

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR de la communauté**

**UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement**

Arrêté ministériel : 7 Août 2006

Présentée par

**Pierre SPANDRE**

Thèse dirigée par **Samuel MORIN**

et codirigée par **Emmanuelle GEORGE-MARCELPOIL**

préparée au sein de

**IRSTEA - Développement des Territoires Montagnards**

**Météo-France/CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige**

et de l'école doctorale **Terre, Univers, Environnement**

# **Observation et modélisation des interactions entre conditions d'enneigement et activité des stations de sports d'hiver dans les Alpes françaises**

**[Résumé]**

Thèse soutenue publiquement le **5 décembre 2016**,  
devant le jury composé de :

**Pr. Sandrine ANQUETIN**

Directrice de recherche CNRS, LTHE, Grenoble, Présidente

**Pr. Daniel SCOTT**

Directeur de recherche, Université de Waterloo, Canada, Rapporteur

**Pr. Ulrich STRASSER**

Directeur de recherche, Université d'Innsbruck, Autriche, Rapporteur

**Pr. Charles FIERZ**

Directeur de recherche, WSL – SLF, Davos, Suisse, Examineur

**Dr. Marc PONS**

Chargé de recherche, OBSA, Sant Julià de Lòria, Andorre, Examineur

**Dr. Samuel MORIN**

IPEF, Météo-France/CNRS, CNRM/CEN, Directeur de thèse

**Dr. Emmanuelle GEORGE-MARCELPOIL**

ICPEF, Irstea, DTM, Co-Directrice de thèse





## Résumé

Les interactions dynamiques des conditions d'enneigement avec l'activité touristique des stations de sport d'hiver reposent sur de multiples enjeux sociaux, économiques, environnementaux et climatiques intégrés par les élus chargés du développement des territoires de montagne et industriels responsables de l'exploitation des domaines skiables. Depuis l'expérience vécue de la vulnérabilité des domaines skiables au déficit d'enneigement au début des années 1990 et plus encore depuis l'introduction des problématiques du changement climatique dans le débat public au début des années 2000, l'attente de la part des décideurs politiques et des professionnels de la neige pour des éléments fiables et pertinents sur l'impact du climat sur l'activité des sports d'hiver - dans laquelle s'intègre ce travail - n'a cessé de croître. Ce travail s'est attaché à la compréhension du rôle intégrateur de l'opérateur de domaine skiable dans son approche socio-économique d'une part et nivo-climatologique d'autre part de la gestion de la neige dans sa station dans le but de développer une chaîne de modélisation de la dynamique des interactions entre les conditions d'enneigement (variabilité, imprévisibilité) et les activités humaines (objectifs, moyens). Un état des lieux a été établi sur les priorités poursuivies, les moyens mis en œuvre (damage, neige de culture) et les contraintes subies (météorologiques, organisationnelles, structurelles) par les gestionnaires de domaines skiables dans leurs opérations quotidiennes de gestion de la neige grâce à une enquête auprès de 55 stations françaises et aux échanges réguliers avec quatre stations partenaires de ce travail (Autrans, Tignes, Chamrousse et Les Deux Alpes). Une modélisation physique des impacts de la gestion de la neige a été développée sur la base d'un modèle de neige et confrontée à des observations réalisées au cours de deux saisons hivernales consécutives dans ces quatre stations partenaires. Ces éléments ont été intégrés dans une chaîne de modélisation couplée permettant des études spatialisées des conditions d'enneigement et in fine la détermination d'indicateurs de la viabilité de l'enneigement à l'échelle de la station, dans l'ensemble des Alpes françaises. Cette méthode extrapolable à l'ensemble des massifs français a été appliquée dans les Alpes françaises sur la période passée 1958 – 2014 et a révélé la corrélation des indicateurs d'enneigement avec les données économiques des stations de sport d'hiver. Notre approche a ainsi montré sa pertinence pour des études prospectives de l'impact du changement climatique et/ou des infrastructures des domaines skiables sur la viabilité de l'enneigement et ses conséquences pour l'activité économique des stations de sport d'hiver.

**Mots clefs :** Stations ; Alpes françaises ; Gestion de la neige ; Damage ; Neige de culture ; Simulation ; Rendement neige de culture ; Pratiques professionnelles



## Remerciements

Merci à l'ensemble des pisteurs-secouristes qui ont pris part à ce travail pour leur curiosité, les échanges fructueux sur leurs méthodes et leur ténacité dans la réalisation des observations qui ont servi cette étude. Un grand merci à Denis Amblard, Philippe Browaeys, Frédéric Voegel, Brice Gaget, Frédéric Blanc, Dominique Maître, Olivier Ducastel et Arnaud Trinquier (Tignes), à Thierry Jeandon et Arnaud Guerrand (Les 2 Alpes), à Philippe Halot, Alexandre Traissart, Willy Flur et Jean-Luc Jaouen (Chamrousse) ainsi qu'à Jean-Louis Dupuis, Fabrice Gdak, Mlle Marty, Etienne Bessaguet et Stéphane Chuberre (Autrans). Merci au président de l'ADSP Benjamin Blanc ainsi qu'à Cédric Perretier, organisateur de l'assemblée générale 2014 de l'ADSP, pour leur invitation et leur soutien dans ce projet. Merci également à l'ensemble des domaines skiables qui ont répondu à notre enquête sur les pratiques de gestion de la neige ainsi qu'à Martine Dumas, Laurent Reynaud et Serge Riveill (Domaines Skiables de France), Dominique Létang (ANENA) et Thierry Gamot (Nordique France, Maire d'Autrans) pour leur soutien et leur aide. Merci également à la communauté scientifique de Grenoble et en particulier à Delphine Six (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, Grenoble, France) pour le prêt du carottier PICO au cours des deux hivers d'observations. Merci à Frédéric Ousset (Irstea), Yannick Deliot et Gilbert Guyomarc'h (CEN) pour leur aide dans la mise en place et le traitement des campagnes de terrain, et à l'ensemble des personnes d'Irstea et du CEN sollicitées au cours de ce travail. Merci tout particulièrement à Hugues François, Emmanuelle George-Marcelpoil, Matthieu Lafaysse, Yves Lejeune, Samuel Morin et Emmanuel Thibert pour leur implication dans ce travail. Merci à la Région Rhône-Alpes (Arc Environnement) qui finance ce doctorat ainsi qu'à la fondation "Eau, Neige et Glace" et au LabEx OSUG@2020 (ANR10 LABX56) qui ont également contribué au financement de ce projet.

Many thanks to all members of this PhD defence committee Pr. Sandrine Anquetin (CNRS research scientist, LTHE, Grenoble), Pr. Daniel Scott (Professor and university research chair, Waterloo University, Canada), Pr. Ulrich Strasser (Professor and university research chair, Innsbruck University, Autriche), Pr. Charles Fierz (Teamleader, WSL - SLF, Davos, Suisse) and Dr. Marc Pons (Research scientist, OBSA, Sant Julià de Lòria, Andorre) as well as the anonymous reviewers of the papers published from this work for their useful suggestions and comments.



# Table des matières

Résumé . . . . .	3
Remerciements . . . . .	5
1 Le ski à la croisée des chemins . . . . .	9
2 Variabilité climatique et vulnérabilité économique : introduction et revue de littérature des interactions entre neige, climat et activités de sports d'hiver . . . . .	13
3 Les pratiques professionnelles de gestion de la neige dans les domaines skiables français	17
3.1 Caractéristiques des domaines skiables . . . . .	18
3.2 Les priorités des opérateurs de domaines skiables . . . . .	19
3.3 Les moyens associés en neige de culture . . . . .	20
3.4 Pistes d'approfondissement et d'exploitation . . . . .	23
4 Observation et modélisation des conditions d'enneigement sur pistes de ski . . . . .	23
4.1 Développement d'un modèle numérique de simulation des effets du damage et de la production de neige sur l'évolution saisonnière du manteau neigeux . . . . .	24
4.2 Confrontation aux observations des sorties de modèle . . . . .	29
4.3 Evaluation du taux de conversion eau - neige de culture . . . . .	36
5 Détermination et application d'indicateurs de la viabilité de l'enneigement dans les domaines skiables des Alpes françaises sur la période 1958 - 2014 . . . . .	42
5.1 Introduction et méthodes . . . . .	42
5.2 Viabilité aux conditions d'enneigement et besoin en neige de culture . . . . .	49
6 Conclusion générale . . . . .	53
Bibliographie . . . . .	55
Publications . . . . .	63



# 1 Le ski à la croisée des chemins

A la suite des élections régionales de 2015 et la fusion des régions Auvergne et Rhône-Alpes, un plan d'investissement dans les activités de sports d'hiver a été annoncé publiquement avec l'objectif de "sécuriser l'enneigement et l'emploi" par le financement d'enneigeurs, notamment dans "les petites stations [qui] permettent à nos jeunes d'apprendre sans que ce ne soit trop cher"<sup>1</sup>. Cette annonce a été saluée par les acteurs de la filière<sup>2</sup> tandis que d'autres ont dénoncé l'abandon des territoires de montagnes hors domaines skiables<sup>3</sup> par un plan "neuf d'il y a quarante ans en arrière"<sup>4</sup>. Pour les opposants à ce plan, la montagne ne peut se limiter à l'industrie de la neige devenue trop élitiste et qui ne correspondrait pas plus aux aspirations des habitants qu'à celle des visiteurs d'aujourd'hui, interrogeant la pertinence de telles mesures dans un contexte de changement climatique. Ce nouvel épisode d'un débat déjà riche souligne les multiples facettes de l'activité des stations de sport d'hiver dont le développement repose au bout du compte sur un arbitrage nécessairement politique, seul à même d'établir l'équilibre entre intérêts, inconvénients, opportunités et risques sociaux, environnementaux, économiques et climatiques soulevés par l'industrie du ski.

**Une industrie majeure** A la fin de la seconde guerre mondiale le modèle économique fordiste a été adopté dans la plupart des filières industrielles en Europe et en France auquel l'agriculture n'a pas échappé. La recherche du rendement a écarté les territoires de montagne au climat et à la topographie trop rudes d'une compétition perdue d'avance. L'opportunité des activités des sports d'hiver s'est présentée pour ces territoires lorsque que les congés payés et une demande pour un tourisme de masse sont apparus dans les années 1950 (Francois and George-Marcelpoil, 2012). Les stations de la première heure (Chamonix, Val d'Isère, Megève) connaissent alors un essor spectaculaire tandis que de nouveaux complexes (Les Arcs, La Plagne, Isola 2000, etc.) entièrement dédiés à la pratique des sports d'hiver sont créés dans des espaces vierges jusque là. La construction immobilière finance des remontées mécaniques qui assurent en retour l'attractivité des stations et garantissent le remplissage des carnets de réservation (Fablet, 2013). A cette époque, la qualité de l'enneigement ne fait aucun doute et la progression de la fréquentation est forte. Au milieu des années 1980, l'industrie du ski est définitivement un acteur majeur de l'économie des territoires de montagnes. En 2014, 20% de la richesse produite en Savoie et Haute-Savoie est directement liée aux sports d'hiver (Lecuret et al., 2014). La France compte aujourd'hui dix des trente plus grandes stations de sports d'hiver dans le monde situées dans les Alpes françaises, et se place parmi les destinations les plus recherchées par les skieurs du monde entier avec les Etats-Unis et l'Autriche ou encore l'Italie, la Suisse et le Canada (Abegg et al., 2007; Vanat, 2014). La fédération des Domaines Skiables de France (DSF) annonce ainsi que pour chaque euro dépensé dans les remontées mécaniques, sept euros sont dépensés dans l'économie locale (hébergement, restauration, loisirs, etc.), assurant 150 000 emplois dans les régions de montagne en France (DSF, 2014).

**Fragilités structurelles** Le courant des années 1980 souligne pour la première fois les fragilités structurelles d'une industrie portée par la construction immobilière et exposée aux aléas naturels de l'enneigement. La construction d'immobilier neuf est soutenue par le besoin de renouvellement du parc

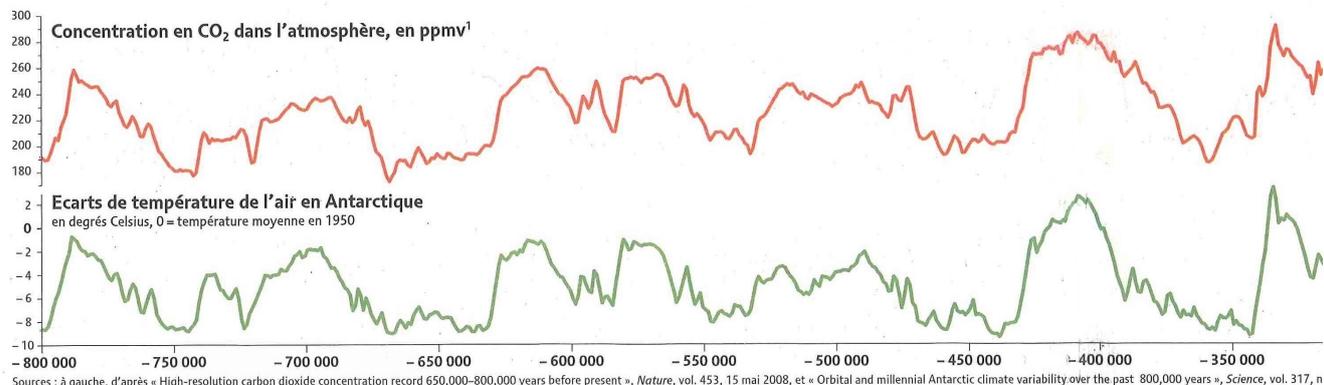
---

1. Laurent Wauquiez, 3 mai 2016, France 3 Régions

2. "Plan Neige Montagne : un lancement aux sons des canons!", Le Dauphiné Libéré, 3 mai 2016

3. Lettre ouverte de Frédi Meignan, président de Mountain Wilderness à Laurent Wauquiez et Gilles Chabert, 12 mai 2016.

4. Claude Comet, ex conseillère régionale chargée du tourisme et de la montagne, 4 mai 2016, France 3 Régions.



de remontées mécaniques pour des installations plus modernes et attractives et par l'urbanisation touristique que les Jeux Olympiques d'Albertville (1992) ont largement consolidée (Fablet, 2013). Les remontées mécaniques des domaines skiables se trouvant alors sous dimensionnées par rapport à la capacité d'accueil des stations, de nouvelles installations ont été envisagées et construites, engageant de ce fait l'économie des stations de sport d'hiver dans un cycle de croissance perpétuelle de l'immobilier (Pascal, 1993) souligné par les difficultés actuelles de rénovation et de renouvellement de ce parc. L'occurrence de plusieurs hivers consécutifs de faible enneigement (1989,1990,1993) a révélé à la même période la vulnérabilité des sports d'hiver au manque de neige du fait de l'exclusivité du ski comme seule activité de loisir (Lorit, 1991). Le manque de neige généralisé au cours de ces hivers a incité les domaines skiables à s'équiper en enneigeurs dans le but d'atténuer les effets de la variabilité naturelle du climat et des conditions d'enneigement. Ces équipements n'ont cessé de croître depuis les années 1990, soutenus par une logique de la branche professionnelle pour la garantie "neige" et la satisfaction du client skieur. Cette logique s'est trouvée renforcée depuis les années 2000 et l'introduction dans le débat public de la problématique du changement climatique<sup>5</sup>, les équipements de neige de culture constituant le principal outil d'atténuation des effets du changement climatique pour les domaines skiables (Trawöger, 2014).

