



Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine

103-2 | 2015

Impact du changement climatique sur les dynamiques des milieux montagnards

Dynamique de la neige de culture dans les Alpes Françaises

Contexte climatique et état des lieux

Pierre Spandre, Hugues François, Samuel Morin et Emmanuelle George-Marcelpoil



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rga/2840>

DOI : [10.4000/rga.2840](https://doi.org/10.4000/rga.2840)

ISSN : 1760-7426

Traduction(s) :

Snowmaking in the French Alps - URL : <https://journals.openedition.org/rga/2913> [en]

Éditeur :

Association pour la diffusion de la recherche alpine, UGA Éditions/Université Grenoble Alpes

Référence électronique

Pierre Spandre, Hugues François, Samuel Morin et Emmanuelle George-Marcelpoil, « Dynamique de la neige de culture dans les Alpes Françaises », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 103-2 | 2015, mis en ligne le 07 septembre 2015, consulté le 08 décembre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rga/2840> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.2840>

Ce document a été généré automatiquement le 8 décembre 2022.



Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International - CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Dynamique de la neige de culture dans les Alpes Françaises

Contexte climatique et état des lieux

Pierre Spandre, Hugues François, Samuel Morin et Emmanuelle George-Marcelpoil

NOTE DE L'AUTEUR

Remerciements

Nous remercions le président de l'ADSP B. Blanc et l'organisateur de l'AG annuelle C. Perretier pour nous avoir invités et soutenus, en particulier en nous fournissant les contacts de leurs adhérents. Nous remercions les stations de sport d'hiver ayant répondu à notre enquête ainsi que M. Lafaysse (CNRM-GAME/CEN) pour ses suggestions et commentaires pertinents sur ce travail. Nous remercions également les deux relecteurs anonymes pour leurs commentaires détaillés et constructifs.

La Région Rhône-Alpes (Arc Environnement) finance le travail de doctorat de P. Spandre, auquel ont également contribué la Fondation Eau, Neige & Glace et le LabEx OSUG@2020 (ANR10 LABX56). Le CNRM-GAME/CEN et Irstea sont membres du LabEx OSUG@2020 (ANR10 LABX56).

Introduction

- 1 Le tourisme de sports d'hiver est aujourd'hui une attraction majeure dans les Alpes françaises en même temps qu'un moteur économique. Dans les années 1970, des stations « ex-nihilo », complexes bâtis sur des sites vierges de toute habitation ou village préexistants, ont été créées dans les montagnes françaises pour répondre à une demande croissante de tourisme de masse suscitée par la transformation sociale alors en cours. Le modèle a fonctionné et peu à peu les équilibres économiques se sont inversés en faveur des stations d'altitude devenues des pôles de croissance face au

déclin des activités des vallées (George-Marcelpoil *et al.*, 2012a). En 2013, 7 milliards d'euros et 120 000 emplois ont été générés par ce secteur touristique (DSF, 2014), dont les domaines skiables sont les piliers en assurant l'accès à l'activité phare (le ski), la sécurité et le confort des visiteurs (Guily, 1991).

- 2 A la fin des années 1980, ce marché a connu pour la première fois des revers économiques importants (Lorit, 1991 et Pascal, 1993) en raison de plusieurs hivers faiblement enneigés successifs (Durand *et al.*, 2009b). La neige de culture est alors apparue comme la meilleure stratégie d'adaptation face à la variabilité interannuelle d'enneigement et aux effets du changement climatique (Steiger *et al.*, 2008). Elle s'est rapidement répandue dans les Alpes françaises pour atteindre 20 % de la surface des pistes en 2009 en France d'après Badré *et al.* (2009). Perçue au départ comme un signe de faiblesse, la neige de culture est peu à peu devenue l'assurance d'un séjour réussi « quoi qu'il advienne » pour les skieurs (Paccard, 2011). Elle est aujourd'hui l'objet de nombreuses interrogations sur l'équilibre de la « garantie neige » avec la charge économique qu'elle fait peser sur les domaines skiables ou encore sur les enjeux environnementaux de gestion de l'eau (Magnier, 2013) ou des risques associés à l'aménagement de la montagne (Evette *et al.*, 2011).
- 3 L'ensemble des pays de l'arc alpin est également concerné par la neige de culture. Sur la base d'un recueil de données existantes, Hahn (2004) estimait en 2004 à 40 % le taux d'équipement en neige de culture des pistes italiennes et autrichiennes contre 10 % en Suisse et en Allemagne tandis que Agrawala (2007) soulignait le manque de cohérence et de transparence des méthodes de calcul employées par les professionnels européens de la filière. En France, l'agence d'Observation, de Développement et d'Ingénierie Touristique française (ODIT France) a publié jusqu'en 2009 (ODIT, 2009) des résultats intégrés par massif dont les méthodes de calcul n'ont pas été détaillées (Paccard, 2011), qui font actuellement référence dans le milieu professionnel (Badré *et al.*, 2009), pourtant en constante évolution.
- 4 Afin d'actualiser ces informations, nous mobilisons une méthodologie la plus robuste possible pour produire, par type de station, un état des lieux détaillé des équipements en neige de culture dans les Alpes françaises et de leur dynamique actuelle de développement en nous basant d'une part, sur des informations structurelles sur les domaines skiables des Alpes françaises (George-Marcelpoil *et al.*, 2012b, première partie) et d'autre part, sur les résultats d'une enquête réalisée en 2014 auprès de domaines skiables (seconde partie). Nous replaçons dans une troisième partie le contexte climatique de cette dynamique d'expansion en établissant pour l'ensemble des massifs alpins français et par altitude, le potentiel de production de neige de culture et son évolution depuis les années 1960. Enfin, certains aspects de cette étude sont discutés dans une quatrième et dernière partie. Ce travail s'inscrit dans une approche d'intégration de modèles socio-économiques et physiques pour la simulation et l'analyse de la gestion de neige dans les domaines skiables français (François *et al.*, 2014) pour laquelle elle fournit un état objectif et actualisé des équipements en neige de culture dans les Alpes françaises et leur marge d'expansion.

L'échantillon enquête et les données structurelles sur les domaines skiables

Enquête auprès des professionnels

- 5 Afin d'évaluer les niveaux d'équipement actuels et les projets d'extension des parcs d'enneigeurs des stations, une enquête a été mise en place. Sur la base des informations mises à disposition par l'ADSP (Association Nationale des Directeurs de Pistes et de la Sécurité de stations de Sports d'Hiver), le questionnaire a été adressé à 161 contacts pour la plupart gestionnaires de domaines skiables dans l'ensemble des massifs français. Un code a été attribué à chacun des participants afin qu'il dispose d'un accès personnalisé à l'enquête tout en garantissant la confidentialité des réponses.

