celle des installations d'enneigement, mais aussi des autres usages : milieu, eau potable, hydroélectricité.

Prise en compte du changement climatique

- 22 Les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 d'évolution du climat utilisés dans les récents rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) ont été utilisés dans ce travail (IPCC, 2014, Hoegh-Guldber *et al.*, 2018 ; Hock *et al.*, 2019). Ces deux scénarios couvrent une gamme pertinente d'évolution des concentrations mondiales de gaz à effet de serre pour le XXI^e siècle (O'Neill *et al.*, 2014). Le scénario RCP 4.5 suppose la mise en place de politiques climatiques menant à la stabilisation, à

l'échelle mondiale, des émissions de gaz à effet de serre au milieu du XXI^e siècle tandis que le RCP 8.5 traduit une poursuite de la croissance de ces émissions (IPCC, 2014).

- 23 Le changement climatique, phénomène planétaire, n'aura pas les mêmes impacts ni les mêmes amplitudes en tout point du globe. Il faut donc « régionaliser » les simulations réalisées à l'échelle de la planète pour modéliser des comportements météorologiques futurs les plus proches de ce qu'on peut attendre sur les montagnes iséroises. Afin d'alimenter le modèle Crocus-Resort et les modèles hydrologiques, les chroniques météorologiques horaires sur la période 1950-2100, spatialisées sur les massifs, ont été calculées grâce à la méthode ADAMONT développée par Verfaillie *et al.* (2017), en utilisant la réanalyse SAFRAN comme base d'observation pour la période 1960-1990. Afin de couvrir les incertitudes associées aux évolutions possibles du climat dans les décennies à venir, nous avons utilisé treize scénarios climatiques distincts, composés chacun du couple d'un modèle global avec un modèle régional (voir Verfaillie *et al.*, 2018 et Spandre *et al.*, 2019, pour la liste des modèles utilisés).
- 24 Les évolutions du climat attendues dans les trente ans à venir dépendent plus de l'historique que des perspectives d'émissions de GES et s'avèrent assez indépendantes du scénario climatique envisagé à l'échéance 2050. Les deux scénarios divergent en revanche davantage sur la période 2050-2100 (Hock *et al.*, 2019).

Résultats

Caractérisation de l'enneigement et de sa fiabilité

- 25 L'approche mise en œuvre permet de cartographier sur le domaine skiable, la hauteur de neige ou la durée d'enneigement, pour différentes configurations (neige naturelle, neige damée ou utilisation de la neige de culture ; Figure 3).

Figure 3 - Durée d'enneigement avec un minimum de 20 cm de neige damée au sol dans les conditions climatiques actuelles et à échéance 2050 sans et avec neige de culture, sur le domaine skiable des Sept-Laux

- 26 [Image non convertie]
La situation avec neige de culture tient compte de l'évolution des équipements entre la période actuelle et à échéance 2050.
M. Gerbeaux, P. Spandre, H. François, E. George, S. Morin, 2020.
- 27 Ces cartographies permettent de mettre en évidence les zones plus ou moins enneigées du domaine, ou plus ou moins sensibles aux effets du changement climatique, ainsi que l'apport de la neige de culture pour augmenter la durée où la piste est enneigée, et la bonne résistance de cette neige artificielle face aux températures plus élevées.
- 28 La fiabilité de l'enneigement est intégrée sur chaque domaine skiable (figure 4).

Figure 4 - Évolution de l'indice de fiabilité de l'enneigement (lissée sur 15 ans) sur le domaine skiable des Sept-Laux

29 [Image non convertie]

M. Gerbeaux, P. Spandre, H. François, E. George, S. Morin, 2020.

À gauche, pour l'ensemble du domaine avec le taux d'équipement actuel en neige de culture, à droite, en supposant que tout le domaine est équipé d'installations de neige de culture. La courbe bleue illustre le scénario climatique RCP 4.5, la courbe rouge le scénario 8.5. Les enveloppes autour des courbes représentent la variabilité des 13 couples de modèles climatiques utilisés (écart type). Le graphique se lit de la manière suivante : à échéance 2050, avec le taux d'équipement en neige de culture actuel, il y a une chance sur 2 d'avoir au moins 88 % du domaine enneigé pendant les périodes cibles de calcul de l'indice (congés scolaires), ou bien 9 chances sur 10 d'avoir au moins 60 % du domaine enneigé pendant ces périodes. La partie droite montre que sur les zones enneigées artificiellement, les résultats du modèle indiquent que la présence de neige sur ces périodes est quasiment assurée jusqu'en 2060, puis le changement climatique devient trop marqué pour assurer totalement une fiabilité maximale, avec des divergences qui deviennent plus marquées sur la fin du XXI^e siècle.