**Observations du changement climatique** La prise de conscience publique du changement climatique au cours des années 1990 repose sur de nombreux travaux révélant un réchauffement significatif des températures à l'échelle du globe accompagné de changements du système climatique sans précédents depuis des dizaines, voire des milliers d'années (IPCC, 2014). Les rapports du Groupement Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) établissent également la responsabilité des activités humaines dans l'évolution récente du climat en lien avec l'augmentation remarquable des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère<sup>6</sup>, notamment depuis 1950 (Figure 1).

5. La troisième conférence des parties (COP3) de la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques s'est tenue à Kyoto (Japon) en 1997 et donné lieu au protocole de Kyoto (entrée en vigueur en 2005), le premier accord de référence internationale sur le climat.

6. Les gaz tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone ou le méthane présents dans l'atmosphère (GES) contribuent au processus physique naturel dit d'effet de serre. Ces GES absorbent une partie du rayonnement solaire et infrarouge terrestre et émettent un rayonnement infrarouge vers la Terre, deux actions combinées qui contribuent à un gain énergétique pour la surface de la Terre participant naturellement à son bilan énergétique (Trenberth et al., 2009). Cet équilibre thermique s'est trouvé perturbé par l'augmentation sans précédent depuis 800 000 ans des concentrations de GES dans notre atmosphère depuis 1950 dont les activités humaines constituent la source majeure, sans doute possible aujourd'hui (IPCC, 2014).

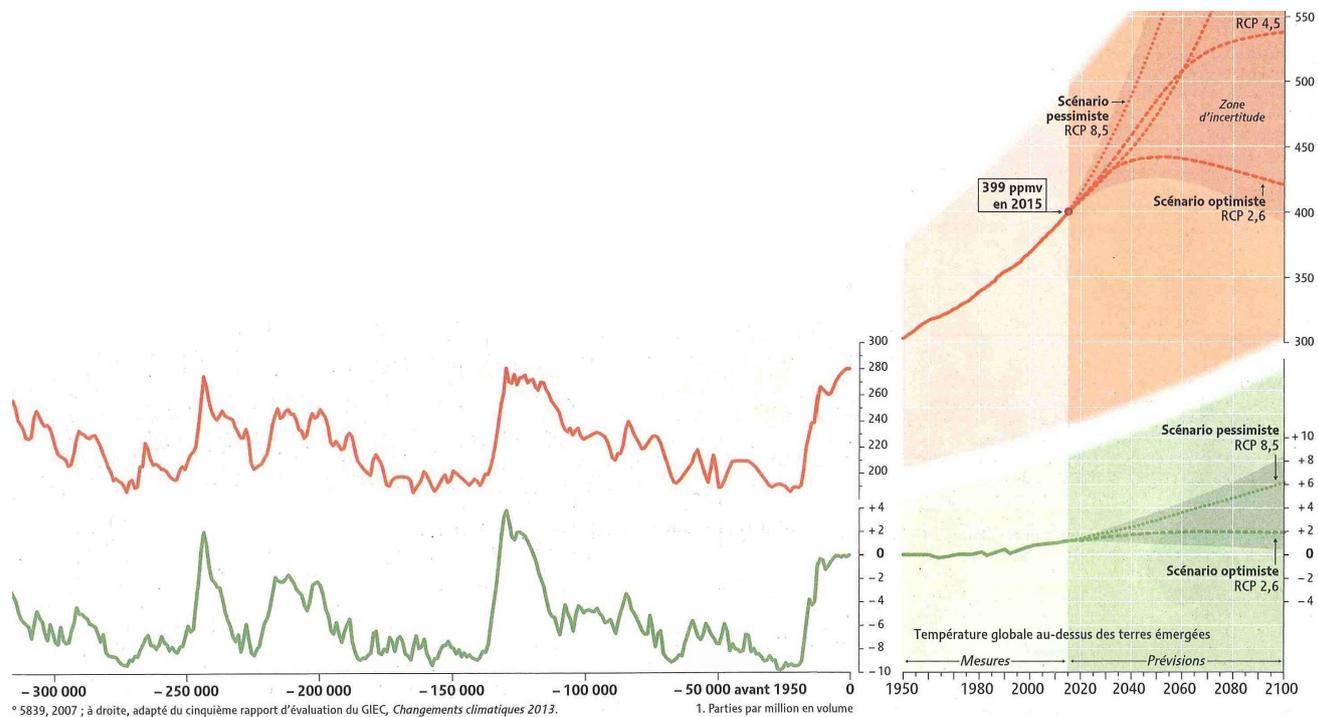


FIGURE 1 – Concentration en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l’atmosphère et température de l’air en Antarctique (écart à la température moyenne en 1950) depuis - 800 000 ans avant notre ère et projections pour le 21<sup>ème</sup> siècle (Martin, 2015)

Entre 1880 et 2012 l’évolution observée de la température moyenne à l’échelle du globe est estimée à +0.85°C, avec une probabilité de 90% que cette évolution se situe entre +0.65 et +1.06°C (IPCC, 2014). Ces évolutions ne sont pas homogènes à la surface de la Terre avec des réchauffements plus marqués notamment dans les massifs montagneux. Gobiet et al. (2014) ont estimé que la température moyenne dans les Alpes avait augmenté deux fois plus vite que la température moyenne dans l’hémisphère Nord avec une évolution assez homogène de +2°C sur l’ensemble des Alpes depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Durand et al. (2009b) ont calculé une évolution de +1.15°C des températures moyennes de l’air entre 1958 et 2002 dans les Alpes françaises. Au cours de cette même période, les quantités totales de précipitations n’ont pas connu d’évolution statistiquement significative dans la plupart des cas étudiés, leur évolution restant soumise à une forte variabilité spatiale et interannuelle (Beniston, 2006; Gobiet et al., 2014). Les conditions d’enneigement ont par conséquent évolué sous l’influence de la température qui gouverne en particulier la limite pluie-neige lors des épisodes de précipitations. Une hausse de température impliquant une élévation de cette limite entraîne à altitude égale une durée d’enneigement plus courte et une accumulation de neige moins importante au cours de la saison (Durand et al., 2009a; Marty, 2013). A titre d’exemple, la durée de la saison avec de la neige au sol a diminué de 6 jours par décennie entre 1960 et 2011 sur le site expérimental du Col de Porte (Chartreuse, France), à 1325 m d’altitude tandis que la hauteur moyenne de neige entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 avril a diminué de 13 cm par décennie (Lesaffre et al., 2012). L’ensemble de la communauté scientifique s’accorde sur la tendance de cette évolution des températures et du manteau neigeux, même si l’amplitude des effets demeure variable entre les massifs et les différentes altitudes (Gilaberte-Búrdalo et al., 2014; Gobiet et al., 2014).

En 2014, un nouveau rapport du GIEC a proposé quatre trajectoires possibles d’évolution des concentrations de gaz à effet de serre au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, baptisées RCP<sup>7</sup>(IPCC, 2014).

7. Representative Concentration Pathway (RCP)

Ces trajectoires<sup>8</sup> incluent deux scénarii correspondant à une poursuite de la croissance démographique et économique que nous connaissons actuellement, sans politique environnementale (RCP6.0 et 8.5), un scénario de prise en compte du changement climatique et de stabilisation des émissions de GES (RCP4.5) et un scénario de réduction drastique des émissions de GES (RCP2.6). Une augmentation de la température moyenne à l'échelle de la planète limitée à +2°C correspondrait selon le GIEC à un cumul d'émissions de GES par les activités humaines depuis le début de l'ère industrielle de l'ordre de 2900 GtCO<sub>2</sub><sup>9</sup> tandis que ce cumul atteignait 1900 GtCO<sub>2</sub> en 2011 (IPCC, 2014). Le seul scénario RCP permettant d'atteindre cet objectif de limitation du réchauffement à un maximum de +2°C à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle est le RCP2.6, le plus optimiste. Du fait de l'inertie du système climatique, les évolutions pour la première moitié du siècle sont proches entre les scénarii avec une augmentation projetée des températures de +0.3 à +0.7°C en 2035 par rapport à la période 1986 - 2005. Les massifs montagneux continueront à subir des effets plus marqués que la moyenne mondiale avec une élévation projetée de la température moyenne de +1.5°C au cours de la période 2021 - 2050 par rapport à la période référence 1961 - 1990 (Rousselot et al., 2012; Gobiet et al., 2014). L'enneigement sera impacté par ces changements de température à toutes les altitudes et en particulier aux altitudes moyennes, en dessous de 1500 à 2000 m (Rousselot et al., 2012; Kotlarski et al., 2012; Marty, 2013). Abegg et al. (2007) ont estimé que la limite d'altitude correspondant à une durée de 100 jours avec au moins 30 cm de neige au sol s'élèverait de 150 m par degré Celsius d'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air. Rousselot et al. (2012) estiment que l'enneigement moyen sur les mois de décembre, janvier et février va diminuer d'au moins 30% sur la période 2021 - 2050 par rapport à 1961 - 1990. L'expérience à plusieurs reprises depuis la fin des années 1980 de la vulnérabilité des domaines skiables aux conditions d'enneigement associée à la perspective d'une évolution significative de ces conditions a soulevé un fort intérêt de la part des décideurs politiques comme des professionnels pour des éléments de réponse par la communauté scientifique sur les impacts du changement climatique sur l'activité des stations de sports d'hiver.

**Interactions climat - activités humaines** L'enjeu pour la fourniture d'éléments les plus pertinents, objectifs et fiables possibles aux décideurs politiques et industriels réside dans le caractère dynamique et interactif de la relation entre les conditions climatiques (météorologie, enneigement) et les activités des stations de sport d'hiver (gestion de la neige, réussite économique). La prise en compte de ces interactions (Figure 2) entre activités humaines (attentes et interventions) et conditions d'enneigement (variabilité, imprévisibilité) constitue l'objectif général de ce travail et repose sur deux piliers. D'abord l'identification des priorités poursuivies, des moyens mis en oeuvre et des contraintes subies par les gestionnaires dans leurs opérations quotidiennes pour la production d'un cadre synthétique et modélisable des pratiques de gestion de la neige dans les domaines skiables Français (voir manuscrit). Ensuite le développement et la confrontation à des observations, toute action humaine connue, d'une chaîne de modélisation physique des conditions d'enneigement dans les domaines skiables (voir manuscrit). Une fois intégrés, ces deux piliers permettent de modéliser à une échelle spatiale fine les conditions d'enneigement dans l'ensemble des domaines skiables des Alpes françaises qui prennent en compte les méthodes de gestion de la neige telles que le damage et la production de neige de culture. Cette approche systématique permet la détermination d'indicateurs pertinents et objectifs sur les conditions d'enneigement pour des études prospectives de l'activité socio-économique des domaines skiables des

8. Le chiffre correspond à une évolution du rayonnement incident net à la fin du siècle. Par exemple, le RCP8.5 correspond à une augmentation de +8.5 W m<sup>-2</sup> du forçage radiatif à la surface de la Terre entre la période pré-industrielle et 2100

9. 1 GtCO<sub>2</sub> ou 1 million de tonnes d'équivalent carbone, CO<sub>2</sub> (IPCC, 2014)

Alpes françaises (Figure 2) dont le potentiel et la fiabilité sont discutés dans une analyse rétrospective de la période 1958 - 2014 (voir manuscrit).

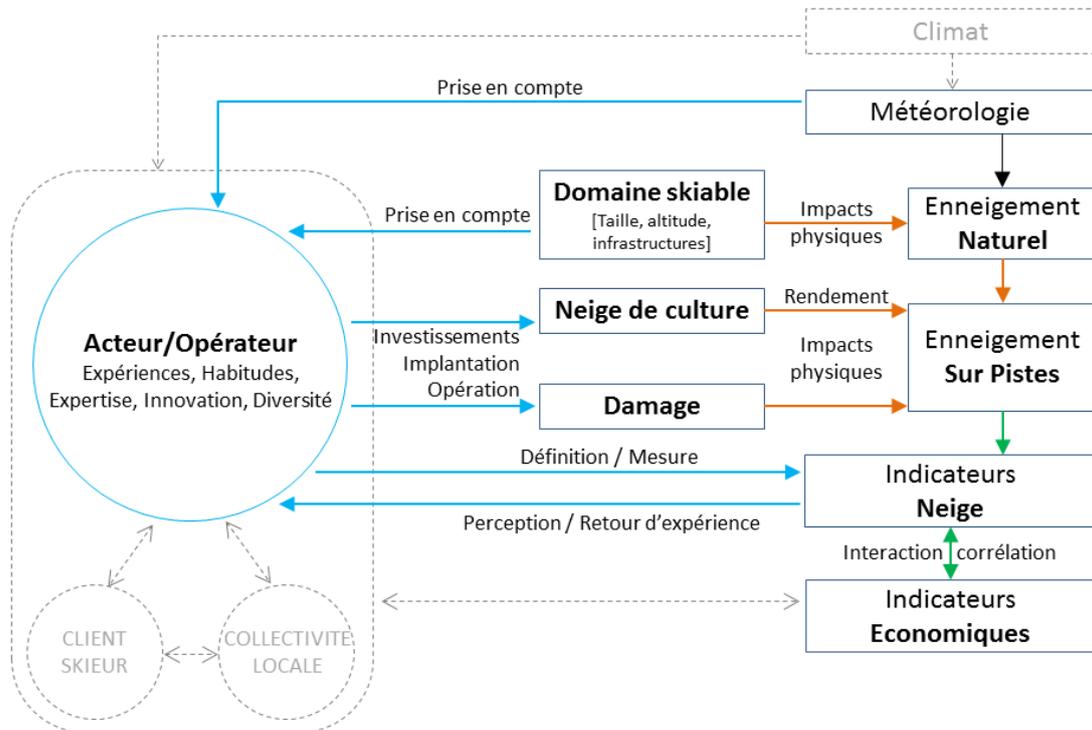


FIGURE 2 – Contours de ce travail de thèse. Les interactions bleu correspondent à l'approche professionnelle de la gestion de la neige. Les interactions orange correspondent aux impacts physiques de la gestion de la neige sur les propriétés du manteau neigeux (voir manuscrit). Les interactions vertes correspondent à l'intégration de ces dimensions pour la détermination d'indicateurs pertinents pour l'étude d'impact de l'enneigement sur l'activité socio-économique des stations de sports d'hiver. Les flèches grises correspondent à des interactions d'intérêt pour l'étude des domaines skiables qui ne sont pas prises en compte dans ce travail.