La base de données socio-économiques « BD Stations »

- 6 Afin de traiter les réponses à l'enquête, d'en évaluer la représentativité et d'en généraliser les résultats, nous avons eu recours à la Base de Données Stations (« BD Stations »). La BD Stations a été réalisée par Irstea à la demande du Comité de Massif des Alpes, une instance de gouvernance instituée par la loi Montagne de 1985 et dont le secrétariat est assuré par le Commissariat Général à l'Égalité des Territoires Alpes (CGET Alpes, ex-Datar). La BD Stations est une base de données spatialisée, focalisée sur l'organisation des stations de sports d'hiver, autant du point de vue administratif (en France, les remontées mécaniques constituent un service public sous la responsabilité des communes ou de leur groupement) qu'économique (la gestion du service peut être assurée directement par l'autorité publique ou être déléguée à un prestataire de droit privé). Les informations sont ainsi structurées pour intégrer une diversité de points de vue et de sources de données. Les stations peuvent être observées à différentes échelles depuis des territoires au sein desquels les sports d'hiver ne constituent qu'un élément parmi d'autres jusqu'à l'appareil de remontées mécaniques (George-Marcelpoil *et al.*, 2012b). Ces équipements faisant l'objet d'un régime réglementaire spécifique, leur installation et leur exploitation sont encadrées par le STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et Transports Guidés), administrateur du Catalogue Informatisé des Remontées mécaniques Nationales (CAIRN) qui recense les différents appareils et leurs caractéristiques techniques.
- 7 Le moment de puissance (MP) est un indicateur de la taille d'un appareil de remontée mécanique couramment employé par Domaines Skiables de France (DSF), défini comme le produit du débit théorique (personnes h⁻¹) et du dénivelé parcouru (km). Cet indicateur permet de mesurer la contribution d'une remontée mécanique (RM) au sein d'un domaine skiable. Agrégé au niveau d'une station ou d'un territoire, il permet de comparer rapidement les niveaux d'équipement relatifs. DSF l'emploie notamment pour distinguer des catégories de stations décrites dans le tableau 1 d'après François *et al.* (2014).

Tableau 1 - Catégories de stations par moment de puissance

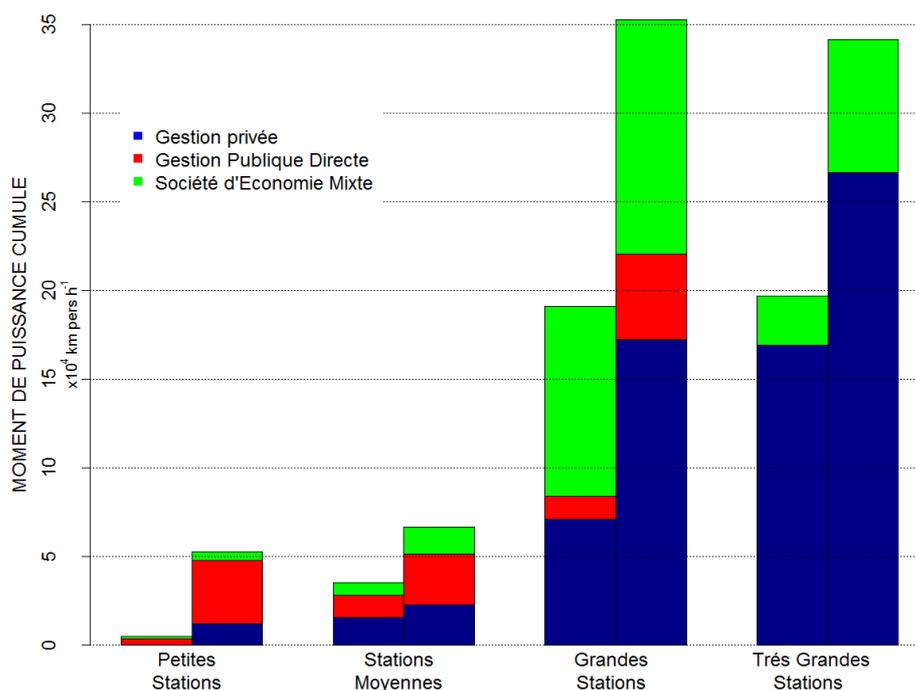
Type de station	Petites Stations (S)	Stations Moyennes (M)	Grandes Stations (L)	Très Grandes Stations (XL)
Moment de puissance (MP, km pers h ⁻¹)	MP < 2500	2500 < MP < 5000	5000 < MP < 15000	15000 < MP

- 8 Sur la base de ces informations et de la base de données BDTOPO réalisée par l'IGN (à 25 m de résolution), la BD Stations propose une représentation fiable des domaines skiables (François *et al.*, 2014), en l'absence d'autres données géographiques disponibles sur ces domaines. La représentation dite des enveloppes gravitaires (François *et al.*, [Soumis]) est employée dans cette étude.

Représentativité

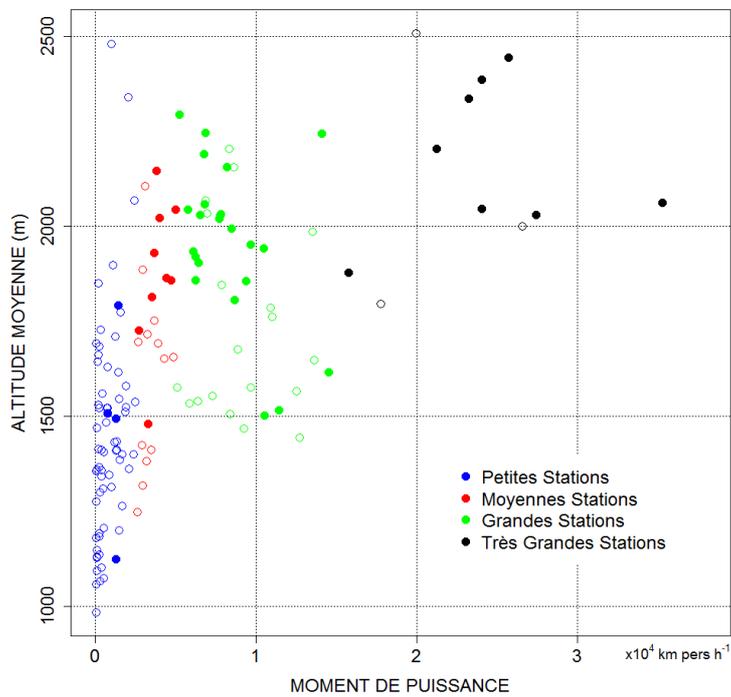
- 9 Notre démarche a été présentée lors de l'assemblée générale annuelle de l'ADSP le 7 octobre 2014 à Montpellier. A cette occasion, des questionnaires enquête ont été distribués sous format papier aux personnes présentes (18 réponses récoltées le jour même et intégrées aux résultats en ligne). L'enquête en ligne a été clôturée le 9 janvier 2015 avec 56 réponses complètes, dont 44 stations alpines. Pour la suite de cette étude et par cohérence avec la BD Stations, seules les stations alpines sont ici prises en compte.