- 30 Les projections climatiques indiquent que les différents massifs isérois devraient subir des impacts comparables à altitude égale. La discrimination majeure entre les massifs réside donc sans doute plutôt dans l'altitude des stations (Figure 1) que dans les conditions nivo-météorologiques.

Table 1 - Indice de fiabilité de l'enneigement sur la période récente et sur la Période future

	Sans neige de culture			Avec production de neige de culture		
	Pire saison sur 10	Médiane	Meilleure saison sur 10	Pire saison sur 10	Médiane	Meilleure saison sur 10
Période récente (2001 - 2016)	49	75	93	57	79	94
Période future (autour de 2050)	29	60	86	58	75	90

M. Gerbeaux, P. Spandre, H. François, E. George, S. Morin, 2020.

- 31 La Table 1 présente l'indice de fiabilité, agrégé à l'échelle du Département, de la saison de plus faible enneigement sur dix ans, de la saison de plus fort enneigement sur dix ans, ainsi que la médiane, pour la période récente (2001-2016) et la période future (autour de 2050). Sur la période récente, la production de neige de culture améliore nettement la fiabilité des saisons de déficit d'enneigement (de 49 % à 57 %) tandis qu'elle a peu d'impact sur la fiabilité des saisons de bon enneigement (93 % à 94 %). Sur l'ensemble des stations de l'Isère, la fiabilité médiane de l'enneigement est de 75 % sans neige de culture et 79 % avec.
- 32 Pour le milieu du XXI^e siècle, la fiabilité de l'enneigement des saisons de déficit passerait de 49 % à 29 % sans neige de culture et la médiane de 75 % à 60 %. Avec les évolutions attendues de l'équipement en neige de culture d'ici à 2025, la fiabilité des

saisons de déficit d'enneigement serait stabilisée (57 % et 58 %), tandis que la baisse de la fiabilité médiane (passant de 79 à 75 %) et des saisons de plus fort enneigement (passant de 94 à 90 %) serait limitée par l'apport de neige de culture. Il est intéressant de noter que la fiabilité médiane de l'enneigement en 2050 avec neige de culture serait équivalente à ce qu'elle est sur la période récente sans neige de culture (75 %). Un des enseignements importants de cette étude est que dans les décennies à venir, d'après les projections climatiques utilisées, il restera généralement possible de continuer à produire de la neige de culture (les créniaux de froid diminueront, mais il en existera toujours assez dans le schéma de production actuel).

Évolution de la demande en eau

- 33 Sur la période 2001-2016, la demande en eau pour la neige de culture simulée est très cohérente avec les données de consommation d'eau fournies par les domaines skiables, passant de 600 000 m³ au début des années 2000 à 1.6 Mm³ en 2016 (Figure 5). Au cours des trente dernières années, la progression de la surface équipée en neige de culture a été le principal moteur de la croissance de la consommation en eau. Cette demande étant différente chaque année, nous avons généralement retenu pour le dimensionnement des installations le quantile 90 %, c'est-à-dire un volume d'eau qui permet d'assurer les besoins pour la neige de culture 9 années sur 10, une sécurisation à 100 % étant souvent hors d'atteinte du fait de quelques saisons très sèches ou trop chaudes comme 2006-2007 (sur les stations des Préalpes, passer d'une sécurisation de 90 % à 100 % implique de doubler le volume d'eau à disposer).

Figure 5 - Estimation des volumes d'eau employés pour la production de neige de culture dans le Département de l'Isère sur la période 2001-2016 et simulations par notre méthode

- 34 [Image non convertie]
M. Gerbeaux, P. Spandre, H. François, E. George, S. Morin, 2020.
- 35 À échéance 2050, les projections indiquent que les besoins en eau augmenteront d'environ 15 % par rapport à la période 2001-2016, pour alimenter en moyenne 9 années sur 10 les équipements en neige de culture (tels qu'ils sont envisagés à l'échéance 2025), soit de l'ordre de 3.5 Mm³/an à 3.8 Mm³/an selon les scénarios climatiques (figure 6).