## 2 Variabilité climatique et vulnérabilité économique : introduction et revue de littérature des interactions entre neige, climat et activités de sports d'hiver

**Introduction** Le ski constitue l'attraction majeure du tourisme hivernal (83% des visiteurs sont pratiquants) loin devant la seconde (la raquette à neige, 16% des visiteurs pratiquants, Lecuret et al. 2014). Cet état de fait incite les opérateurs de domaines skiables à porter une grande attention aux conditions nécessaires à la pratique du ski, notamment l'enneigement, à l'origine de méthodes de gestion de la neige de plus en plus techniques et professionnelles (Fauve et al., 2002). La méthode de damage a été initialement développée aux Etats-Unis (Leich, 2001) pour apporter du confort et de la sécurité

aux pratiquants (Bergstrom and Ekeland, 2004) et améliorer la résistance du manteau neigeux face à l'érosion par les skieurs (Guily, 1991; Fauve et al., 2002) et l'ablation par les processus naturels tels que le vent et la fonte (Keller et al., 2004; Rixen et al., 2004). Emile Allais a été le premier à importer cette méthode en France dans les années 1950 à Courchevel (Vanoise, Alpes). Aujourd'hui, pour autant que nous sachions, toutes les stations dament leurs pistes. Pour autant, le damage ne permet pas de compenser d'éventuels déficits de l'enneigement naturel liés à la variabilité interannuelle du climat et de l'enneigement (Durand et al., 2009a; Beniston, 1997). La vulnérabilité des domaines skiables au déficit d'enneigement est apparue au grand jour à la fin des années 1980 lorsque plusieurs saisons consécutives de faible enneigement sont survenues (Durand et al., 2009b), marquant ainsi le point de départ du développement à grande échelle des équipements en neige de culture en France (Badré et al., 2009). La concurrence entre le marché français du ski et les destinations internationales ou encore avec les activités touristiques alternatives (Morrison and Pickering, 2013) a conduit les opérateurs de domaines skiables à chercher à réduire la dépendance de leur activité aux conditions naturelles d'enneigement grâce à la neige de culture (Hopkins, 2015; Trawöger, 2014). Les opérateurs placent également leur confiance dans l'innovation technologique, soit pour adopter cette méthode là où elle est actuellement absente ou d'intérêt incertain soit pour permettre la production de neige dans des conditions de plus en plus marginales (Hopkins and Maclean, 2014; Hopkins, 2015) sous l'effet du changement climatique (Beniston, 2006; Marke et al., 2014).

L'économie des activités touristiques hivernales a fait l'objet de travaux en conditions passées, actuelles ou projetées du climat en utilisant de nombreux indicateurs tels que les ventes de forfaits de ski (Falk, 2014; Koenig and Abegg, 1997), le nombre de nuitées (Falk, 2010; Töglhofer et al., 2011; Lecuret et al., 2014) ou de produit intérieur brut (Damm et al., 2014; Lecuret et al., 2014). Un défi majeur pour les chercheurs intéressés par la vulnérabilité des activités hivernales face au changement climatique est d'associer ces indicateurs à des variables climatiques telles que la hauteur de neige moyenne (Falk, 2014), le nombre de jours avec de la neige au sol (Töglhofer et al., 2011), ou dépassant un seuil d'épaisseur (Scott et al., 2003; Schmidt et al., 2012; Hanzer et al., 2014; François et al., 2014) ou de masse de neige (Marke et al., 2014). Les difficultés pour combiner de telles approches pluridisciplinaires (Strasser et al., 2014) ou en comparer les résultats (Neuvonen et al., 2015) ont amené la communauté scientifique à établir une règle générique de viabilité aux conditions d'enneigement dite des "100 jours" qui stipule qu'un domaine skiable est viable s'il bénéficie d'une épaisseur de neige d'au moins 30 cm pendant au moins 100 jours (Elsasser et al., 2002; Scott et al., 2003). Cette règle a été employée pour déterminer l'altitude de viabilité de l'enneigement naturel des régions alpines (Elsasser et al., 2002; Abegg et al., 2007), le déclin de la durée de la saison de ski du fait du changement climatique ou encore les quantités de neige de culture requises pour compenser cette diminution de durée (Scott et al., 2003; Steiger, 2010). L'emploi de cette règle dépend cependant d'un seuil d'épaisseur de neige requise qui varie dans la littérature selon la région considérée (Scott and McBoyle, 2007; Pons-Pons et al., 2012) ou la période de la saison (Hennessy et al., 2007; Hanzer et al., 2014; Damm et al., 2014). Néanmoins cette règle a permis d'étudier la viabilité et la capacité d'adaptation de l'industrie du ski au changement climatique par la neige de culture en Australie (Hennessy et al., 2007), Nouvelle-Zélande (Hendrikx and Hreinsson, 2012), Andorre (Pons-Pons et al., 2012), dans les Pyrénées espagnoles et françaises (Pons et al., 2015), en Allemagne (Schmidt et al., 2012), en Suisse (Rixen et al., 2011), en Autriche (Steiger, 2010; Töglhofer et al., 2011; Damm et al., 2014), aux Etats-Unis d'Amérique (Dawson and Scott, 2013) et au Canada (Scott et al., 2003; Scott and McBoyle, 2007). Etonnamment, les Alpes françaises et italiennes sont des régions majeures dans le marché international du ski pour lesquelles très peu d'études ont été réalisées et se limitent à l'analyse des conditions en neige naturelle (Elsasser

et al., 2002; Abegg et al., 2007; Rousselot et al., 2012; François et al., 2014).

**Le damage** Le damage est une méthode de préparation des pistes de ski aujourd'hui généralisée (Fauve et al., 2002). Le damage modifie significativement les propriétés du manteau neigeux (Keddy, 1979; Fahey et al., 1999; Keller et al., 2004; Rixen et al., 2004; Mossner et al., 2013; Howard and Stull, 2014; De Jong et al., 2015). Fahey et al. (1999) ont suivi quatre pistes damées et mesuré une densité moyenne de la neige supérieure de 36% à la densité de la neige naturelle. Mossner et al. (2013) ont réalisé 344 mesures de densité sur des pistes de ski dont les valeurs allaient de 420 à 620 kg m<sup>-3</sup> avec une moyenne de 556 kg m<sup>-3</sup>.

La conductivité thermique (Calonne et al., 2011) et la résistance mécanique de la neige (Keller et al., 2004; Howard and Stull, 2014) étant fortement corrélées à la densité de la neige, l'augmentation de la densité de la neige affecte les comportements thermiques et mécaniques du manteau neigeux. Rixen et al. (2004) ont observé dix sites de neige damée et mesuré une différence de - 1°C de la température du sol sous couvert neigeux par rapport aux températures sous un manteau neigeux non damé avec une plus grande fréquence de gel sous couvert neigeux damé. Ces évolutions du comportement thermique du manteau neigeux retardent la date de fonte totale de plusieurs semaines (Rixen et al., 2004; Keller et al., 2004). Par ailleurs, Keller et al. (2004) ont estimé à partir d'observations et de modélisation des conditions de neige damée que la résistance à l'enfoncement de la neige augmente d'un facteur dix lorsque la densité de la neige double, passant de 200 à 400 kg m<sup>-3</sup>.

En résumé, le damage allonge la période de couverture neigeuse et augmente la résistance mécanique du manteau neigeux face à l'érosion par les skieurs (Federolf et al., 2006). Le damage a également un impact bénéfique sur l'accidentologie des pratiquants. Bergstrom and Ekeland (2004) ont conclu à partir du suivi des accidents dans sept stations norvégiennes que la fréquence de damage avait un impact positif sur le nombre d'accidents. Fauve et al. (2002) ont synthétisé l'intérêt du damage sur la base de la littérature et d'entretiens avec des professionnels : les pistes sont rendus plus sûres, plus uniformes (pas de surprises), proposent un bonne "accroche" du ski (pas de glace), sont visuellement attractives et résistent mieux à l'érosion par les skieurs et les conditions météorologiques.

**Variabilité, changement climatique et neige de culture** Durand et al. (2009b) ont analysé 47 saisons hivernales entre 1958 et 2005 en combinant modélisation et observations et ont démontré une variabilité significative, spatiale et temporelle des conditions d'enneigement dans les Alpes françaises. Cette variabilité est maximale aux altitudes moyennes, autour de 1500 m d'altitude. Des résultats similaires ont été démontrés dans les autres massifs alpins (Gobiet et al., 2014; Beniston, 1997) et en Amérique du Nord (Hughes and Robinson, 1996). La plupart des études d'impact du changement climatique indique que cette variabilité interannuelle va rester significative dans les décennies à venir, quel que soit le scénario d'évolution climatique envisagé (Rousselot et al., 2012; Castebrunet et al., 2014; Kotlarski et al., 2014; Marke et al., 2014).

François et al. (2014) ont étudié les conditions d'enneigement naturel dans les domaines skiables des Alpes françaises sur la période 2001 - 2012, en prenant en compte leurs spécificités géographiques (altitude, pente, orientation) et calculé un indice de viabilité défini comme la fraction du domaine skiable dont l'épaisseur de neige au sol dépasse 30 cm pendant au moins 100 jours. La viabilité moyenne des petites stations s'étale entre 18 et 90% tandis que les très grandes stations ont un indice moyen de 65 à 97%, principalement du fait de leur plus haute altitude. La vulnérabilité des domaines skiables aux conditions d'enneigement naturel a été confirmée pour l'ensemble des pays de l'Arc alpin (Elsasser et al., 2002; Abegg et al., 2007). Falk (2010) a estimé à partir d'un échantillon de 28 stations autrichiennes

sur la période 1986 - 2005 que le nombre de visiteurs diminue lorsque l'épaisseur de neige diminue pour les stations dont l'altitude moyenne se situe en dessous de 2000 m, même si la neige de culture atténue cette baisse de fréquentation. Sur la base d'un grand nombre de domaines skiables autrichiens et sur une longue période de temps (1972 - 2011), Töglhofer et al. (2011) ont conclu qu'une augmentation d'une valeur égale à un écart-type des conditions d'enneigement (combinaison de la hauteur moyenne de neige, de la durée de saison avec neige au sol et avec plus de 30 cm d'épaisseur) conduit à une augmentation de 0.6 à 1.1% du nombre de nuitées dans la station. Comme Falk (2010), cette relation a été établie pour les stations dont l'altitude moyenne est située en dessous de 1800 m d'altitude. Au-delà, une relation négative aux conditions d'enneigement a été établie (Falk, 2010; Töglhofer et al., 2011). Trawöger (2014) a interrogé 24 experts du milieu professionnel dans les Alpes autrichiennes (dirigeants de sociétés de remontées mécaniques, d'offices du tourisme) et conclu que la dépendance aux conditions d'enneigement naturel était le principal moteur du développement des équipements en neige de culture dans les domaines skiables. Hopkins (2015) a tiré les mêmes conclusions d'entretiens de 14 responsables de l'industrie du ski de la région de Queenstown (Nouvelle-Zélande). En 2005, 50% des pistes étaient équipées en neige de culture en Autriche, 18% en Suisse, 16% en France et 40% en Italie (Abegg et al., 2007). En Ecosse, Hopkins and Maclean (2014) ont réalisé des entretiens de responsables dans les cinq domaines skiables de la région et conclu que la production de neige de culture n'était pas viable économiquement en raison de conditions météorologiques inadaptées. Les récents développements des équipements en neige de culture traduisent ainsi une perception confuse et contradictoire du changement climatique par les opérateurs de domaines skiables (Hopkins and Maclean, 2014; Trawöger, 2014). La perception par le monde extra professionnel (grand public, élus) de la vulnérabilité des stations au changement climatique et des conséquences possibles (Dawson and Scott, 2013; Morrison and Pickering, 2012), génère également une stratégie corporatiste vis-à-vis de la neige de culture. D'un côté, les opérateurs de domaines skiables minimisent les risques liés aux déficits d'enneigement naturel (Hopkins and Maclean, 2014), d'un autre côté, ils justifient de nouveaux développements en équipements en mettant en avant la pertinence de la neige de culture pour limiter les effets de la variabilité ou du changement climatique (Morrison and Pickering, 2012; Trawöger, 2014) même si les stations de basse et moyenne altitude restent négativement impactées par les saisons de faible enneigement (Pickering, 2011; Schmidt et al., 2012; François et al., 2014; Francois et al., 2016). Au contraire, l'activité des stations de haute altitude ne montre aucune dépendance (Falk, 2010), voire une dépendance négative à la qualité de l'enneigement (Koenig and Abegg, 1997; Töglhofer et al., 2011), pourtant elles investissent dans des équipements de neige de culture (Falk, 2014) et l'emploient comme argument commercial ("garantie neige", retour ski aux pieds, connexion entre stations). Les leviers pour le développement de la neige de culture dans les domaines skiables demeurent donc très subjectifs et variables d'un site à l'autre (Trawöger, 2014).