Figure 1 - Représentation par catégorie du moment de puissance cumulé des stations alpines de l'enquête (à gauche) et de l'ensemble des stations alpines (à droite), avec le détail du mode d'exploitation des RM



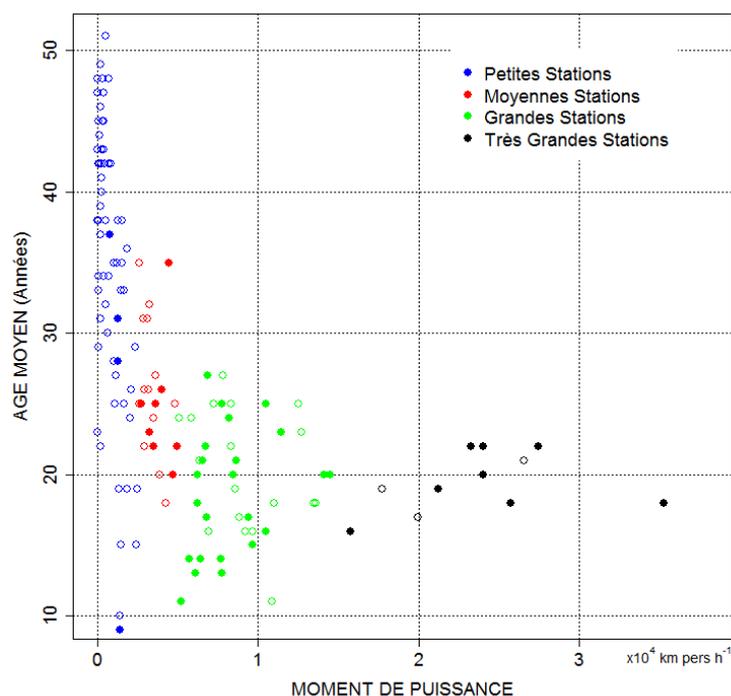
- 10 Toutes les catégories ont participé à notre enquête avec un taux de représentation élevé : entre 45 et 60 % de l'ensemble alpin en nombre comme en MP (annexe A et figure 1), à l'exception des petites stations (S), faiblement représentées. Le MP cumulé des stations de l'enquête est de 53,2 % du MP alpin toutes catégories confondues. La dispersion au sein des catégories de l'échantillon est fidèle à la dispersion de la population des stations alpines en termes de MP, de mode d'exploitation des RM, d'altitude moyenne et d'âge moyen du parc de RM (figures 1 et 2). Ces éléments montrent que cet échantillon peut être considéré comme représentatif et que ses résultats peuvent être généralisés à la population de stations des Alpes françaises, à condition de traiter spécifiquement le cas des stations S.

Figure 2a - Altitude moyenne



Stations ayant participé à l'enquête (●) et autres stations alpines (○)

Figure 2b - Âge moyen du parc de remontées mécaniques



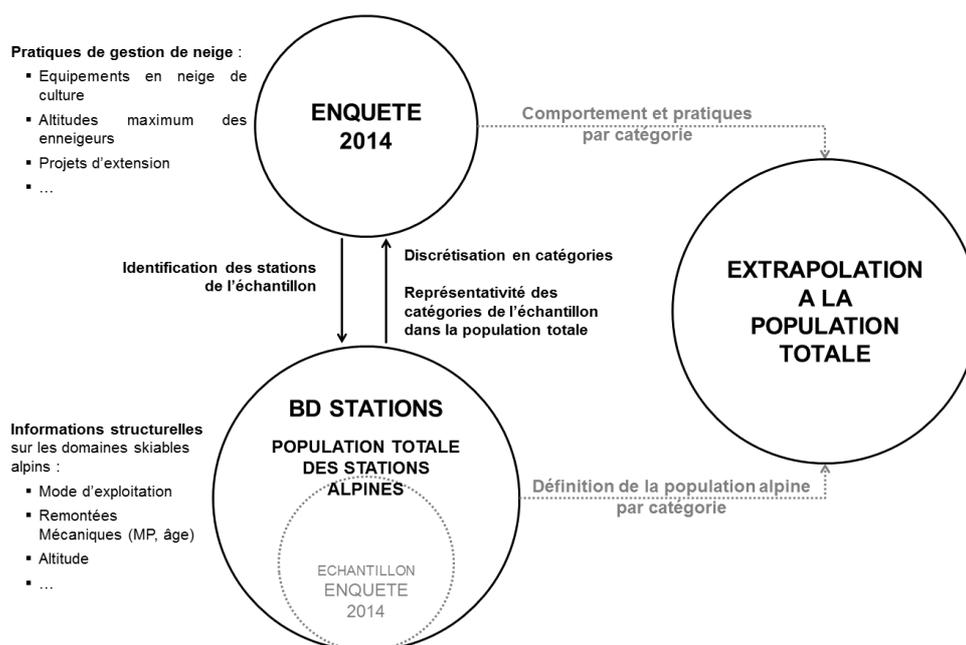
Stations ayant participé à l'enquête (●) et autres stations alpines (○)

- 11 L'échantillon de l'enquête de la catégorie S est considéré comme non représentatif car trop faible par rapport à la population alpine de cette catégorie. Ses résultats sont donc écartés. Néanmoins, la catégorie S sera traitée en formulant trois hypothèses pour estimer son comportement à partir de la catégorie M. Les stations S ne représentant que 7 % du parc alpin français de RM (annexe A), l'erreur commise sur le comportement de cette catégorie a par conséquent un faible impact sur le comportement général de la population.
- 12 Ces hypothèses renvoient aux résultats de François *et al.* ([Soumis]) qui montrent que le rapport entre la surface accessible par les RM d'une station (domaine gravitaire) et son MP varie d'une catégorie de station à l'autre. Dans le cas des stations S, ce rapport est deux fois plus important que pour les stations M (0.42 vs. 0.21 ha (km pers h⁻¹)⁻¹). Par ailleurs, la part occupée par la surface de piste dans le domaine gravitaire est stable quelle que soit la catégorie de station considérée (François *et al.*, [Soumis]). Notre première hypothèse est donc que le rapport entre la surface des pistes et le MP des stations S est le double de celui des stations M. Notre seconde hypothèse est que l'équipement en enneigeurs est davantage lié à l'équipement en RM (et donc au MP) qu'à la surface de pistes desservies. Par conséquent, le rapport entre la surface équipée en enneigeurs et le MP des stations S est le même que celui des stations M. Enfin, notre dernière hypothèse est que le rapport entre la surface supplémentaire équipée en enneigeurs à l'échéance de 2020 et le MP est deux fois moins importante pour les stations S que pour les stations M, conformément à la nette distinction que nous avons constatée dans les projets des différentes catégories de stations (tableau 2 et annexe C).

Généralisation et traitement des résultats

- 13 La BD Stations permet d'identifier les stations de l'échantillon appartenant à une même catégorie, ce qui permet d'agréger leurs résultats pour fournir un résultat intégré par catégorie, avec le MP cumulé par catégorie. Elle fournit également le MP alpin par catégorie, ce qui permet d'estimer les résultats sur l'ensemble des stations des Alpes françaises (figure 3 et annexe C).

Figure 3 - Schéma de traitement des résultats de l'enquête grâce aux informations de la base de données BD Stations



- 14 Afin de quantifier l'incertitude sur les résultats généralisés, nous avons amputé l'échantillon enquêté (pour chaque catégorie) du premier ou du dernier quartile de stations, classées par leur taux d'équipement en enneigeurs et calculé l'impact de ces traitements sur les résultats généralisés. Ceci revient à considérer que l'ensemble des stations alpines est équipé à l'identique des 3 stations les plus équipées sur 4 dans notre échantillon (hypothèse de fort équipement) ou à l'inverse équipé à l'identique des 3 stations les moins équipées sur 4 dans notre échantillon (hypothèse de faible équipement). Nous avons également supposé que le rapport entre la surface de pistes et le MP resterait constant d'ici à 2020.