Figure 6 - Évolution future de la demande en eau agrégée à l'échelle du Département de l'Isère pour sécuriser les pistes enneigées artificiellement, sur la base d'un taux d'équipement fixe égal à celui qui serait atteint ces prochaines années (« horizon 2025 »)

- 36 [Image non convertie]
M. Gerbeaux, P. Spandre, H. François, E. George, S. Morin, 2020.
- 37 Rappelons que ces graphiques servent avant tout à illustrer la seule part du changement climatique dans l'évolution de la demande en eau, en faisant abstraction des évolutions de surface enneigées artificiellement (fixées ici à 854 ha, soit 42 % des surfaces skiables actuelles du département). Ils ne préjugent ainsi pas de nouvelles surfaces qui pourraient être équipées en neige de culture dans le futur (projets non-connus à ce jour), qui, mécaniquement, feraient augmenter la demande en eau.

- 38 À surfaces équipées constantes, les augmentations de la demande individuelle des stations induites par le changement climatique sont assez homogènes par massif ($\approx 15\%$ sur Belledonne, $\approx 10\%$ sur l'Oisans et Grandes Rousses, $\approx 22\%$ sur le Vercors et $\approx 20\%$ sur la Chartreuse).
- 39 L'impact du changement climatique sur la demande en eau reste finalement relativement contenu alors que le manteau neigeux naturel pâtit fortement du réchauffement projeté par tous les modèles de climat dans les décennies à venir (Verfaillie *et al.*, 2018). Ceci s'explique en partie par les pratiques de production de la neige de culture dans la mesure où la majeure partie est produite dans tous les cas en début de saison afin de constituer une sous-couche, quelles que soient les conditions d'enneigement naturel pour la suite de la saison.

Évolution de la ressource en eau et adéquation ressource-besoins

- 40 Nous avons croisé, pour chacune des stations, les observations ou les projections de la ressource en eau disponible avec les besoins pour la neige de culture, ceux pour les autres usages recensés au voisinage (eau potable, hydroélectricité) et les besoins du milieu (débits réservés).
- 41 Sur les 24 domaines skiables du Département de l'Isère, il y a actuellement peu de cas avérés de conflits d'usages identifiés, si ce n'est pour une station où l'hydroélectricité est assez développée à l'aval (un prélèvement plus important en hiver pourrait constituer un manque à gagner pour les usiniers). Les stations ont développé ces dernières années des projets pour s'affranchir des prélèvements quand la ressource n'est pas disponible (étiage hivernal) ou qu'elle est à partager entre plusieurs usages. Les projets de neige de culture de ces dernières années ou ceux prévus pour les prochaines années (échéance 2025) sont souvent gouvernés par la volonté de disposer d'une plus grande capacité de production instantanée (notamment en début de saison où les créneaux de production sont critiques car peu nombreux par rapport au besoin de production) et pour réduire la dépendance aux remplissages hivernaux, sauf si la ressource hivernale apparaît abondante par rapport aux besoins (Lans-en-Vercors, Saint-Hilaire-du-Touvet, Alpe-du-Grand-Serre). Plusieurs stratégies ont été ou sont ainsi mises en œuvre :
- Création de nouvelles ou plus grosses retenues si le terrain s'y prête (Deux-Alpes, Villard-de-Lans) ;
 - Aller chercher l'eau « loin » sur des ressources apparaissant comme « inépuisables » par rapport aux besoins, par exemple grands barrages hydro-électriques (Oz-Vaujany, Alpe d'Huez) ;
 - Sur le Vercors où la ressource de surface est peu abondante et où l'alimentation se fait par le réseau d'adduction d'eau potable sur des ressources profondes ou plus lointaines, c'est plus la capacité du réseau qui est limitante que la disponibilité de la ressource (Villard-de-Lans, Méaudre, Autrans).
- 42 D'après les enquêtes de terrain et les estimations de volumes nécessaires pour la production, on constate aussi que les volumes de neige de culture produits correspondent généralement au besoin de fiabilisation, selon les modes de production et de gestion actuels (lieux de production et pilotage des installations, damage). En général, les volumes produits permettent directement une amélioration de la fiabilité

de l'enneigement, même si des pertes ne sont pas encore toujours techniquement contrôlables au niveau de l'enneigeur.