Les études d'impact du changement climatique montrent cependant que la durée de la saison de ski va diminuer dans les décennies à venir malgré la neige de culture (Marke et al., 2014) et que la production de neige est une méthode d'adaptation efficace à court voire moyen terme (Pickering, 2011; Schmidt et al., 2012; Morrison and Pickering, 2013) mais s'interrogent sur sa pertinence sur le long terme en raison de son impact sur l'environnement (De Jong et al., 2015), sur le besoin accru en eau (Vanham et al., 2009) et du fait de l'augmentation des coûts de l'énergie (Damm et al., 2014). Hennessy et al. (2007) ont calculé le temps de production disponible et le besoin en neige de culture pour six stations australiennes et conclu que la neige de culture était une solution pertinente jusqu'en 2020 et sans doute insuffisante en 2050, selon le scénario climatique envisagé. Steiger (2010) a étudié l'impact du changement climatique sur trois stations autrichiennes et conclu que leur fonctionnement

serait viable jusqu'en 2040 grâce à la neige de culture. Au-delà, des incertitudes significatives existent, en particulier pour les domaines de basse altitude, malgré la neige de culture. Pons-Pons et al. (2012) ont établi la viabilité de trois stations de haute altitude en Andorre (au-delà de 1900 m) et montré que la neige de culture était une solution viable dans l'hypothèse d'une hausse de température de +2°C mais sans doute pas dans l'hypothèse d'une hausse de +4°C.

**La modélisation de la gestion de la neige** Les études d'impact du changement climatique sur les conditions d'enneigement qui prennent en compte la production de neige de culture utilisent des schémas généraux pour gérer la production de neige de culture en fonction de conditions optimales à atteindre (Scott et al., 2003; Scott and McBoyle, 2007; Steiger, 2010). Dans la mesure où ces modèles ne sont en général pas capables de prendre en compte les effets liés au damage, les pratiques et équipements de damage ont fait l'objet de très peu d'attention (Guily, 1991; Howard and Stull, 2014). Plusieurs schémas de gestion de la production de neige ont été employés (Scott et al., 2003; Steiger, 2010; Pons-Pons et al., 2012; Hanzer et al., 2014) en travaillant sur la saison entière ou par périodes et en variant les seuils de production : température minimale, épaisseur de neige minimale à produire ou à maintenir. Scott et al. (2003); Scott and McBoyle (2007); Steiger (2010); Pons-Pons et al. (2012) ont utilisé la température de l'air sec pour contrôler la production (seuils de -5°C ou - 2°C) et Rixen et al. (2011) la température du point de rosée (seuil de - 4°C) alors que la variable la plus pertinente utilisée par les nivoculteurs professionnels est la température du thermomètre mouillé  $T_w$ , ou température "humide" (Olefs et al., 2010; Hanzer et al., 2014). Le seuil de faisabilité technique aujourd'hui indiqué par les constructeurs est  $T_w = - 2^\circ\text{C}$  (Olefs et al., 2010; Hanzer et al., 2014) alors que les pratiques des professionnels peuvent être très diverses (Hendriks and Hreinsson, 2012). L'épaisseur de neige nécessaire à la pratique du ski est fixée à 30 cm par la règle des "100 jours". Cependant, Scott et al. (2003) ont défini une épaisseur de 50 cm pour estimer les quantités de neige de culture nécessaires pour l'activité ski en Ontario, Scott and McBoyle (2007) ont défini l'objectif à 60 cm à Québec et Pons-Pons et al. (2012) à 30 cm en Andorre. Les trois ont défini la saison de production comme la période entre le 22 novembre et le 30 mars. Hennessy et al. (2007) ont divisé la saison hivernale australienne en cinq mois de l'ouverture à la fermeture et défini une épaisseur cible pour chaque mois sur la base d'entretiens avec des opérateurs de domaines skiables (20 cm minimum pour l'ouverture jusqu'à 100 cm en coeur de saison et diminuant jusqu'à 20 cm en fin de saison). D'après Steiger (2010) et Schmidt et al. (2012) en Autriche, une épaisseur minimum de 30 cm doit être produite, constituant une "sous couche" avant de maintenir une épaisseur minimale fixée également à 30 cm, entre le 1<sup>er</sup> novembre et le 30 mars. De manière similaire Hanzer et al. (2014); Damm et al. (2014) ont défini une période de pré-saison (1<sup>er</sup> novembre au 15 décembre) au cours de laquelle une "sous-couche" de 30 cm doit être produite avant de maintenir une épaisseur minimale de 60 cm entre le 16 décembre et le 28 février, en Autriche également. A notre connaissance aucune étude n'a porté sur les modes de gestion de la neige de culture des domaines skiables français afin de les situer dans la diversité des approches employées en Andorre, Autriche, Australie, Etats-Unis d'Amérique et Canada.

### **3 Les pratiques professionnelles de gestion de la neige dans les domaines skiables français**

Dans le cadre de cette thèse, une enquête en ligne a été mise à disposition à l'automne 2014 et envoyée à l'attention de 161 contacts d'opérateurs de domaines skiables fournis par l'Association

Nationale des Directeurs de Pistes et de la Sécurité de Stations de Sports d'Hiver (ADSP). Un code unique a été attribué à chacun afin de garantir la confidentialité et un accès personnel. 56 stations ont participé à cette enquête dont 18 le jour de la diffusion de l'information, lors de l'assemblée générale de l'ADSP le 7 octobre 2014. La plupart des participants sont des domaines alpins : 11 des Alpes du Sud<sup>10</sup> et 33 des Alpes du Nord<sup>11</sup> dont 21 dans la seule Savoie (73). Huit stations des Pyrénées ont également participé<sup>12</sup>, deux du Jura<sup>13</sup>, une du Massif Central<sup>14</sup> et une des Vosges<sup>15</sup>.

### 3.1 Caractéristiques des domaines skiables

La base de données socio-économiques "BD Stations" (Marcelpoil et al., 2012) a été utilisée pour traiter les résultats de cette enquête et évaluer la représentativité de cet échantillon dans l'ensemble des domaines français. La "BD stations" contient notamment des données sur les remontées mécaniques des domaines skiables français : leur localisation géographique et des informations quantitatives issues du CAtnalogue Informatisé des Remontées mécaniques Nationales (CAIRN, fourni par le Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés - STRMTG), ce qui inclut pour chaque appareil ses altitudes basse et haute, son moment de puissance (produit du dénivelé et du débit théorique, exprimé en km pers h<sup>-1</sup>). Les données agrégées du moment de puissance des remontées mécaniques (RM) pour chaque station permettent de classer les domaines skiables en quatre catégories (typologie inspirée de celle des Domaines Skiables de France, Table 1).

Catégorie de station	Petites stations (S)	Stations moyennes (M)	Grandes stations (L)	Très grandes stations (XL)
Moment de puissance (MP) (km pers h <sup>-1</sup> )	MP < 2500	2500 < MP < 5000	5000 < MP < 15000	15000 < MP

TABLE 1 – Catégories de stations selon leur moment de puissance employées par (François et al., 2014) et inspirées de Domaines Skiables de France

Les 55 stations de l'échantillon représentent 25% des 220 stations françaises (DSF, 2011). Seules 5% des petites stations sont représentées contre 38% des moyennes, 65% des grandes et 62% des très grandes. Bien que leur nombre est très important, les petites stations ne représentent pourtant qu'une part minoritaire du MP français (7% au niveau national). L'échantillon de 55 stations représente dans son ensemble 51% du moment de puissance français. Des détails supplémentaires peuvent être trouvés dans le manuscrit. Cette enquête montre la disparité géographique des domaines skiables en fonction de leur taille. Six des huit très grandes stations participantes sont situées en Savoie et les 16 plus grandes dans les Alpes du Nord. Le MP moyen en Savoie est de 11 400 km pers h<sup>-1</sup> et respectivement de 10 500, 5600, 4200 et 4600 km pers h<sup>-1</sup> dans le reste des Alpes du Nord, les Alpes du Sud, les Pyrénées et dans les autres massifs français. L'âge moyen des RM en Savoie est de 18.7 ans pour une altitude moyenne de 2110 m. Dans le reste des Alpes du Nord, les Alpes du Sud et les Pyrénées l'âge moyen est de 21 à 22 ans et l'altitude moyenne de 1860 à 2020 m. Les plus grandes stations françaises bénéficient

10. Départements Alpes-de-Haute-Provence (04), Hautes-Alpes (05), Alpes-Maritimes (06).

11. Départements Isère (38), Savoie (73), Haute-Savoie (74).

12. Départements Ariège (09), Haute-Garonne (31), Pyrénées-Atlantiques (64), Hautes-Pyrénées (65), Pyrénées-Orientales (66) et Andorra.

13. Départements Jura (39).

14. Départements Cantal (15).

15. Département Vosges (88).

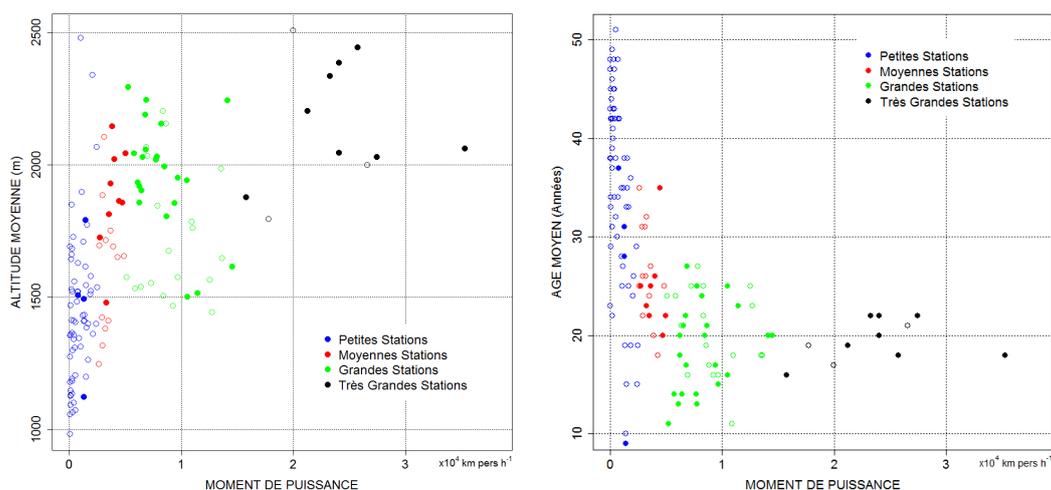


FIGURE 3 – a. Altitude moyenne (m) (gauche) et b. Age moyen (droite) des remontées mécaniques des stations participantes (●) et des autres stations des Alpes Françaises (○)

donc des RM les plus récentes dans les plus hauts secteurs d'altitude (Figure 3) et sont situées d'abord en Savoie puis dans l'ordre dans le reste des Alpes du Nord, les Alpes du Sud et les Pyrénées.

### 3.2 Les priorités des opérateurs de domaines skiables

D'après les résultats de l'enquête, trois priorités générales peuvent être identifiées : satisfaire la clientèle, fournir des solutions techniques pour y parvenir et assurer l'image et la promotion du domaine skiable. La satisfaction des attentes des skieurs est la première priorité : fournir des conditions de ski confortables (note moyenne 9.0/10), permettre le retour ski aux pieds jusqu'au village (8.8/10). Viennent ensuite la contrainte technique de la résistance du manteau neigeux à l'érosion par les skieurs ou les conditions météorologiques (8.2/10) parallèlement au maintien d'une épaisseur suffisante pour garantir l'activité (8.1/10). L'épaisseur minimum à maintenir est homogène entre catégories avec 40 à 50 cm de neige. L'épaisseur requise dépend également de la période de la saison, ce qui montre la prise en compte de l'évolution des conditions dans le temps (voir manuscrit) avec une épaisseur de 60 cm en coeur d'hiver (février) et une décroissance d'environ 10 cm par mois jusqu'à la fermeture du domaine (Figure 4).

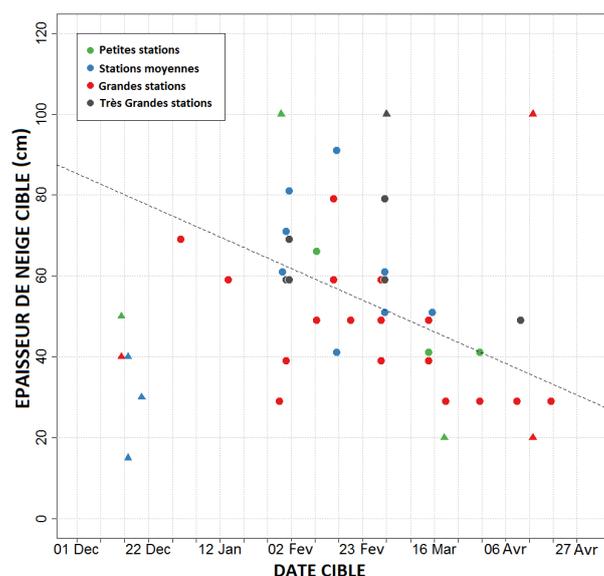


FIGURE 4 – Epaisseur de neige à atteindre à un date données selon les stations participantes à l'enquête. Le modèle linéaire ne prend pas en compte les points triangulaires qui correspondent soit à la contrainte d'ouverture (vacances de Noël), soit au minimum ou au maximum des réponses que nous avons retirés (respectivement 20 et 100 cm).

Enfin la promotion du domaine apparaît avec la volonté de proposer des pistes visuellement attractives (8.1/10) et de garantir le lien avec une station par les RM (voir manuscrit).

Ces objectifs peuvent être réalisés grâce à l'intervention des engins de damage (résistance mécanique, aspect visuel) ce qui conduit les domaines à damer près des deux tiers des pistes chaque jour avec un équipement corrélé avec la surface du domaine : autour de 20 hectares par engin (voir manuscrit). Dans le cas où l'épaisseur de neige est en deçà des objectifs d'épaisseur de neige cités ci-dessus, la production de neige de culture peut permettre de compenser le manque.

### 3.3 Les moyens associés en neige de culture

**Equipements** D'après les résultats de l'enquête, l'équipement en neige de culture est similaire aujourd'hui dans les moyennes à très grandes stations avec 30 à 35% des surfaces équipées en neige de culture (Table 2). Les grandes à très grandes stations sont cependant celles qui développent le plus leur équipement en neige de culture et devraient être les plus équipées à l'échéance de 2020 (Table 2). La vulnérabilité des domaines aux conditions d'enneigement naturel semble être un facteur influant sur le développement de la neige de culture même si elle n'est sans doute qu'un facteur parmi d'autres, et sans doute pas le plus important (voir manuscrit), ce qui confirme le caractère composite de la stratégie d'équipement. La relation entre le taux d'équipement et la vulnérabilité des domaines à l'enneigement naturel (François et al., 2014) est assez faible (Figure 5). Pourtant, l'indice de viabilité calculé par François et al. (2014) à l'enneigement naturel est respectivement de 83% et 65% dans les Alpes du Nord et les Alpes du Sud sur la période 2001 - 2012, avec des surfaces équipées en enneigeurs respectivement de 32% et 41%.