Résultats de l'enquête : contexte d'évolution des équipements

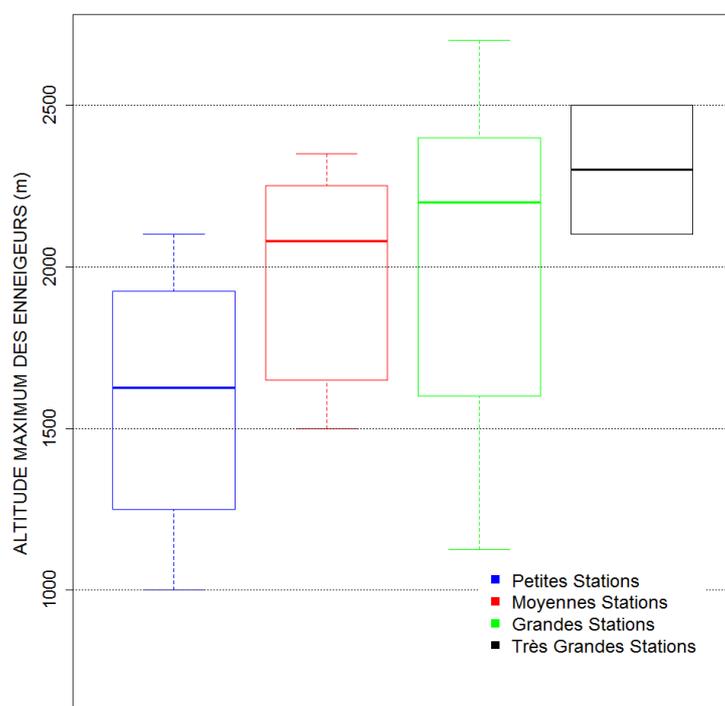
- 15 La dynamique d'équipement en enneigeurs diffère nettement d'une catégorie de stations à l'autre (tableau 2 et figure 4).

Tableau 2 - Contexte actuel des équipements en enneigeurs dans les Alpes françaises

	Petites Stations (S)	Stations Moyennes (M)	Grandes Stations (L)	Très Grandes Stations (XL)	Ensemble
Les enneigeurs sont-ils disposés prioritairement à basse altitude?	100%	100%	42%	25%	55%
Ont répondu OUI:	(4/4)	(8/8)	(10/24)	(2/8)	(24/44)
Avez-vous un projet d'extension du parc d'enneigeurs?	50%	63%	88%	100%	82%
Ont répondu OUI:	(2/4)	(5/8)	(21/24)	(8/8)	(36/44)
A quelle échéance? (moyenne des réponses)	2018 [± 2 ans]	2020 [± 3 ans]	2019 [± 4 ans]	2021 [± 3 ans]	2020 [± 3 ans]

- 16 Plus le domaine est de taille importante, moins les enneigeurs se limitent aux secteurs de plus faible altitude et plus la volonté d'étendre les parcs d'enneigeurs est forte.

Figure 4 - Altitude maximum d'installation des enneigeurs

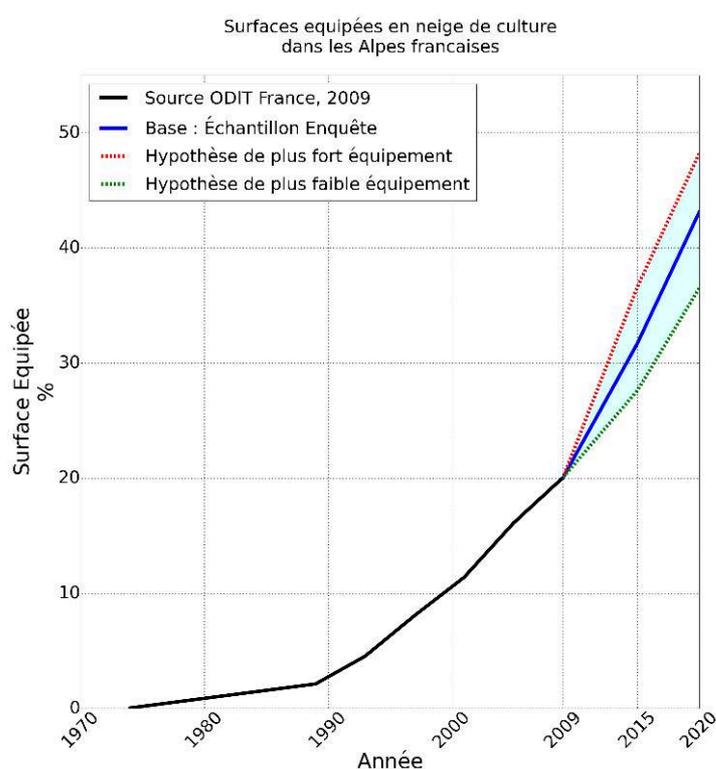


- 17 Les réponses se limitent aux stations ayant déclaré que leurs enneigeurs sont prioritairement disposés à basse altitude (tableau 2).
- 18 Pour chaque catégorie, la médiane est représentée en gras, la boîte s'étend du premier au troisième quartile, les valeurs extrêmes sont en pointillés.

Résultats de l'enquête : estimation des surfaces équipées et évolution

- 19 Le tableau complet de résultats de notre enquête se trouve en fin d'article (annexe C) et contient les surfaces et taux d'équipement extrapolés sur la base de l'échantillon enquête et des hypothèses de faible et fort équipements (selon la méthode décrite en section précédente, figure 5).
- 20 La surface totale de pistes par catégorie a été déterminée selon le procédé décrit précédemment (figure 3, annexe C), ce qui permet d'obtenir une surface totale de pistes sur l'ensemble des Alpes françaises de 16 500 ha actuellement. Cette valeur diffère de celles relayées par ODIT France qui se situent entre 19 000 et 22 500 ha sans que le détail de la méthode soit connu (Paccard, 2011).

Figure 5 - Évolution des surfaces équipées en neige de culture dans les Alpes françaises depuis 1970 et perspectives pour 2020



- 21 Sur la base de l'enquête, nous estimons que 32 % des surfaces de pistes sont équipées en enneigeurs pour la saison 2014/2015. Les stations Moyennes à Très Grandes sont en moyenne équipées de manière similaire (environ 35 %). A l'horizon 2020, le taux d'équipement devrait s'élever selon notre échantillon à 43 % sur l'ensemble des Alpes françaises, soit plus du tiers (+36 %) de la surface actuelle équipée en plus. Les Très Grandes Stations sont celles qui prévoient la plus forte extension (+46 %) puis les Grandes (+37 %) et les Moyennes (+18 %). Ces forts taux d'extension amènent à s'interroger sur les potentiels météorologiques de production de neige de culture dont disposent les stations et de la marge dont elles bénéficient pour pouvoir continuer à développer leur parc d'enneigeurs dans un contexte de changement climatique. C'est l'objet de notre seconde partie.