- 43 Pour le futur (échéance 2050 pour ces résultats, les tendances se renforçant davantage pour la fin du XXI^e siècle), on constate globalement les évolutions suivantes dans les régimes hydrologiques simulés en utilisant les projections climatiques disponibles, qui sont bien entendu modulées selon les massifs et les altitudes, mais aussi les fonctionnements hydrologiques et hydrogéologiques :
- Le pic de fonte nivale au printemps sera moins marqué et aura lieu un peu plus tôt dans la saison.
 - Les étiages hivernaux seront moins marqués, voire ne seront plus visibles pour les cours d'eau les plus bas en altitude (bassin versant en dessous de 1500 m) : davantage de pluie à la place de la neige, fonte plus importante du manteau neigeux du fait de l'augmentation de température.
 - La ressource en eau en période hivernale augmentera de 30 à 100 % selon les bassins. Les étiages estivaux seront plus marqués, du fait d'une évapotranspiration plus forte et d'un moindre soutien de la fonte des neiges en fin de printemps/été.
 - Le volume annuel écoulé n'est quant à lui quasiment pas modifié par le changement climatique : les ressources en eau sont peu modifiées, si on raisonne à l'échelle de l'année.

Figure 7 - Exemple d'évolution du régime hydrologique de la Gresse au niveau de la prise d'eau alimentant le réseau de culture du domaine skiable de Gresse-en-Vercors

44 [Image non convertie]

Les courbes pour les différents quantiles représentent, pour chaque jour de l'année, le débit que l'on peut espérer avoir au minimum avec la probabilité correspondante.

M. Gerbeaux, P. Spandre, H. François, E. George, S. Morin, 2020.

- 45 Les projections sur la fonte printanière et les écoulements estivaux indiquent qu'ils seront en général suffisants dans le futur pour remplir les retenues collinaires avant la saison hivernale, ces volumes écoulés étant très largement supérieurs aux capacités de stockage. En revanche, à capacité de retenue constante (qui est pour tous les domaines, inférieure au volume d'eau généralement utilisé sur une saison), l'augmentation de la demande impliquera davantage de remplissages hivernaux que sous climat actuel. La ressource supplémentaire hivernale en eau disponible sous forme liquide (30 à 100 % selon les bassins) sera supérieure à l'augmentation de la demande induite par le changement climatique (à surfaces enneigées artificiellement constantes). Ces remplissages complémentaires hivernaux devraient ainsi être généralement possibles, mais, pour quelques stations, cette ressource additionnelle ne serait pas forcément toujours prélevable :
- En haute altitude (Deux Alpes, Oz-Vaujany), les débits réservés ne seront pas davantage satisfaits qu'actuellement : malgré le réchauffement, les températures restent trop basses pour que le manteau neige fonde suffisamment en plein hiver. Ces stations sont en train de s'orienter vers d'autres ressources ou envisagent d'accroître leur capacité de retenues pour stocker l'intégralité de leur besoin avant le début de la saison hivernale.
 - Dans certaines stations, les arrêtés de prélèvements actuels limitent en quantité ou interdisent les prélèvements sur la période hivernale, sans référence aux débits écoulés (Alpe d'Huez, Sept-Laux).

- 46 Globalement, à échéance 2050, et sur la base des surfaces équipées en neige de culture à l'horizon 2025, l'adéquation ressource-besoins ne sera en général pas dégradée par rapport à la situation actuelle.