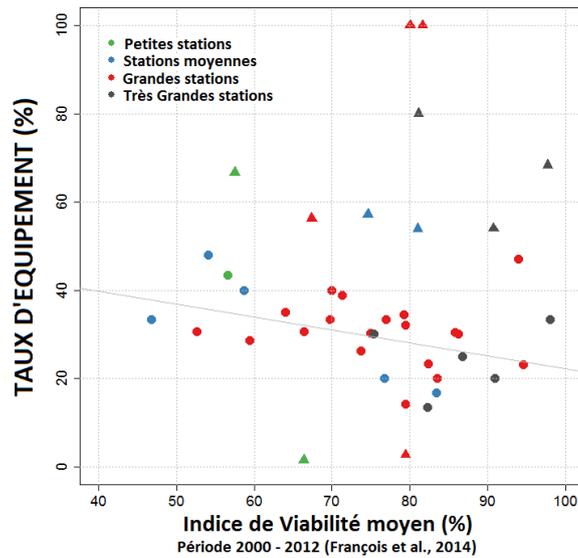


FIGURE 5 – Taux d'équipement en fonction de l'indice de viabilité en neige naturelle (%) d'après François et al. (2014) pour les stations participantes à l'enquête (période 2001 - 2012). Le modèle linéaire ne prend pas en compte les points triangulaires qui excèdent 50% ou sont inférieurs à 10% de surface équipée en enneigeurs.

Catégorie de station	Petites stations (S)	Stations moyennes (M)	Grandes stations (L)	Très grandes stations (XL)
<b>Surface de piste équipée en neige de culture (%)</b>	<b>18 ± 25</b>	<b>34 ± 16</b>	<b>35 ± 21</b>	<b>34 ± 24</b>
<b>Capacité actuelle des retenues par hectare de piste équipée (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>1450 ± 2350</b>	<b>1800 ± 1650</b>	<b>1700 ± 1600</b>	<b>1500 ± 1300</b>
<b>Extension prévue des équipements en enneigeurs ?</b> Ont répondu "Oui" (%)	<b>71</b>	<b>57</b>	<b>88</b>	<b>100</b>
<b>Surface équipée en 2020 (%)</b>	<b>34 ± 32</b>	<b>39 ± 17</b>	<b>47 ± 46</b>	<b>49 ± 38</b>

TABLE 2 – Equipements actuels et à l'horizon 2020 en neige de culture (± écart-type).

D'après les résultats de l'enquête, les retenues d'altitude sont la première source d'approvisionnement en eau pour la production de neige : une station sur trois n'a que cette seule ressource en eau et la plupart y ont recours en association avec les réseaux d'eau potable ou les cours d'eau naturels. La capacité est liée à la surface équipée en neige de culture : 1500 à 1800 m<sup>3</sup> par hectare de piste équipée, 1900 m<sup>3</sup> par hectare en moyenne pour les stations qui n'ont que la retenue comme source d'approvisionnement. Ces capacités correspondent à une épaisseur de neige de culture de 38 à 48 cm avec une densité de 400 kg m<sup>-3</sup> (Hanzer et al., 2014).

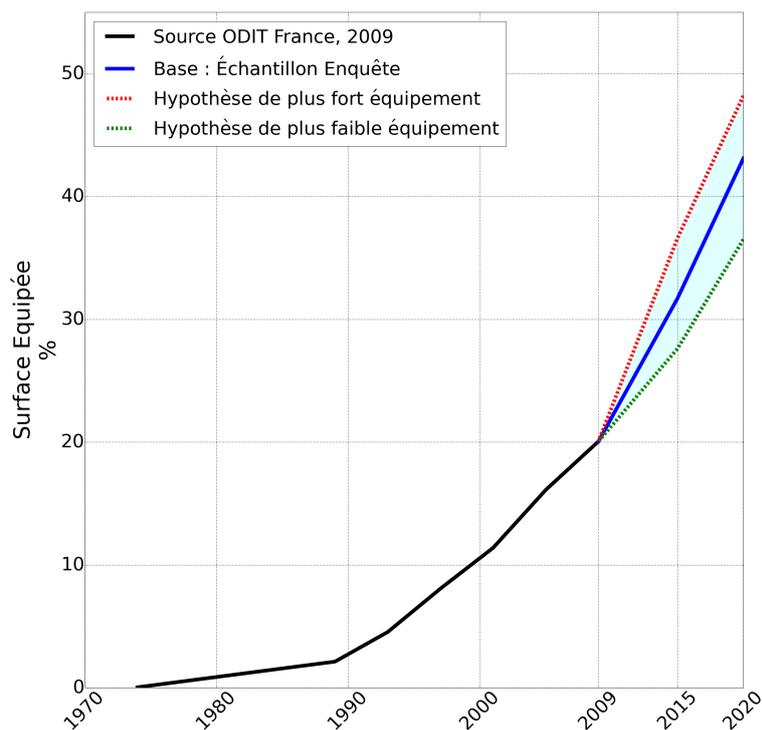


FIGURE 6 – Evolution des surface équipées en neige de culture depuis 1970 dans les Alpes françaises et projections jusqu'en 2020 (Spandre et al., 2015).

**Distribution des enneigeurs au sein du domaine** D'après les résultats de l'enquête, plus les stations sont petites, plus leur attention à la distribution des enneigeurs est grande : près des deux tiers des petites et moyennes stations indiquent installer leurs enneigeurs en deçà d'une certaine altitude contre seulement une très grande station sur quatre. Trente stations (sur 54) ont indiqué une altitude maximum pour leurs enneigeurs qui se trouve fortement corrélée et à peine supérieure à l'altitude moyenne des remontées mécaniques. Les orientations préférentielles pour l'installation d'enneigeurs n'ont pas permis de dégager de tendance, la plupart des domaines indiquant que leurs enneigeurs étaient disposés "au dessus du village". Ces éléments combinés s'expliquent sans doute par la volonté de garantir le retour skis aux pieds jusqu'au front de neige du domaine. Parallèlement, l'intérêt plus faible pour le positionnement des enneigeurs aux faibles altitudes avec la taille des stations pourrait s'expliquer par l'attention croissante que celles-ci portent aux connexions avec des secteurs d'altitude (glacier) ou avec des domaines voisins. Ces connexions sont faites le plus souvent par des crêtes d'altitude et incitent sans doute l'équipement des pistes de liaison qui se situent en altitude (voir manuscrit).

**Evolutions** D'après les résultats de notre enquête, environ 43% des pistes devraient être équipées en neige de culture à l'horizon 2020 et près de 50% dans les très grandes stations. La corrélation du nombre d'enneigeurs et de la capacité des retenues d'eau (Table 2 et manuscrit) à la surface de pistes équipées suggère que ces équipements évolueront dans des proportions identiques avec des demandes en eau et en énergie elles aussi proportionnelles. Ces évolutions s'accompagneront sans doute d'une évolution du prix du forfait du fait des investissements initiaux et des coûts de fonctionnement proportionnels également accompagnés des hausses probables des prix de l'énergie (Töglhofer et al., 2011; Damm et al., 2014).

### 3.4 Pistes d'approfondissement et d'exploitation

Ces éléments soulèvent l'intérêt pour l'étude des caractéristiques des stations qui ne soit plus seulement basée sur leur taille mais prenant également en compte la relation spatiale entre remontées mécaniques, neige de culture et immobilier de stations d'une part, et d'autre part, entre la localisation d'une station par rapport aux plus proches centres urbains, sa clientèle cible et les concurrents directs du domaine. Ces interactions permettraient sans doute d'améliorer la compréhension station par station de la flexibilité, des modes de consommation et de la perception de la neige de culture par la clientèle et ses exigences en termes de garantie neige et capacités à évoluer vers des produits plus coûteux avec en conséquence des développements en infrastructures de neige de culture (entre autres) très divers. Dans ce cadre, le mode de gestion des domaines (privé, public ou mixte) est une variable à prendre en compte, notamment dans la perspective du développement des territoires de montagne dans un contexte de changement climatique. La concurrence directe (locale ou internationale) pourrait elle avoir un impact fort sur la recherche de spécificités et d'arguments de vente par les domaines skiables, dont la neige de culture constituerait un élément central, en particulier pour le marché des grands hébergeurs et la gestion de leur catalogue d'offres.

Cette enquête fournit cependant des éléments suffisants pour la conduite d'études de vulnérabilité des domaines skiables aux conditions d'enneigement qui prennent en compte leurs méthodes de gestion (damage, production de neige). De telles études nécessitent des outils de modélisation objectifs et robustes pour la mise en commun d'informations météorologiques, nivologiques, géographiques et sur la gestion humaine de la ressource neige. L'association de données géographiques sur les domaines skiables a été décrite par François et al. (2014) à l'origine d'une chaîne de modélisation semi distribuée nivo-météorologique des conditions d'enneigement naturel dans les domaines skiables des Alpes françaises. Cette chaîne a été complétée dans le cadre de cette thèse par l'implémentation des impacts du damage et de la production de neige sur l'évolution simulée du manteau neigeux pour permettre la prise en compte de l'action de l'homme sur l'évolution des conditions de neige en stations. Ces évolutions de la partie nivo-météorologique de cette chaîne de modélisation sont décrites dans la section suivante.

## 4 Observation et modélisation des conditions d'enneigement sur pistes de ski

Les méthodes de gestion de la neige modifient significativement l'état physique et le comportement thermique et mécanique du manteau neigeux (Guily, 1991; Fauve et al., 2002) avec pour conséquence une divergence parfois très marquée des conditions d'enneigement sur la piste de ski et dans son environnement immédiat (Fahey et al., 1999; Rixen et al., 2001). Sous l'action de processus naturels ou par une action supplémentaire par l'homme, la neige subit en permanence des transformations physiques gouvernées par les conditions atmosphériques (Armstrong and Brun, 2008) en interaction avec les propriétés physiques internes au manteau neigeux qui influencent le bilan d'énergie et par conséquent leur propre évolution (Brun et al., 1992; Vionnet et al., 2012). Du fait des nombreux comportements non linéaires du manteau neigeux, l'appréhension des conditions d'enneigement dans les domaines skiables nécessite une méthode capable de prendre en compte simultanément ces processus physiques et les actions humaines de gestion de la neige.

Dans le but de construire un outil capable de prendre en compte les impacts physiques de la gestion de la neige sur les conditions d'enneigement d'une piste de ski, nous avons explicitement intégré des approches les plus exhaustives possibles du damage et de la neige de culture dans le modèle détaillé

Crocus (Vionnet et al., 2012). Le damage et la production de neige ont été implémentés sur la base de la littérature sur le sujet et d'entretiens avec des professionnels. Ces derniers ont été impliqués dans le développement d'un schéma simulant les pratiques de gestion de neige le plus fidèlement possible. Les sorties de ce modèle ont été évaluées à l'aide d'observations de la hauteur de neige, de l'équivalent en eau et de profils stratigraphiques réalisées dans quatre stations des Alpes françaises (Autrans, Chamrousse, Les Deux Alpes, Tignes) au cours des hivers 2014 - 2015 et 2015 - 2016, couvrant une large gamme d'altitudes, de taille de domaines et de conditions météorologiques. La diversité des approches de ces quatre stations ainsi que la confrontation entre deux saisons successives ont permis le développement d'un outil générique capable de travailler sur un éventail le plus large possible de domaines skiables. Ces observations ainsi que les développements du modèle numérique sont décrits en détail dans le manuscrit.

#### **4.1 Développement d'un modèle numérique de simulation des effets du damage et de la production de neige sur l'évolution saisonnière du manteau neigeux**

**La chaîne de modélisation SAFRAN - Crocus** Le modèle physique multi couches d'évolution du manteau neigeux SURFEX/ISBA-Crocus (par la suite, Crocus ; Vionnet et al. (2012)) établit les bilans d'énergie et de masse du manteau neigeux par la résolution d'équations physiques sous jacentes. Les processus simulés incluent les phénomènes internes tels que le changement de phase, la percolation d'eau liquide, la densification et l'évolution de la structure microscopique de la neige avec leurs effets respectifs sur les propriétés thermiques et radiatives du manteau neigeux. Le bilan d'énergie est réalisé aux deux interfaces du manteau neigeux avec l'atmosphère et le sol et sur son profil vertical (modèle uni-dimensionnel) discrétisé en maximum 50 couches de neige distinctes, avec un pas de temps d'un quart d'heure. Les propriétés physiques des couches de neige reposent notamment sur les variables suivantes :

- la masse volumique ( $\rho$ , couramment appelée "densité") : le rapport entre la masse d'un échantillon de neige et son volume, en  $\text{kg m}^{-3}$  (Vionnet et al., 2012) ;
- la surface spécifique de la neige (SSA) : le rapport entre la surface totale de l'interface glace - air d'un échantillon de neige et sa masse totale, en  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$  (Carmagnola et al., 2014) ;
- la sphéricité (S) : la proportion de formes arrondies et de formes anguleuses (Brun et al., 1992) ;
- l'âge : le nombre de jours depuis la chute de neige à l'origine de la couche considérée, utilisé pour déterminer le taux d'impuretés déposées dans la couche de neige (Vionnet et al., 2012)

**Le système météorologique SAFRAN** 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 opère à une échelle dite de "massifs" au sein desquels les conditions météorologiques sont supposés homogènes et ne dépendre que de l'altitude et des caractéristiques du point considéré (pente, orientation). Les données météorologiques sont fournies par pas altitudinal de 300 m (de 600 à 3600 m maximum) et à une résolution horaire. SAFRAN est un modèle de descente d'échelle et d'assimilation de données issues de modèles numériques du temps à grande échelle, d'observations de surface (stations automatiques dont Nivôses, observations manuelles notamment du réseau d'observateurs nivo-météorologiques) et de radiosondes dont la base de données couvre les 57 ans de 1958 à aujourd'hui (Durand et al., 2009b). SAFRAN reste dépendant de modèle de grande échelle et de réseaux d'observations qui ont évolué depuis leur création (en particulier depuis 1980), ce qui constitue une source de variabilité dans le temps et dans l'espace (Vidal et al.,

2010). Malgré ces incertitudes, SAFRAN est un outil pertinent pour le monde de la recherche et a déjà été employé dans un grand nombre d'études dans les Alpes françaises (Martin et al., 1994; Gerbaux et al., 2005; Durand et al., 2009b; Lafaysse et al., 2011). Les activités opérationnelles et de recherches réalisées jusqu'ici ont apporté la preuve à de nombreuses reprises que l'association du système SAFRAN et du modèle Crocus fournit des informations pertinentes et réalistes des conditions d'enneigement dans les massifs français (Essery et al., 1999; Rousselot et al., 2010; Durand et al., 2009b). Toutes les simulations présentées dans ce travail reposent sur les données météorologiques de SAFRAN correspondant à chaque site d'observation (altitude, pente et orientation exactes). Nous avons analysé de manière spécifique les conditions fournies par SAFRAN avec les données in-situ des conditions atmosphériques (température, humidité) et de neige naturelle (réseau d'observateurs nivo-météo, stations automatiques). Le cas échéant, nous avons adapté la phase des précipitations (associée à la limite pluie neige) et leur quantité, toutes les deux très variables spatialement afin de correspondre au mieux aux conditions atmosphériques locales. Nous avons également pris en compte l'environnement immédiat des sites pour simuler les effets d'ombre associés à des reliefs marqués. La hauteur angulaire de l'horizon a été déterminée par une méthode S.I.G<sup>16</sup> et contrôlée sur le terrain.