Analyse du contexte climatique de la production de neige

Données météorologiques

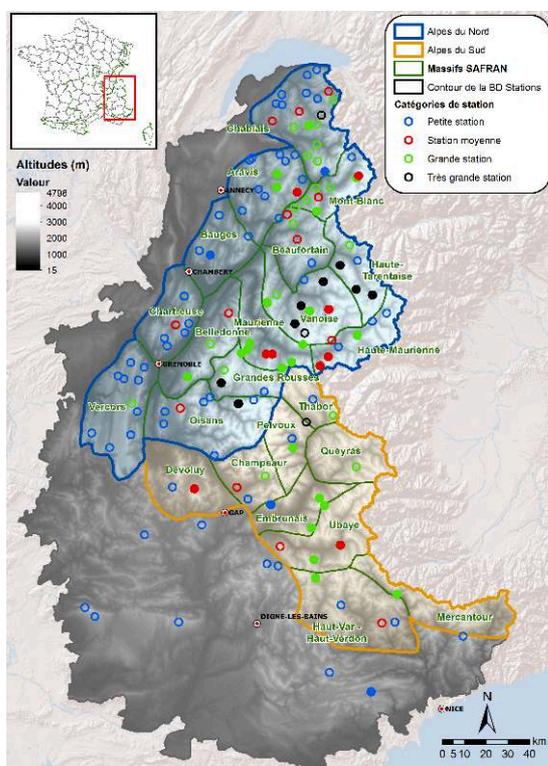
- 22 Le système météorologique SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) fournit des informations météorologiques (température, précipitations, etc.) à l'échelle de massifs de 1000 km² environ (figure 6), au sein desquels il est supposé que les variables météorologiques sont homogènes et que leur variation dépend uniquement de l'altitude (Durand *et al.*, 1993). La résolution verticale des données fournies par SAFRAN est de 300 m et son pas de temps, horaire.
- 23 SAFRAN est basé sur un schéma d'assimilation complet qui emploie des réanalyses de modèles météorologiques de grande échelle, des observations au sol, en particulier le réseau d'observations nivo-météorologiques et les stations automatiques Nivôses et radiosondes. Ceci permet de reconstruire les conditions nivo-météorologiques à résolution temporelle infra-journalière dans les Alpes françaises sur une période très longue (54 ans, Durand *et al.* 2009a). Néanmoins, les réanalyses et le réseau d'observations sur lesquels s'appuie SAFRAN ont évolué depuis leurs débuts et notamment depuis les années 80, ce qui constitue une source d'hétérogénéités spatiale et temporelle (Vidal *et al.*, 2010). Malgré ces incertitudes, SAFRAN est un outil performant employé par de nombreux travaux de recherches y compris pour des analyses d'impact du changement climatique dans les massifs montagneux français (Durand *et al.*, 2009a, Durand *et al.*, 2009b, Lafaysse *et al.*, 2011).

Définition du potentiel de production et du domaine d'étude

- 24 La faisabilité de la production de neige dépend en grande partie de facteurs météorologiques (température, humidité de l'air, vent). La principale variable employée par les constructeurs d'enneigeurs et les nivoculteurs professionnels est la température « humide » ou température du thermomètre mouillé, notée T_w (Olefs *et al.*, 2010). Plus l'air est sec, plus T_w diffère de la température de l'air à laquelle elle est toujours inférieure ou égale. Au cours de cette étude, tous les résultats sont basés sur la température humide T_w et y font référence. La température humide est calculée à partir de la température et de l'humidité relative de l'air de SAFRAN en utilisant la méthode de Jensen *et al.* (1990). Actuellement la production de neige est techniquement possible à partir d'un seuil de -2°C maximum de température humide (Olefs *et al.*, 2010) bien que les rendements soient assez pauvres à cette température (Marke *et al.*, 2014). En dessous d'une température humide de -5°C, la production peut être réalisée à des débits plus élevés et de meilleurs rendements. Les « fenêtres de froid » sont des créneaux temporels au cours desquels la température humide est inférieure au seuil considéré (la production y est possible). Afin d'approcher les pratiques usuelles des nivoculteurs professionnels, nous avons limité notre étude aux « fenêtres » d'une durée de 4 heures minimum. Le cumul des heures de ces créneaux constitue le potentiel de production de neige de culture pour la période considérée.
- 25 Nous avons distingué trois zones géographiques distinctes par regroupement de massifs SAFRAN (voir figure 6) : les Alpes du Nord (14 massifs SAFRAN), les Alpes du Sud

(9 massifs) et l'ensemble des Alpes françaises (23 massifs). Quatre niveaux d'altitude ont été étudiés : 1200 m, 1500 m, 1800 m et 2100 m. Ces altitudes contiennent couramment dans les Alpes françaises les altitudes de départ des stations, les fronts de neige ainsi que les zones équipées en enneigeurs (voir section 2) et constituent plus généralement les zones où la variabilité de l'enneigement pose le plus de difficultés. Les seuils de température humide retenus pour cette étude sont -2°C et -5°C en référence aux limites techniques de faisabilité et de meilleur rendement. L'automne (1^{er} octobre – 1^{er} janvier) est la période de plus forte production en neige de culture (Hanzer *et al.*, 2014). Par conséquent, une évolution du potentiel de production au cours de cette période pourrait avoir un fort impact sur le fonctionnement des stations. La production s'étalant cependant sur l'ensemble de la saison hivernale (1^{er} octobre – 1^{er} avril), nous avons considéré ces deux périodes. La combinaison de ces facteurs à plusieurs niveaux aboutit à 48 cas distincts étudiés sur la période (1961-2014), ce qui donne une vision d'ensemble de la situation actuelle et de l'évolution du potentiel de production au cours des 50 dernières années.

Figure 6 - Zones géographiques étudiées par regroupements des massifs SAFRAN (Alpes du Sud, du Nord et Alpes françaises entières)



Stations ayant participé à l'enquête (●) et autres stations alpines (○) par catégories

Tendances d'évolution

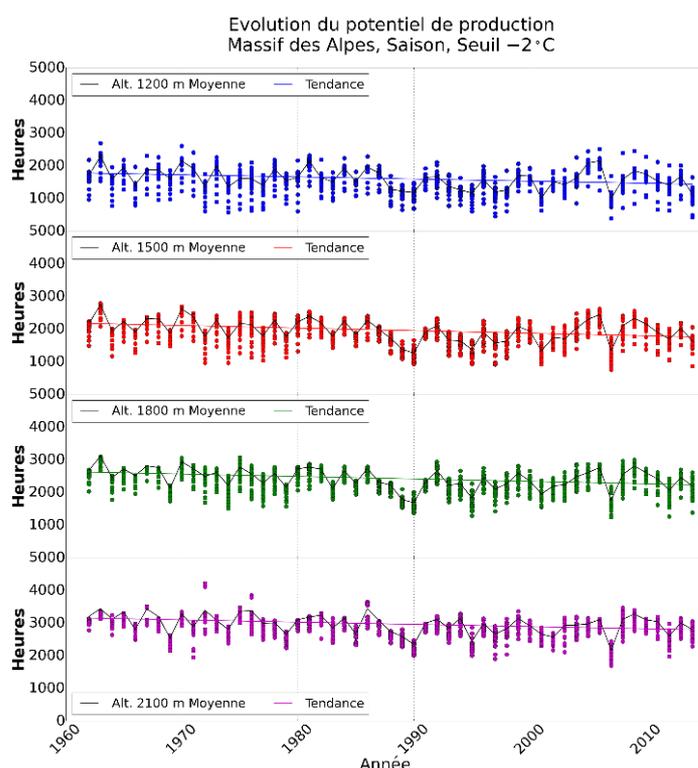
- 26 L'analyse des données SAFRAN fournit pour chaque massif un potentiel de production de neige de culture pour chaque année et chaque altitude. Nous établissons ensuite un potentiel de production moyen à l'échelle des zones géographiques sélectionnées : Alpes du Nord, du Sud ou Alpes françaises entières par une simple moyenne des potentiels des massifs SAFRAN appartenant à la zone considérée. Une analyse de