Discussion et conclusions

- 47 Ce travail pose les bases d'une approche intégrée de la modélisation des enjeux liés à l'articulation du cycle de l'eau dans les domaines skiables et des conditions d'exploitation de ces domaines, en prenant en compte de façon la plus complète possible les outils et méthodes de projection de l'impact du changement climatique en montagne.
- 48 Chaque gestionnaire de domaine skiable de l'Isère dispose désormais d'éléments pour analyser l'enneigement futur de son domaine, que ce soit en termes de fiabilité de l'enneigement naturel, des possibilités de sécurisation (et des limites) par la neige de culture en fonction du contexte climatique local et de la disponibilité de la ressource en eau. Notre étude ne fixe pas de seuil en dessous duquel la fiabilité d'une station est en péril : selon le mode de fonctionnement, la clientèle et l'emplacement des stations, les niveaux d'enneigement nécessaires à leur fonctionnement sont variables, et il appartient aux gestionnaires comme aux collectivités d'analyser spécifiquement la pertinence des choix d'aménagement au regard des enjeux et caractéristiques propres à chaque station.
- 49 Au-delà de la gestion des domaines skiables, cette étude vise aussi à nourrir le débat public autour de la question de la neige de culture et de la gestion de la ressource en eau dans un contexte de climat changeant. Ces sujets sont souvent passionnels dans le débat public et s'appuient souvent sur des éléments peu étayés ou anciens. Par exemple, l'extrapolation de l'enneigement dans le futur sur les domaines skiables a souvent été faite en faisant référence à un manteau neigeux naturel, sans prendre en compte le travail de damage et la neige de culture (Hoegh-Guldberg, 2018). Par ailleurs, le débat sur l'utilisation de la ressource fait encore souvent appel à des époques où les prélèvements se faisaient directement dans les cours d'eau sans retenue tampon ni respect de débits réservés et avaient donc de forts impacts sur les milieux naturels.
- 50 Cette étude apporte ainsi des éléments objectifs dans ces débats, d'une part, en descendant à des échelles très locales (au sein des domaines skiables), et d'autre part, par la méthodologie employée, développée spécifiquement pour répondre à ces questions autour de la neige de culture. L'analyse montre que l'enneigement des zones couvertes par de la neige de culture est fortement amélioré par rapport à l'enneigement des zones gérées uniquement par le damage, ou sans gestion de neige. Elle montre que, pour les stations iséroises, la disponibilité de la ressource en eau ne semble pas le point le plus délicat pour la mise en œuvre de la neige de culture au cours du XXI^e siècle.
- 51 Cette méthodologie serait assez facilement reproductible sur d'autres domaines skiables : les modèles sont développés, les données climatiques ou hydrologiques existent. Si dans les grandes lignes on pourrait s'attendre à des résultats similaires sur l'évolution dans les prochaines décennies de la demande en eau pour la neige de culture et l'évolution conjointe de la ressource en eau dans les milieux, il ne faut pas oublier que l'adéquation ressource-besoin ne peut être que le fruit d'une étude locale,

intégrant les modes d'alimentation en eau des installations de neige de culture (milieu et altitude du prélèvement) et de gestion du stock (disponibilité de retenues de stockage, schéma de production de la neige au cours de la saison). La « relativement bonne » adéquation ressource-besoins observée dans le département de l'Isère n'est ainsi pas transposable automatiquement sur d'autres régions ou d'autres domaines skiables.

52 Plusieurs questions, dépassant largement le cadre de cette étude, restent posées, notamment dans le domaine de l'économie et de la gouvernance des stations de sports d'hiver. On pourrait entre autres citer dans le domaine de l'eau :

- La prise en compte du volet qualitatif de l'eau alors que les transferts d'eau sont de plus en plus importants et de plus en plus lointains : quelle est la qualité d'eau rejetée sur les têtes de bassin quand cette dernière est parfois remontée de zones situées assez en aval, donc potentiellement davantage vulnérables à des pollutions anthropiques ?
- La prise en compte de la consommation énergétique dans les transferts d'eau depuis leur lieu de prélèvement jusqu'en entrée d'installation de production de neige.
- La question de l'évolution de la réglementation dans un contexte de climat changeant : dans quelle mesure les arrêtés d'autorisation de prélèvement en eau doivent-ils évoluer ou être révisés si la distribution de la ressource en eau au cours de l'année évolue ?
- Sur le plan hydrologique, au-delà de la question des prélèvements, cette étude ne traite pas dans le détail de la perturbation induite sur les écoulements par la neige de culture et le travail de la neige au sein des bassins versants supports de station de sports d'hiver. Cette question, fortement controversée, du décalage temporel de la « restitution au milieu » de l'eau utilisée pour la production de neige de culture, demeure ouverte et pourrait faire l'objet d'études ultérieures pour affiner cette connaissance, par exemple en utilisant concomitamment le modèle Crocus à la fois pour l'estimation de l'enneigement sur piste et du besoin en eau associé, mais aussi pour estimer le devenir de l'eau de fonte de la neige sur et autour des pistes. On pourrait ainsi s'intéresser à la perturbation fine du cycle de l'eau à l'échelle de tout ou partie d'un domaine skiable (de l'échelle d'une portion de piste de ski à celle du bassin versant en amont du domaine skiable), en s'interrogeant sur la période de référence dans un contexte de climat changeant : le manteau neigeux incluant la neige de culture fond certes plus tardivement que le manteau neigeux naturel qu'elle conforte, mais fond-il finalement plus tardivement que le manteau neigeux naturel d'il y a quelques décennies (avec ou sans damage) ? Un couplage direct de Crocus à la place de Cemaneige avec le modèle hydrologique pourrait permettre plus de précision sur ces études fines.