**Approche numérique du damage** Un engin de damage est principalement composé de trois outils : la lame, la chenille et la fraise. La lame déplace des volumes de neige (bien qu'ayant sans doute d'autres effets), la chenille permet la progression de l'engin et transfère son poids au manteau neigeux et la fraise agit comme une sorte de mixeur sur les couches de surface (Figure 7). Dans la mesure où le modèle Crocus est uni-dimensionnel selon la verticale, il ne peut en l'état actuel prendre en compte des effets de déplacements horizontaux de neige. Tout effet associé à la lame n'est pas pris en compte dans cette étude.



FIGURE 7 – La fraise est un outil monté à l'arrière de l'engin de damage constitué d'un arbre principal animé d'un mouvement de rotation surmonté de rangées de dents qui agissent comme un mixeur pour les couches de surface du manteau neigeux.

L'effet de la chenille a été modélisé comme un poids statique et constant d'une valeur de  $500 \text{ kg m}^{-2}$  appliqué à la surface du manteau neigeux (Guily, 1991; Olefs and Lehning, 2010; Howard and Stull, 2014). Ce poids statique est appliqué sur les premières couches de neige sans effet d'amortissement jusqu'à  $50 \text{ kg m}^{-2}$  de profondeur i.e. 50 cm de neige à  $100 \text{ kg m}^{-3}$ , puis est amorti avec la profondeur dans le manteau neigeux entre  $50 \text{ kg m}^{-2}$  et  $150 \text{ kg m}^{-2}$  i.e. entre 50 et 150 cm de neige à  $100 \text{ kg m}^{-3}$  (Figure 8).

---

16. Système d'Information Géographique.

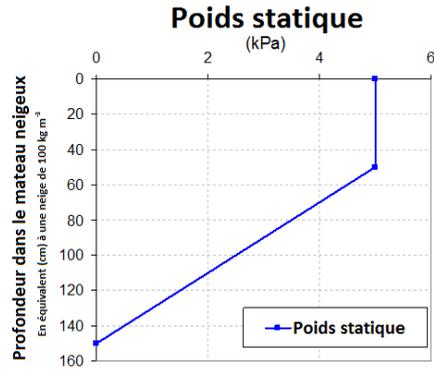


FIGURE 8 – Poids statique appliqué sur le manteau neigeux dans le modèle SAFRAN - Crocus-Resort

La fraise est un arbre à cames fixé à l'arrière d'un engin de damage et entraîné en rotation selon un axe parallèle au plan horizontal. Lorsqu'il est positionné en appui sur le manteau, cet outil applique une pression supplémentaire au poids de l'engin et agit comme un mixeur pour les couches de surface de la neige (Fauve et al., 2002; Guily, 1991; Keddy, 1979). Par conséquent la fraise agit sur la densité et les propriétés (sphéricité, SSA, âge) de la neige de surface. La modélisation numérique de l'action de la fraise proposée dans cette étude se fait en plusieurs temps par homogénéisation puis évolution des propriétés (Figure 9) :

- Les couches de surface sont sélectionnées jusqu'à  $35 \text{ kg m}^{-2}$  de profondeur (35 cm de neige à  $100 \text{ kg m}^{-3}$  ou 7 cm de neige à  $500 \text{ kg m}^{-3}$ ) ;
- Les propriétés moyennes des couches sélectionnées (densité, sphéricité, SSA, âge) sont calculées en pondérant les propriétés de chacune par sa masse ;
- Les propriétés moyennes sont modifiées (voir ci-dessous) et ré attribuées à chaque couche ;
- La hauteur de chaque couche est recalculée en fonction de sa masse volumique afin de respecter la conservation de masse de chaque couche.

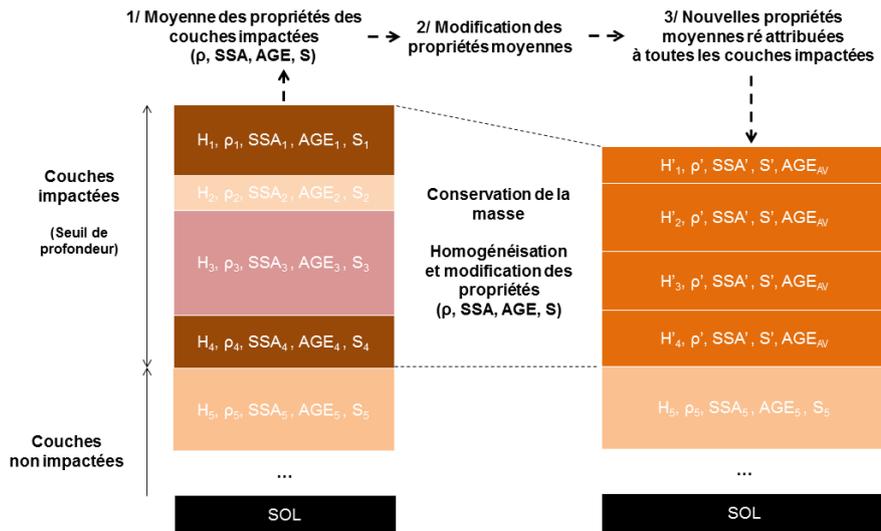


FIGURE 9 – L'approche numérique du damage dans Crocus

L'âge des couches de neige est homogénéisé mais pas modifié. Pour les autres variables, la modification des propriétés des couches de neige se fait de manière progressive vers des propriétés observées de neige naturelle damée (Keddy, 1979; Guily, 1991) correspondant à des grains fins de petite taille (0.3 mm, SSA = 25 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>), très arrondis (sphéricité de 90%) et de densité 450 kg m<sup>-3</sup>. Le détail de cette méthode est décrit dans le manuscrit. La fréquence, les horaires et les contraintes liés au damage ont été déduits des échanges avec les professionnels et synthétisés sous la forme d'un schéma décisionnel menant à l'action de damage dans le modèle (Figure 10). L'action a lieu si l'ensemble des points suivants sont vrais :

- Période de damage : du 1<sup>er</sup> novembre à la fermeture de la station ;
- Une quantité minimum de neige est nécessaire pour permettre le damage : 20 kg m<sup>-2</sup> soit 20 cm de neige récente à 100 kg m<sup>-3</sup> ;
- Le créneau horaire est 20h - 21h chaque jour (par défaut). Si une chute de neige a eu lieu dans la nuit, le damage est possible entre 6h et 9h le matin.

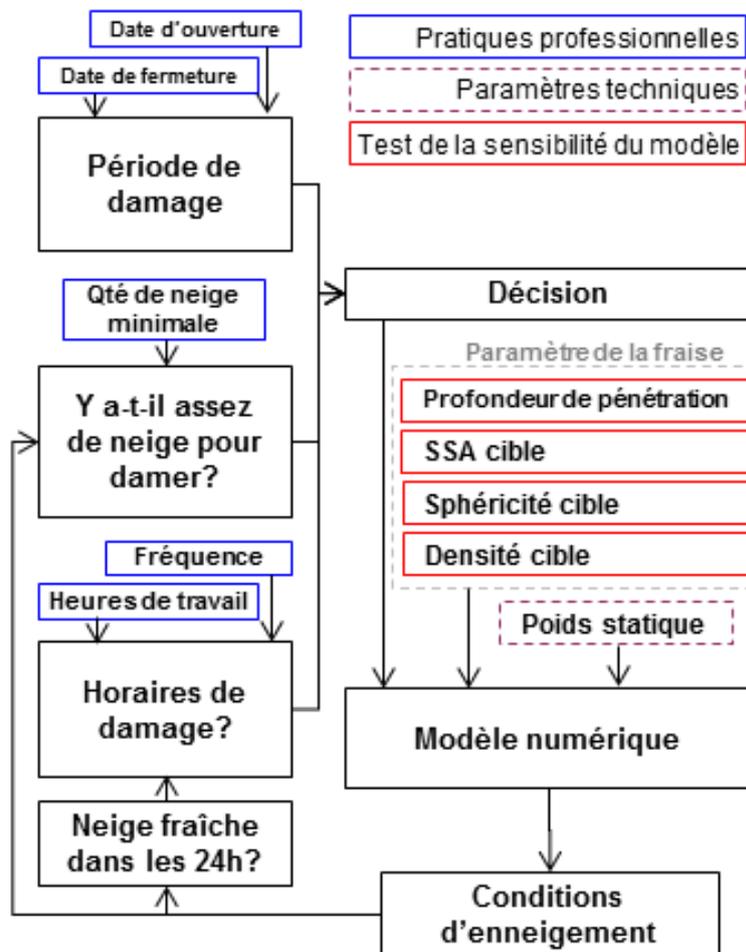


FIGURE 10 – Schéma du damage implanté dans Crocus

**Approche numérique de la production de neige de culture** Le but de cette section est de décrire l'implémentation d'un module physique de production de neige de culture dans le modèle Crocus et d'en évaluer la pertinence. Pour ce faire, nous avons travaillé sur les données de production réelles des sites d'observations (volumes d'eau, répartition dans la saison) que nous avons utilisées comme objectif

de production dans le modèle afin d'en évaluer la capacité à reproduire les conditions observées à partir du moment où les quantités de neige produites sont cohérentes (voir manuscrit). La masse de neige produite par unité de surface a été déduite du volume d'eau employé ( $\text{m}^3$  d'eau, converti en kg) et de la surface d'étalement de cette neige ( $\text{m}^2$ ) avec une incertitude associée. Un taux d'efficacité (%) supposé représenter la fraction utile du volume d'eau employé pour la production (une fois les pertes éventuelles déduites) a été utilisé et testé (voir manuscrit).

Les paramètres physiques de la neige de culture dans le modèle (voir manuscrit) correspondent à de petits grains ronds de 0.3 mm de diamètre ( $SSA_{MM}=22 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ), quasi sphériques (sphéricité 90%) et de densité élevée  $\rho_{MM}=600 \text{ kg m}^{-3}$ . Si la production a lieu tandis qu'une précipitation naturelle a également lieu, les propriétés de la neige précipitées sont pondérées par leur taux massique de précipitation respectif ( $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). De manière similaire au damage, un schéma décisionnel a été implémenté pour intégrer l'ensemble des éléments menant à la production de neige (Figure 11), sur la base d'entretiens avec des nivoculteurs et de précédents travaux sur ces questions (Hanzer et al., 2014; Marke et al., 2014). La production est possible du 1<sup>er</sup> novembre au 31 mars, entre 19h et 8h le lendemain matin. Chaque soir à 19h, le cumul de production jusqu'à date est comparé avec l'objectif de production. Si l'état est déficitaire, la production est possible pendant toute la nuit. Si excédentaire, aucune production ne peut avoir lieu.

Les conditions météorologiques sont également prises en compte : le vent ne doit pas excéder  $4.2 \text{ m s}^{-1}$  ( $15 \text{ km h}^{-1}$ ) et la température humide ( $T_W$ ) doit être inférieure à un seuil prescrit. La température humide ou température du thermomètre mouillé semble être le critère le plus pertinent pour gérer la production de neige (Olefs et al., 2010) dont la valeur exacte ne peut être obtenue que par itérations successives. Par simplicité, nous avons implémenté une méthode explicite tirée des travaux de Jensen et al. (1990) pour calculer  $T_W$  à partir des données SAFRAN de température sèche et d'humidité de l'air. Cette méthode fournit des valeurs cohérentes de la température humide pour des températures sèches entre  $-15$  et  $0^\circ\text{C}$  et des humidités relatives entre 30 à 100% : l'écart maximum aux résultats de la méthode itérative de Olefs et al. (2010) est  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ .

Enfin, nous prenons en compte un taux de conversion de la masse d'eau utilisée pour la production et la masse de neige effective sur la piste, entendu qu'une fraction de cette masse d'eau est perdue, soit par des processus thermodynamiques de sublimation ou d'évaporation (Eisel et al., 1988, 1990; Hanzer et al., 2014), soit par des processus mécaniques tels que la suspension et transport par le vent au-delà des limites de pistes (Olefs et al., 2010). Dans cette section nous considérons 4 niveaux de conversion entre 100% (aucune perte) à 25 % (75% de perte) avec l'utilisation d'un taux de 50% par défaut.