tendance a été établie pour cette moyenne sur l'ensemble de la période (1961-2014). Nous avons calculé le taux de croissance de cette tendance, la corrélation du potentiel moyen avec le temps et son écart-type (pour en évaluer la variabilité), ainsi que les potentiels de production moyens sur les décennies (1961-1970) et (2005-2014). La significativité de la tendance a été évaluée grâce à une méthode statistique de type Monte-Carlo (Chène *et al.*, 2008). Cette approche a notamment été employée par Lesaffre *et al.* (2012) pour estimer la significativité de la tendance d'enneigement naturel sur le site du Col de Porte (Chartreuse). La tendance est significative si la corrélation de la variable observée avec le temps est meilleure que celle d'un tirage aléatoire sans remise des valeurs de cette variable dans 95 % des cas au moins.

Evolution du potentiel de production de neige de culture

- 27 Notre analyse basée sur les données SAFRAN montre que les situations dont les tendances ont les taux de croissance les plus élevés ont également les scores de significativité les plus élevés i.e. plus la tendance est marquée (fort taux), plus elle se confirme par le test statistique (score élevé). Toutes les situations dont les tendances sont jugées significatives (12 en tout) présentent des taux d'accroissement négatifs i.e. le potentiel de production diminue sur la période (1961-2014). Ainsi, sur l'ensemble des Alpes françaises à 1200 m, le potentiel de production de neige diminue (à -2°C) de 6 heures par an (h/an) environ sur la période (1961-2014). La perte est similaire aux autres altitudes (6 à 8 h/an, voir figure 7 et annexe B).
- 28 Le potentiel de production de neige dans les Alpes du Sud présente une variabilité nettement supérieure par rapport aux Alpes du Nord (écart-type 2 à 3 fois supérieur, corrélation plus faible avec le temps). Les scores de significativité obtenus pour les tendances d'évolution diffèrent donc entre les deux zones géographiques. Certaines tendances constatées dans les Alpes du Nord ne se confirment pas dans les Alpes du Sud.
- 29 Le potentiel de production de neige de culture en automne ne présente pas d'évolution significative pour la période (1961-2014) : deux cas significatifs sur 24. Il représentait 35 % (à -2°C) à 32 % (à -5°C) du potentiel saisonnier total pour la décennie (1961-1970) contre 37 % (à -2°C) à 34 % (à -5°C) pour (2005-2014). Le potentiel de production sur la saison a lui évolué significativement dans de nombreux cas. Les Alpes du Nord ont vu leur potentiel diminuer significativement dans la majorité des cas. Cette tendance se confirme sur l'ensemble des Alpes françaises pour une température de -2°C, bien que les potentiels de production aux altitudes de 1200 m à 1800 m dans les Alpes du Sud ne montrent pas d'évolution significative. L'ensemble des résultats est proposé à la fin de cet article en annexe B (exhaustive).

Figure 7 - Potentiel saisonnier de production de neige de culture pour l'ensemble des Alpes françaises à la température humide seuil de -2°C sur la période (1961-2014)



Chaque point correspond à un massif SAFRAN. La courbe noire représente la moyenne des massifs et la courbe en couleur la tendance linéaire de cette moyenne.

- 30 Les projections d'impact du changement climatique au XX^{ème} siècle dans les Alpes françaises montrent systématiquement une tendance de hausse de température pour l'ensemble des altitudes et des scénarios considérés (Lafaysse *et al.* 2014 ; Castebrunet *et al.* 2014). Ces données n'ont pas été spécifiquement appliquées à l'analyse des créneaux de production de neige de culture mais leurs résultats sont nettement compatibles avec une poursuite des tendances que nous observons.

Discussion

Variabilité et significativité

- 31 La variabilité du potentiel de production de neige de culture est importante et repose sur un effet spatial et temporel. Le regroupement de massifs SAFRAN dont les influences climatiques peuvent différer crée une première source de variabilité à laquelle s'ajoute la variabilité climatique interannuelle (Durand *et al.*, 2009b). Les situations pour lesquelles le potentiel présente le plus petit nombre d'heures ont une variabilité relative plus importante (annexe B). Notamment, la variabilité pour les potentiels automnaux (tous confondus) est de 72 h pour une valeur moyenne de 600 h (soit 12 %) tandis que la variabilité des potentiels saisonniers (tous confondus) est de 149 h pour une valeur moyenne de 1800 h (soit 8 %). Par conséquent, plus le potentiel de production est faible, plus la variabilité spatiale et climatique est prépondérante sur une tendance éventuelle, ce qui concerne en particulier la période automnale et les

basses altitudes. La part plus faible du potentiel automnal dans le potentiel saisonnier au cours de la décennie (1961-1970) par rapport à la décennie (2005-2014) laisse cependant penser que son évolution est effectivement moins marquée (32 à 35 % contre 34 à 37 %).

La marge d'expansion dont disposent les stations

- 32 Le volume d'eau employé en 2009 à la production de neige de culture était de 19 millions de m³ sur 5300 ha de pistes, soit 0,358 m³ d'eau par m² de piste (Badré *et al.*, 2009). Avec 3 enneigeurs par hectare en moyenne, ceci correspond à 1192 m³ d'eau par enneigeur et par saison (Badré *et al.*, 2009). A un débit (usuel) de 8 m³/h, on aboutit à 149 h de production annuelle moyenne pour un enneigeur.
- 33 Cette valeur peut apparaître négligeable au regard des potentiels de production (annexe B) mais les marges ne sont certainement pas si importantes. Tout d'abord, les contraintes ne se limitent pas à la température : le vent, la disponibilité en eau, les contraintes de calendrier réduisent ce potentiel. Par ailleurs, les installations des domaines skiables ne permettent généralement pas de produire simultanément de la neige sur l'ensemble de leur parc d'enneigeurs. Ainsi pour une station dont la capacité maximale s'élève au tiers de son parc, le besoin réel en créneaux de production serait de 450 h environ sur la saison. Les potentiels de production de neige de culture à -5°C sur la période automnale se situent dans les Alpes entre 250 h et 650 h sur les tranches d'altitudes étudiées. Ainsi, dans certains cas les domaines sont déjà amenés à produire de la neige à des températures humides comprises entre -2°C et -5°C avec des rendements dégradés (Marke *et al.*, 2014) et par conséquent des coûts plus élevés.