53 L'enjeu central de cette démarche consisterait ainsi à parvenir à une simulation intégrée de l'hydrologie des bassins versant des stations de sports d'hiver en prenant explicitement en considération la dynamique et les modalités de gestion de la neige.

BIBLIOGRAPHIE

Abegg B., Agrawala S., Crick F., de Montfalcon A., 2007.- "Climate change impacts and adaptation in winter tourism", in *Climate Change in the European Alps*, edited by : Agrawala, S., OECD Paris, 25-60, <https://doi.org/10.1787/9789264031692-en>

Abegg B., Morin S., Demiroglu O. C., François H., Rothleitner M., Strasser U., 2020.- "Overloaded ! Critical revision and a new conceptual approach for snow indicators in ski tourism", *Int. J. Biometeorol.*, <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01867-3>,.

Brun E., David P., Sudul M., Brunot G., 1992.- "A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting", in *J. Glaciol.*, 38, 13-22.

Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E., 1993.- "A meteorological estimation of relevant parameters for snow models", in *Ann. Glaciol.*, 18, 65-71.

Durand Y., Giraud G., Laternser M., Etchevers P., Mérindol L., Lesaffre B., 2009a.- "Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958-2005) : Climatology and Trends for Snow Cover", in *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 48, 2487-2512, <https://doi.org/10.1175/2009JAMC1810.1>

Durand Y., Giraud G., Laternser M., Etchevers P., Mérindol L., Lesaffre B., 2009b.- "Reanalysis of 44 Yr of Climate in the French Alps (1958-2002) : Methodology, Model Validation, Climatology, and Trends for Air Temperature and Precipitation", in *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 48, 429-449, <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1808.1>

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

François H., Morin S., Spandre P., Lafaysse M., George-Marcelpoil, E., 2016.- « Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socioéconomiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche et application aux Alpes françaises », in *La Houille Blanche*, 4.

Gerbaux M., Genthon C., Etchevers P., Vincent C., Dedieu J.P., 2005.- "Surface mass balance of glaciers in the French Alps : Distributed modelling and sensitivity to climate change", in *J. Glaciol.*, 51, 561-572.

Gupta H. V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F., 2009.- "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling", in *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

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.)]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/06_SROCC_Ch02_FINAL.pdf.

Hoegh-Guldberg O., Jacob D., Taylor M., Bindi M., Brown S., Camilloni I., Diedhiou A., Djalante R. Ebi K.L., Engelbrecht F., Guiot J., Hijikata Y., Mehrotra S., Payne A., Seneviratne S.I., Thomas A., Warren R., Zhou G., 2018.- "Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems ». In : "Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C

above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty” [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., Waterfield T. (eds.)]

IPCC, 2014.- “ Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change” [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R., White L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

Lafaysse M., Hingray B., Etchevers P., Martin E., Obled C., 2011.- “Influence of spatial discretization, underground water storage and glacier melt on a physically based hydrological model of the Upper Durance River basin”, in *Journal of Hydrology*, 403, 116 - 129.

Martin E., Brun E., Durand Y., 1994.- “Sensitivity of the French Alps snow cover to the variation of climatic variables”, in *Annales Geophysicae*, 12, 469-477.

O'Neill B.C., Kriegler E., Riahi K., Ebi K. L., Hallegatte S., Carter, T. R., Mathur R., van Vuuren D.P., 2014.- “A new scenario framework for climate change research : the concept of shared socioeconomic pathways”, in *Climatic Change*, 122(3) :387400.

Spandre P., 2016. « Observation et modélisation des interactions entre conditions d'enneigement et activité des stations de sports d'hiver dans les Alpes françaises », PhD, Université Grenoble Alpes.