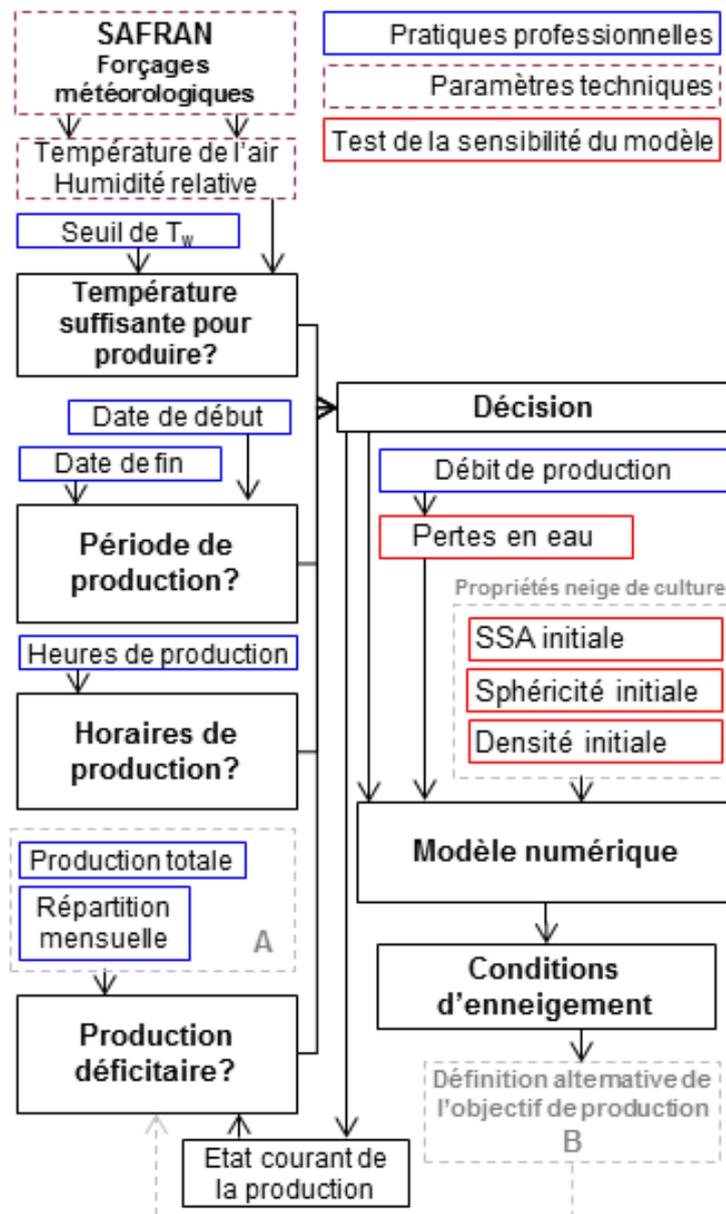


FIGURE 11 – Schéma décisionnel pour la production de neige de culture implémenté dans Crocus

## 4.2 Confrontation aux observations des sorties de modèle

**Observations in-situ** Les équipes de pisteurs de quatre domaines skiables des Alpes du Nord (Tignes, Chamrousse, Autrans et Les 2 Alpes) nous ont aidé à réaliser des observations au cours des hivers 2014 - 2015 et 2015 - 2016 (Figure 12 et manuscrit), couvrant une gamme de conditions météorologiques, de pratiques et d'habitudes de gestion de la neige la plus large possible. Trois sites les plus proches possibles les uns des autres ont été sélectionnés pour chaque station : en neige naturelle (référence), en neige naturelle damée et en neige naturelle et de culture damées.

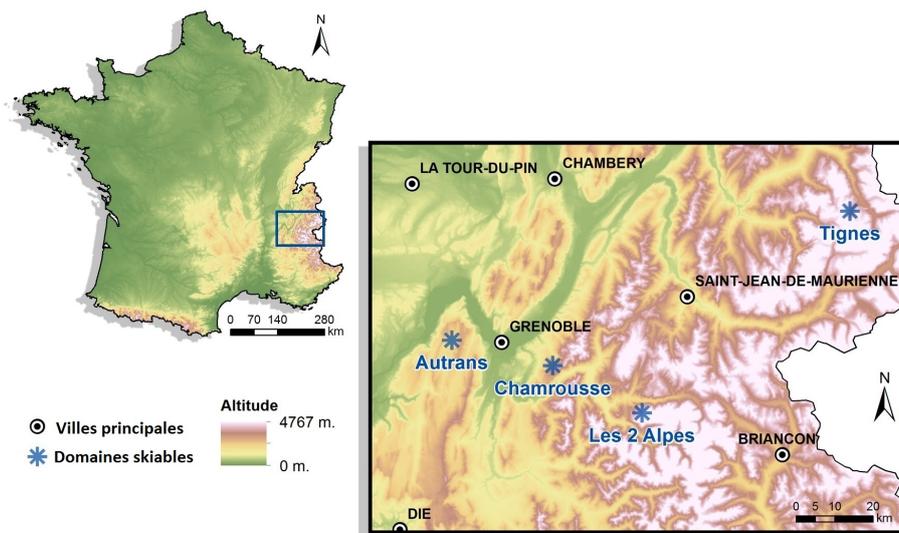


FIGURE 12 – Situation géographique des quatre stations partenaires autour de Grenoble (France) : Tignes (Haute-Tarentaise), Chamrousse (Belledonne), Autrans (Vercors) et Les 2 Alpes (Oisans).

Les volumes d'eau utilisés pour la production de neige nous ont été communiqués par les nivoculteurs et les surfaces d'étalement de la neige (voir manuscrit) ont été déterminées à partir de l'implantation des enneigeurs, des limites physiques de la piste (ravin, arbres) et des observations et discussions avec les pisteurs. Une incertitude a été déterminée pour chaque site qui apparaît comme une enveloppe autour des tracés des simulations pour rendre compte de l'erreur associée (voir manuscrit).

Les observations de hauteur de neige ont été réalisées chaque semaine par les équipes de pisteurs à l'aide d'une perche à neige. Chaque mois nous avons réalisé un relevé de l'équivalent en eau (masse de neige en  $\text{kg m}^{-2}$  de piste), de la densité moyenne du manteau neigeux et du profil stratigraphique. Préliminaire essentiel à l'étude d'impact de la gestion de neige sur les propriétés du manteau neigeux, la modélisation de la neige naturelle comporte elle aussi une erreur qu'il convient d'évaluer. La Figure 13 expose les conditions d'enneigement naturel pour les quatre sites expérimentaux avec les observations réalisées, les simulations alimentées par des forçages SAFRAN avant et après modifications. La chaîne SAFRAN-Crocus montre ici qu'elle fournit des simulations pertinentes de la neige naturelle avec des erreurs (voir manuscrit) de l'ordre de  $30 \text{ kg m}^{-2}$  sur l'équivalent en eau et 10 cm sur l'épaisseur de neige après modification des forçages. Par la suite toutes les simulations ont été réalisées avec ces forçages modifiés.

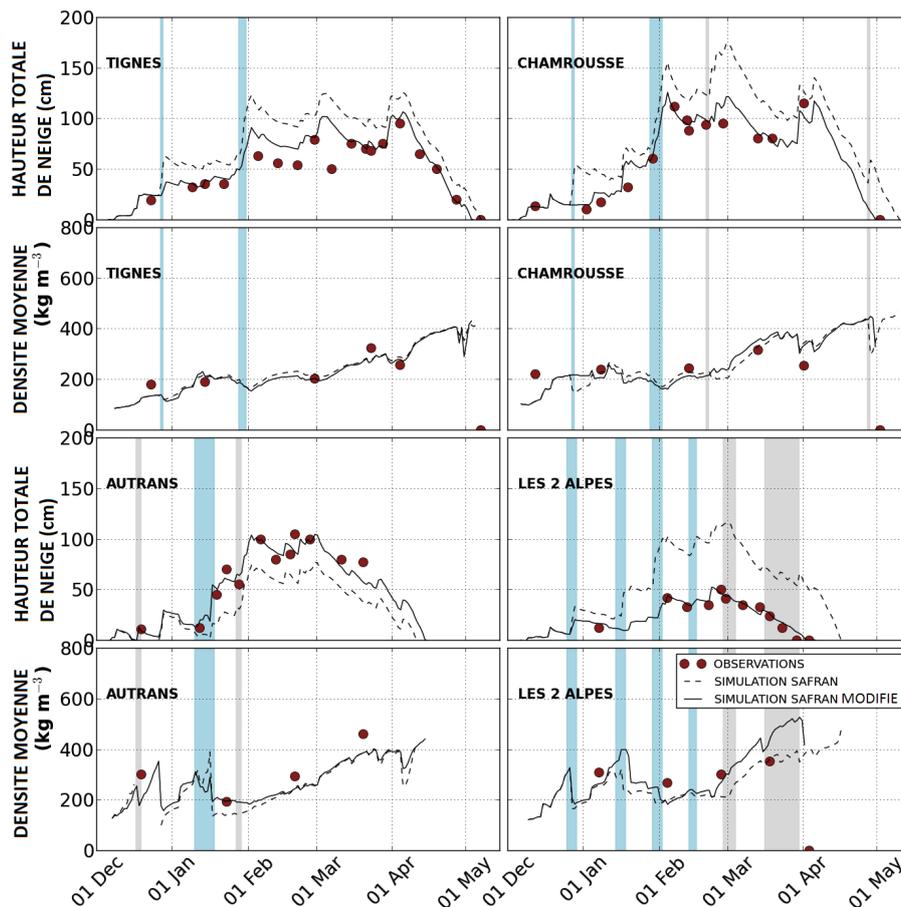


FIGURE 13 – Hauteur totale de neige naturelle et densité moyenne du manteau neigeux et données observées en 2014 - 2015. Les simulations utilisant les données météorologiques de SAFRAN sans corrections (pointillés) et avec corrections (trait plein) sont présentées (voir manuscrit). En bleu les évènements pour lesquels la quantité de précipitations a été modifiée et en gris les évènements pour lesquels la phase des précipitations (limite pluie/neige) a été modifiée.

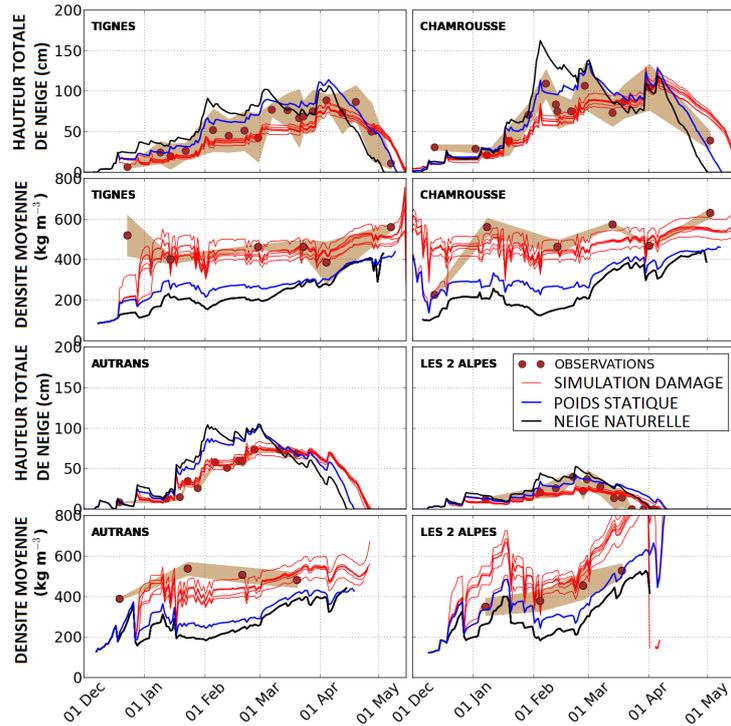


FIGURE 14 – Impact du damage observé sur les propriétés du manteau neigeux (densité moyenne, hauteur de neige). Les simulations par les sept configurations du modèle sont présentées (voir manuscrit) ainsi que les simulations réalisées en prenant en compte le poids statique uniquement (pas de fraisage) et les conditions d’enneigement naturel. L’enveloppe brune correspond à  $\pm$  l’écart-type des observations réalisées autour de la valeur moyenne.

**Evaluation de la modélisation numérique du damage** Les simulations des conditions d’enneigement naturel damé (sans production) sont accompagnées des observations des quatre sites expérimentaux sur la Figure 14. Les écarts aux observations sont détaillés dans le manuscrit. Le modèle fournit des conditions d’enneigement fiables au regard des observations en neige naturelle damée, notamment en termes de densité moyenne ( $400$  à  $500 \text{ kg m}^{-3}$ ). Les profils de densité et de surface spécifique des 30 premiers cm de neige simulés par le modèle ont également été comparés aux observations (Figure 15) avec là aussi une bonne cohérence. Ces observations permettent dans l’ensemble de conclure à la capacité du modèle à reproduire fidèlement les propriétés du manteau neigeux damé (densité, surface spécifique).

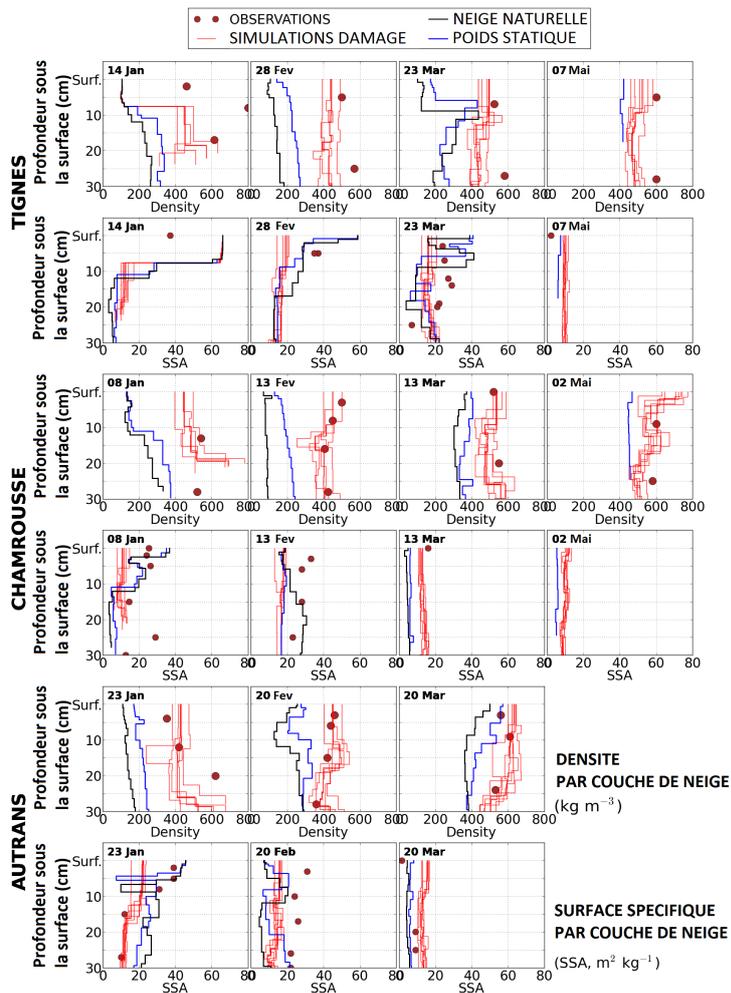


FIGURE 15 – Impact du damage observé sur les propriétés des 30 cm de surface du manteau neigeux (densité, microstructure). Les simulations par les sept configurations du modèle sont présentées (voir manuscrit) ainsi que les simulations réalisées en prenant en compte le poids statique uniquement (pas de fraissage) et les conditions d'enneigement naturel.