Conclusion

- 34 Afin d'établir une situation actualisée la plus objective et détaillée possible des équipements en neige de culture dans les Alpes françaises, une enquête a été réalisée auprès de domaines skiables au cours de l'automne 2014 sur la base de contacts fournis par l'Association Nationale des Directeurs de Pistes et de la Sécurité de stations de Sports d'Hiver (ADSP). Par cohérence avec la base de données BD Stations, cette étude se limite actuellement aux stations alpines (44 témoignages) mais pourrait être étendue aux autres massifs français (déjà couverts par le système SAFRAN mais pas par la BD Stations à ce jour).
- 35 Notre enquête a révélé un taux d'équipement en neige de culture dans les stations alpines de l'ordre de 32 % de la surface totale de pistes actuellement. Cette tendance à l'équipement qui s'est accélérée à la fin des années 1990 (ODIT, 2009) s'est encore renforcée ces dernières années et dépassera 40 % de surface équipée dès 2020, d'après notre enquête. Cependant, toutes les stations ne s'inscrivent pas dans la même dynamique. Si les stations Moyennes à Très Grandes sont aujourd'hui équipées de manière similaire, leur projet d'extension est fortement lié à leur taille et les Très Grandes Stations seront les plus équipées en enneigeurs en 2020. Les résultats de notre enquête montrent que près de 50 % des pistes pourraient être équipés pour cette catégorie (49 %), 48 % pour les Grandes, 41 % pour les Moyennes et 21 % pour les Petites stations. Ces chiffres montrent l'inégalité des stations en termes de capacité d'adaptation. Les Très Grandes Stations qui sont souvent les plus élevées en altitude

bénéficient d'un enneigement naturel plus important que les autres (François *et al.*, 2014) et possèdent les plus grandes marges de progression de leur parc d'enneigeurs (leurs potentiels de production de neige de culture sont plus importants du fait de leur plus haute altitude). Leur taux élevé de projets d'extension (+46 % de surface équipée pour les Très Grandes Stations d'ici 5 ans) montre également que les plus grands domaines sont aussi les plus capables d'investir pour sécuriser leur activité face à la variabilité interannuelle d'enneigement et aux perspectives de diminution de l'enneigement (Castebrunet *et al.*, 2014).

- 36 La neige de culture représente la première stratégie d'adaptation aux effets du changement climatique (Steiger *et al.*, 2008) mais n'est pourtant pas infaillible. Les enneigeurs ne peuvent compenser le déficit de neige naturelle qu'à certaines conditions et les conséquences de certains débuts de saison secs et doux comme en 2006-2007 (François *et al.*, 2014) ne peuvent être évités grâce à la neige de culture (Spandre *et al.*, 2014). Notre étude montre que le potentiel de production de neige de culture est limité et décline depuis 1961. La forte croissance actuelle des équipements rencontrera certainement le problème de disponibilité de ces créneaux de production et de la ressource en eau face auxquels les stations ne sont pas égales. Produire de la neige de culture est coûteux et le sera probablement de plus en plus à mesure que le besoin se rapproche du potentiel et que les domaines seront poussés à produire dans des conditions marginales, avec de faibles rendements (Marke *et al.*, 2014). Le gain de productivité doit alors être mis en compétition avec l'amortissement d'une telle installation et arbitré par le potentiel météorologique de production dont la pression se fera de plus en plus forte si les effets du changement climatique se renforcent comme cela est prévu aujourd'hui. L'investissement dans une installation de neige de culture n'a d'intérêt aujourd'hui que pour les stations qui sauront en dégager une réelle plus-value. La poursuite du développement des parcs d'enneigeurs pose donc la question de la capacité des stations et de leur modèle économique à évoluer vers un fonctionnement viable.

BIBLIOGRAPHIE

AGRAWALA S., 2007. – *Climate change in the European Alps : adapting winter tourism and natural hazards management*. Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD), doi: 10.1787/9789264031692-en.

BADRÉ M., PRIME J.L., RIBIÈRE G., 2009. – « Neige de culture : Etat des lieux et impacts environnementaux ». *Note socio-économique. République Française. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire*, http://www.cpepesc.org/IMG/pdf/neige_de_culture_eta.pdf.

CASTEBRUNET H., ECKERT N., GIRAUD G., DURAND Y., MORIN S., 2014. – « Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate : the French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods ». *The Cryosphere*, vol. 8, pp. 1673-1697, doi: 10.5194/tc-8-1673-2014.

CHÈNE G., SAVÈS M., 2008. – Principaux outils en statistique. Université Victor Segalen Bordeaux 2 - Institut de Santé Publique, d'Epidémiologie et de Développement (ISPED), [http://etudes.isped.u-bordeaux2.fr/alzheimer/documents/général/Principaux outils en statistiques.pdf](http://etudes.isped.u-bordeaux2.fr/alzheimer/documents/général/Principaux%20outils%20en%20statistiques.pdf)

DSF, 2014.- Indicateurs et Analyses. <http://www.domaines-skiables.fr/downloads/DSF-Indicateurs-et-Analyses2014-A4-BD.pdf>

DURAND Y., BRUN E., L. M., GUYOMARC'H G., LESAFFRE B., MARTIN E., 1993. – « A meteorological estimation of relevant parameters for snow models ». *Ann. Glaciol.*, vol. 18, pp. 65-71, <http://www.igsoc.org/annals/18/>.

DURAND Y., GIRAUD G., LATERNER M., ETCHEVERS P., L. M., LESAFFRE B., 2009a. – « Reanalysis of 44 Yr of Climate in the French Alps (1958--2002) : Methodology, Model Validation, Climatology, and Trends for Air Temperature and Precipitation ». *J. Appl. Meteor. Climat.*, vol. 48, pp. 429-449, doi: 10.1175/2008JAMC1808.1.

DURAND Y., GIRAUD G., LATERNER M., ETCHEVERS P., L. M., LESAFFRE B., 2009b. – « Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958--2005) : Climatology and Trends for Snow Cover ». *J. Appl. Meteor. Climat.*, vol. 48, pp. 2487-2512, doi: 10.1175/2009JAMC1810.1.

EVETTE A., PEYRAS L., FRANÇOIS H., GAUCHERAND S., 2011. – « Risques et impacts environnementaux des retenues d'altitude pour la production de neige de culture dans un contexte de changement climatique ». *Journal of Alpine Research/ Revue de géographie alpine*, n° 99-4, doi: 10.4000/rga.1471.

FRANÇOIS H., MORIN S., LAFAYSSÉ 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 ». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 108, pp. 98-112, doi: 10.1016/j.coldregions.2014.08.005.

FRANÇOIS H., MORIN S., SPANDRE P., LAFAYSSÉ M., GEORGE-MARCELPOIL E., [Soumis]. – « 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 et application aux Alpes françaises ». *La Houille Blanche*.

GEORGE-MARCELPOIL E., FRANÇOIS H., 2012a. – « Vallée de la Tarentaise : de l'invention du plan neige à la constitution d'un milieu innovateur dans le domaine du tourisme d'hiver ». *Histoire des Alpes*, vol. 17, pp. 227-242, <http://cemadoc.irstea.fr/oa/PUB00036068-vallee-tarentaise-8217-invention-plan-neige-consti.html>.

GEORGE-MARCELPOIL E., FRANÇOIS H., FABLET G., BRAY F., ACHIN C., TORRE A., BARRÉ J.B., 2012b. – Atlas des stations du massif des Alpes. pp. 102, <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00036588>.

GUILY L., 1991. – L'Exploitation technique des pistes de ski alpin dans le domaine skiable français. Grenoble 1, pp. 388, <http://www.theses.fr/1991GRE19031>.