Spandre P., François, H., Morin, S., George-Marcelpoil, E., 2015.- “Snowmaking in the French Alps. Climatic context, existing facilities and outlook”, in *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, 103-2, <https://doi.org/10.4000/rga.2913>

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

Spandre P., Morin S., Lafaysse M., George-Marcelpoil E., François, H., Lejeune, Y., 2016.- “Integration of snow management in a detailed snowpack model”, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 125, 48-64, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.01.002>

Steiger R., Mayer M., 2008.- “Snowmaking and climate change : Future options for snow production in Tyrolean ski resorts”, in *Mt. Res. Dev.*, 28, 292-298, <https://doi.org/10.1659/mrd.0978>

Steiger R., Scott D., Abegg B., Pons M., Aall C., 2017.- “A critical review of climate change risk for ski tourism”, in *Curr. Issues Tour.*, 1-37, <https://doi.org/10.1080/13683500.2017.1410110>

Valéry A., 2010.- « Modélisation précipitations - débit sous influence nivale - élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants », in thèse de doctorat Agro Paris Tech, 405 pp

Valéry A., Andréassian, V., Perrin, C., 2014.- “As simple as possible but not simpler : What is useful in a temperature-based snow-accounting routine ? Part 2 - Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments”, in *Journal of Hydrology*, 517(0) : 1176-1187, doi : 10.1016/j.jhydrol.2014.04.058.

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”, in *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257–4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>

Verfaillie D., Lafaysse M., Déqué M., Eckert N., Lejeune Y., Morin S., 2018.– “Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps”, in *The Cryosphere*, 12, 1249–1271, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018>

Vionnet V., Brun E., Morin S., Boone A., Faroux S., Le Moigne P., Martin E., Willemet J.-M., 2012.– “The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.”, in *Geosci. Model Dev.*, 5, 773–791, <https://doi.org/10.5194/gmd-5-773-2012>

RÉSUMÉS

Cette étude présente l'évolution de la fiabilité de l'enneigement des 24 domaines de ski alpin du département de l'Isère sur les dernières années et sa projection au XXI^e siècle en prenant en compte le damage et la neige de culture. La demande en eau pour sécuriser l'enneigement est ainsi calculée et peut être comparée aux modélisations de disponibilité de la ressource en eau, reconstituée avec un modèle hydrologique, en climats actuel et futur. Sur la période récente, la production de neige de culture améliore nettement les conditions d'enneigement des saisons de déficit d'enneigement. Pour le milieu du XXI^e siècle, les projections climatiques indiquent que l'évolution attendue des équipements de neige de culture d'ici à 2025 devrait permettre de stabiliser la fiabilité de l'enneigement des saisons marquées par un déficit de précipitations naturelles. À taux d'équipement constant, l'évolution de la demande en eau liée au changement climatique est de l'ordre de +15 % en moyenne sur l'Isère, entre la période récente et le milieu du XXI^e siècle. L'étude indique que la pression sur la ressource en eau n'est pas le point le plus délicat pour la mise en œuvre de la neige de culture, à l'échelle des bassins versants dans lesquels les stations iséroises sont situées.

This study presents the evolution of the snow reliability in the 24 alpine ski resorts of the Isère département (Northern French Alps, around Grenoble) over the last decades and its projection into the 21st century, taking into account grooming and snowmaking. The water demand for snowmaking is calculated and can be compared with hydrological simulations of water resource availability, under current and future climate conditions. Over the recent period, snowmaking has significantly improved the snow conditions in seasons with a natural snow deficit. For the middle of the 21st century, climate projections indicate that the expected evolution of snowmaking infrastructure by 2025 should make it possible to stabilize the snow reliability in seasons characterized by a deficit of natural snowfall. At a constant equipment rate, the evolution of water demand due to climate change is of the order of +15% on average in Isère between the recent period and the middle of the 21st century. The study shows that the pressure on water resources appears to not be the most critical point for the implementation of snowmaking, at the scale of the catchment basins in which the Isère ski resorts are located.

INDEX

Mots-clés : neige de culture, ressource en eau, changement climatique, fiabilité de l'enneigement, tourisme hivernal

Keywords : snowmaking, water resources, climate change, snow reliability, ski tourism

AUTEURS

MARTIN GERBAUX

Scopeau – NaturaScop
martin.gerbaux@scopeau.fr

PIERRE SPANDRE

Univ. Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM, Grenoble, France. Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, 38000 Grenoble, France.
PSpandre@tignes.net

HUGUES FRANÇOIS

Univ. Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM, Grenoble, France.
hugues.francois@inrae.fr

EMMANUELLE GEORGE

Univ. Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM, Grenoble, France.
emmanuelle.george@inrae.fr

SAMUEL MORIN

Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, 38000 Grenoble, France.
samuel.morin@meteo.fr