HAHN F., 2004. – « L'enneigement artificiel dans l'arc alpin - Rapport de synthèse ». *Commission Internationale pour la Protection des Alpes*, pp. 18, <http://www.cipra.org/fr/publications/2709>.

HANZER F., MARKE T., STRASSER U., 2014. – « Distributed, explicit modeling of technical snow production for a ski area in the Schladming region (Austrian Alps) ». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 108, pp. 113-124, doi: 10.1016/j.coldregions.2014.08.003.

JENSEN M.E., BURMAN R.D., ALLEN R.G., 1990.- *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. American Society of Civil Engineers, <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?67841>.

LAFAYSSÉ 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 ». *Journal of Hydrology*, vol. 403, n° 1, pp. 116-129, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.046.
- LAFAYSSSE M., HINGRAY B., MEZGHANI A., GAILHARD J., TERRAY L., 2014. – « Internal variability and model uncertainty components in future hydrometeorological projections : The Alpine Durance basin ». *Water Resources Research*, vol. 50, n° 4, pp. 3317-3341, doi: 10.1002/2013WR014897.
- LESAFFRE B., LEJEUNE Y., MORIN S., PANEL J.M., PONCET, Year. – *Impact du changement climatique sur l'enneigement de moyenne montagne : l'exemple du site du col de Porte en Chartreuse*. Proceedings of the Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, http://www.cnrm-game.fr/IMG/pdf/lesaffre_aic_2012.pdf.
- LORIT J., 1991. – Enquête sur les difficultés des stations de sports d'hiver. Paris : Rapport pour le Ministère de l'intérieur.
- MAGNIER E., 2013. – Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne : impacts sur l'hydrosystème. Exemple des Préalpes du Nord (France, Suisse). Paris 4, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00922929/document>.
- MARKE T., STRASSER U., HANZER F., JOHANN S., WILCKE R.A.I., GOBIET A., 2014. – « Scenarios of future snow conditions in Styria (Austrian Alps) ». *Journal of Hydrometeorology*, n° 2014, doi: 10.1175/JHM-D-14-0035.1.
- ODIT F., 2009. – Les chiffres clés du tourisme de montagne en France - 7ème édition. ODIT France, <http://www.institut-montagne.org/nuxeo/nxfile/default/1997dfbb-70c0-4721-b4fd-9acbaa06aa41/file:content/2009-PDF-chiffrescles-montagne.pdf>.
- OLEFS M., FISCHER A., LANG J., 2010. – « Boundary Conditions for Artificial Snow Production in the Austrian Alps ». *Journal of Applied Meteorology Climatology*, vol. 49, n° 6, doi: 10.1175/2010JAMC2251.1.
- PACCARD P., 2011. – Gestion durable de l'eau en montagne : le cas de la production de neige en stations de sports d'hiver. Atelier national de reproduction des thèses, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00572604/>.
- PASCAL R., 1993. – « Problèmes structurels des stations de moyenne montagne. Ministre de l'équipement, des Transports et du Tourisme, Paris. ».
- SPANDRE P., MORIN S., GEORGE-MARCELPOIL E., LAFAYSSSE M., LEJEUNE Y., FRANÇOIS H., Year. – *Integrating snow management processes and practices into a detailed snowpack model. Relevance, applications and prospects*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/ISSW14_paper_P1.29.pdf.
- STEIGER R., MAYER M., 2008. – « Snowmaking and climate change : Future options for snow production in Tyrolean ski resorts ». *Mountain Research and Development*, vol. 28, n° 3, pp. 292-298, doi 10.1659/mrd.0978.
- VIDAL J.P., MARTIN E., FRANCHISTÉGUY L., BAILLON M., SOUBEYROUX J.M., 2010. – « A 50 year high resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system ». *International Journal of Climatology*, vol. 30, n° 11, pp. 1627-1644, doi: 10.1002/joc.2003.

RÉSUMÉS

Le développement de la neige de culture dans les Alpes françaises a réellement démarré dans les années 1990. Devenue une garantie de réussite de leur séjour pour les skieurs comme de résultat

pour les exploitants, la neige de culture s'est systématisée. Les problématiques liées au changement climatique ont justifié depuis plusieurs années les investissements dans les enneigeurs et suscité l'intérêt pour des études scientifiques croisant des approches physiques et socio-économiques dans lesquelles nous inscrivons ce travail.

Notre enquête a été réalisée à l'automne 2014 sur la base d'un panel représentatif de domaines skiables et a révélé un taux d'équipement des pistes en neige de culture de 32 % en surface dans les Alpes françaises. Les stations Moyennes à Très Grandes sont actuellement équipées de manière similaire. La tendance à l'équipement s'est renforcée ces dernières années et la surface équipée dépassera 40 % dès 2020 d'après les résultats de notre enquête. Toutefois, la dynamique de développement de la neige de culture est variable selon les stations. Leur projet d'extension est fortement lié à leur taille et les Très Grandes Stations devraient être les plus équipées en enneigeurs en 2020 (près de 50 % en surface).

Une analyse des conditions climatiques alpines montre pourtant que le potentiel de production est limité et décline depuis les années 1960. Produire de la neige de culture est coûteux et le sera de plus en plus à mesure que le besoin se rapproche du potentiel de production et que la poursuite des effets du changement climatique pousse les domaines à produire dans des conditions marginales.

Snowmaking facilities have been commonplace in the French Alps since 1974 and particularly since the 1990s. Now, nearly all resorts are equipped with snowmaking facilities, which guarantee snow for skiers and sufficient revenue for resorts. The effects of climate change have justified recent investments in new facilities, and research efforts are beginning to combine socio-economic and physically-based approaches. We carried out a survey in autumn 2014, collecting data from a representative sample of resorts in the French Alps. We found that 32% of maintained ski slope areas in the French Alps are now equipped with snowmaking facilities; our findings indicate that this proportion is likely to reach 43% by 2020, with most of the increase in "Very Large" resorts. Although "Medium" to "Very Large" resorts are currently equipped at similar levels, the projected development varies with resort size. "Very Large" resorts are planning the largest growth, with nearly 50% of their ski slopes equipped with snowmaking facilities by 2020. However, our analysis reveals a limited potential for snowmaking in the French Alps: since the 1960s, suitable conditions have decreased by several hours per year. Since the effects of climate change are expected to increase in the coming decades (all scenarios suggest an air temperature increase), ski resorts will have to produce snow in less ideal conditions, incurring greater costs as a result of decreased production efficiency.

INDEX

Mots-clés : neige de culture, stations, Alpes françaises, changement climatique

Keywords : snowmaking, ski resorts, French Alps, climate change

AUTEURS

PIERRE SPANDRE

Irstea, Unité DTM, 2 Rue de la Papeterie, Grenoble, France

Météo-France - CNRS, CNRM-GAME UMR 3589, Centre d'Etudes de la Neige (CEN), Grenoble, France

pierre.spandre@irstea.fr

HUGUES FRANÇOIS

Irstea, Unité DTM, 2 Rue de la Papeterie, Grenoble, France

SAMUEL MORIN

Météo-France - CNRS, CNRM-GAME UMR 3589, Centre d'Etudes de la Neige (CEN), Grenoble,
France

EMMANUELLE GEORGE-MARCELPOIL

Irstea, Unité DTM, 2 Rue de la Papeterie, Grenoble, France