Des observations de la température de la couche de neige au contact du sol ont également été réalisées au cours de l'hiver 2015 - 2016 à Autrans dans les mêmes conditions qu'en 2014 - 2015 (voir manuscrit). La température a été observée du 21 novembre 2015 au 10 mai 2016 avec des capteurs autonomes de températures à un pas de temps de 2 h. La température observée sous manteau neigeux naturel était en moyenne de  $-0.1^{\circ}\text{C}$  avec des épisodes de gel (températures négatives du sol) pendant 20% du temps environ. Sous manteau neigeux damé, cette température moyenne s'abaisse à  $-0.9^{\circ}\text{C}$  avec des températures négatives près de 70% du temps, soit une différence de  $-0.8^{\circ}\text{C}$  sur la saison, ce qui est conforme avec des observations par Rixen et al. (2004). Les simulations ont fourni des informations très cohérentes avec une température moyenne simulée sous manteau neigeux naturel de  $-0.01^{\circ}\text{C}$  et  $-1.04^{\circ}\text{C}$  sous manteau damé (70% du temps avec une température de sol négative également). La prise en compte des effets du damage notamment sur la densité de la neige montre la capacité du nouveau

modèle à reproduire fidèlement le comportement thermique du manteau neigeux et son impact sur le sol sous-jacent.

**Evaluation de la modélisation numérique de la production de neige de culture** Le détail de cette partie peut être consulté dans le manuscrit. La modélisation de la production de neige de culture améliore nettement la représentation des conditions d'enneigement sur piste (Figure 16 et manuscrit), en termes de densité et de surface spécifique. Les profils stratigraphiques ont également été tracés et comparés aux observations pour les 150 cm de surface du manteau neigeux (Figure 17) avec une bonne cohérence. L'incertitude majeure associée à la production de neige et sa modélisation repose sur le taux de conversion de l'eau en neige de culture (voir manuscrit).

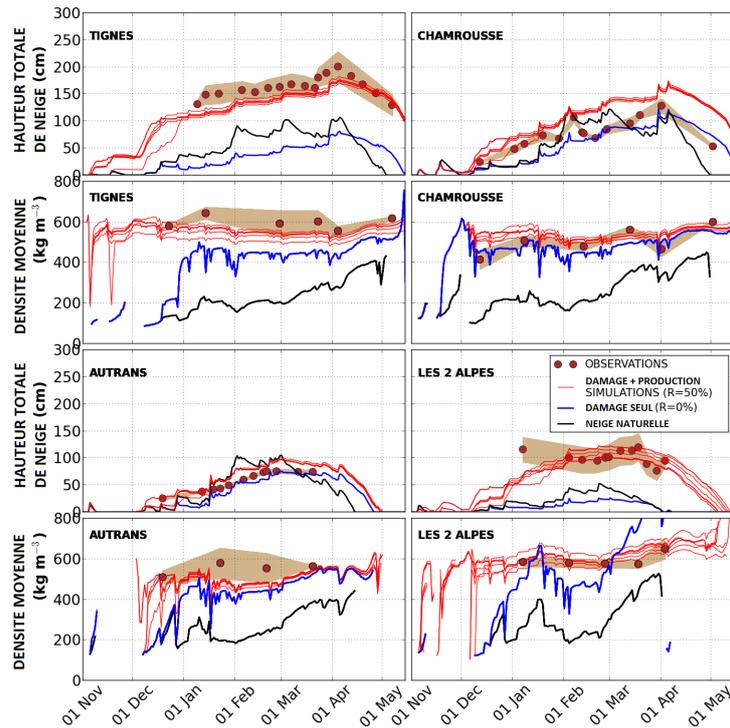


FIGURE 16 – Impact du damage et de la production de neige observé sur les propriétés du manteau neigeux (densité moyenne, hauteur de neige). Les simulations par les sept configurations du modèle sont présentées (ratio de perte en eau  $R = 50\%$ , voir manuscrit) ainsi que les simulations par le damage seul (pas de production) et les conditions d'enneigement naturel.

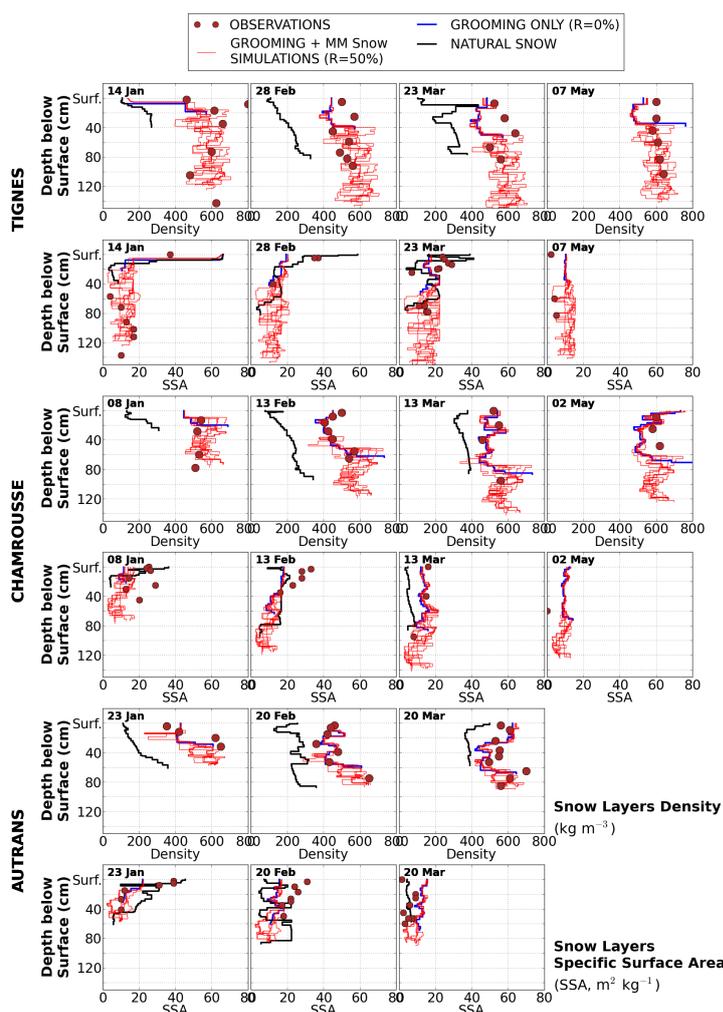


FIGURE 17 – Impact du damage et de la production de neige observé sur les propriétés des 150 cm de surface du manteau neigeux (densité, microstructure). Les simulations par les sept configurations du modèle sont présentées (ratio de perte en eau  $R = 50\%$ , voir manuscrit) ainsi que les simulations par le damage seul (pas de production) et les conditions d’enneigement naturel.

Les taux de conversion fournissant les plus faibles écarts entre simulations et observations étaient de 50% à 75% à Tignes, 50% à 25% aux 2 Alpes, 25% à 50% à Chamrousse et Autrans (Figure 18 et manuscrit), des écarts nettement au-delà des observations reportées jusque là (Eisel et al., 1988, 1990; Hanzer et al., 2014; Olefs et al., 2010). Néanmoins, les incertitudes liées aux observations (faible densité spatiale des observations) ne permettaient pas sur la seule saison 2014 - 2015 de conclure sur les facteurs influençant la conversion de l’eau en neige de culture, bien que la topographie et le vent constituent des sources de pertes très probables. Ce constat nous a mené à réaliser une campagne d’observations dédiée à la production de neige de culture et à ce taux de conversion eau/neige.

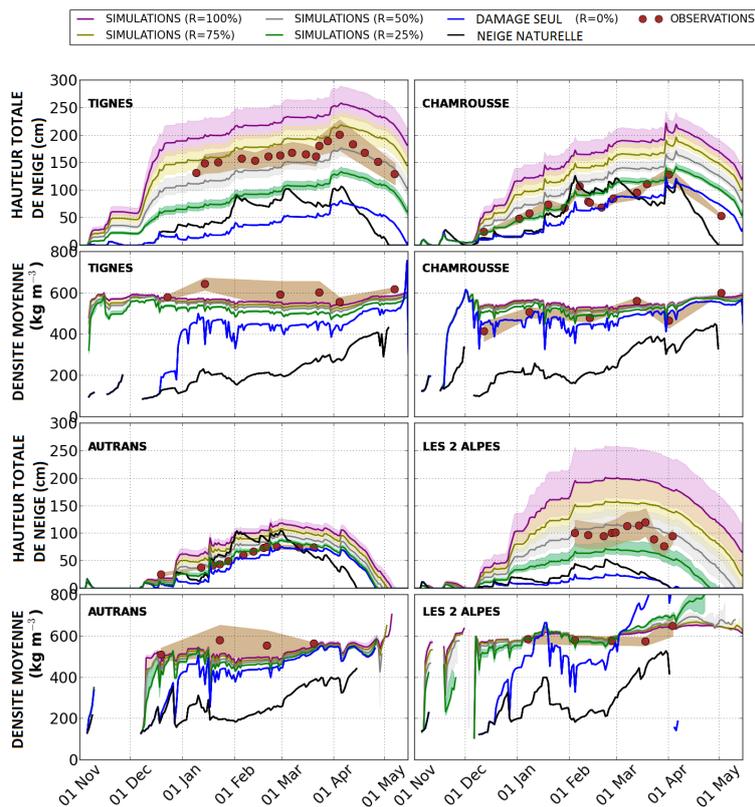


FIGURE 18 – Conditions d’enneigement simulées avec prise en compte du damage et de la production de neige (ratios de  $R = 100\%$  à  $25\%$ ). Toutes les simulations utilisent la configuration standrad du modèle. Les enveloppes de couleur correspondent aux incertitudes liées principalement à la surface d’étalement de la neige de culture. Les simulations des conditions d’enneigement sans production (damage uniquement) et d’enneigement naturel sont également présentées.

### 4.3 Evaluation du taux de conversion eau - neige de culture

Les pertes en eau au cours du processus de production de neige de culture ont été abordées dans plusieurs études aux approches très différentes (modélisation, entretiens, observations) et visant différents facteurs d’influence (processus thermodynamiques, transport par le vent, etc.). Eisel et al. (1988) ont estimé les pertes nettes au cours de la production associées à l’évaporation et à la sublimation par une combinaison d’observations dans neuf sites expérimentaux (bilans de masse) et de modélisation (bilans d’énergie) et conclu à des pertes de  $6\%$  du volume d’eau en moyenne, avec une relation linéaire négative entre les pertes ( $\%$ ) et la température de l’air. Hanzer et al. (2014) ont implémenté cette relation linéaire dans un modèle physique de neige et conclu que pour des conditions de production typiques, les pertes associées aux processus thermodynamiques s’établissaient entre  $2$  et  $13\%$  du volume d’eau employé. Bien que les travaux Eisel et al. (1988, 1990) demeurent les plus détaillés à ce jour, ils n’ont pas été réalisés dans des conditions opérationnelles (faibles débit, maximum  $4 \text{ m}^3$  d’eau utilisés par session d’observation) et avec une technologie aujourd’hui dépassée. De plus, Eisel et al. (1990) ont montré par la suite que les pertes en eau au cours de la production ne pouvaient être limités aux processus thermodynamiques en établissant le bilan hydrique de six sites expérimentaux dans le Colorado et concluant que des pertes additionnelles de  $7$  à  $33\%$  étaient constatées, portant les pertes totales à  $13$  à  $37\%$  du volume initial pour la production. Ces études comme les résultats présentés dans

la section précédente ne permettaient pas cependant d'établir de bilan précis du fait des incertitudes associées.

Ici nous proposons une méthode originale d'observation des volumes de neige produits sur une échelle spatiale fine (grille de 0.5 x 0.5 m). Les équivalents en eau ( $\text{kg m}^{-2}$ ) ont été calculés grâce à des mesures de la densité de la neige de culture et la masse totale de neige de culture produite et présente sur la piste a été déduite, permettant la comparaison avec la masse d'eau employée pour la production et le calcul du taux de conversion eau - neige de culture. Ces observations ont été réalisées au cours de l'hiver 2015 - 2016 dans la station des Deux Alpes (Oisans). Les nivoculteurs du domaine nous ont transmis toutes les données de production associées (débit d'eau, température humide observée, vent). Cette méthode est décrite en détails dans le manuscrit.

**Zones d'étude et méthodologie** Deux types de mesures ont été réalisées sur le site de la piste des Coolidge de la station des Deux Alpes à 1680 m d'altitude de pente faible à cet endroit.

- Après la production de neige et avant le travail des engins de damage, nous avons relevé les volumes des tas de neige de culture produits et leur masse. Cinq sessions de ce type ont été réalisées au cours du même hiver.
- Des relevés de la piste ouverte aux skieurs ont également été réalisés à trois reprises au cours de la saison. Les volumes de neige et leur masse ont été calculés et la masse de neige naturelle présente à chaque date a été soustraite pour déterminer l'apport de neige de culture.

Ces observations reposent sur une méthode de relevés par GPS différentiel de la surface de la neige, interpolés sur une grille régulière (identique au MNT<sup>17</sup> de la station réalisé en octobre 2015) qui permet d'établir la hauteur de neige par différence entre deux surfaces de neige (dans le cas de sessions de production consécutives) ou avec le terrain nu (dans le cas de la piste ouverte aux skieurs). Les incertitudes associées à cette méthode ont été évaluées à l'aide de trois méthodes différentes : le MNT du terrain nu (données relevées le 17 novembre 2015 avec le GPS), un Laser Scan Terrestre le 1<sup>er</sup> décembre 2015 (session commune avec le GPS) et des mesures manuelles de hauteur de neige avec une perche à neige (en tout 29 mesures). L'erreur sur la hauteur totale de neige a été évaluée à 4.2 cm. Parallèlement, les relevés de densité de neige ont fourni des erreurs sur la densité de l'ordre de 4 à 7%, ce qui constitue une incertitude finale sur la masse de neige par unité de surface de 20 à 35  $\text{kg m}^{-2}$  (voir manuscrit). Une fois intégrée sur la surface totale d'étude, cette masse surfacique a fourni une masse de neige que nous avons pu comparer aux volumes d'eau employés soit par session, soit jusqu'à la date d'observation pour les relevés sur piste ouverte aux skieurs. L'évolution saisonnière de la piste a également pu être comparée aux simulations réalisées avec les données de production jour par jour fournies par les nivoculteurs des Deux Alpes.

**Observations des tas de neige de culture** La moitié de la production a été concentrée dans une période de temps très courte dans les dix derniers jours de novembre 2015 au cours desquels nous avons pu relever près de 75% de la production. Les conditions étaient idéales avec des températures froides (moyenne de production  $-9.5^{\circ}\text{C}$ ) et un vent quasi nul. Par la suite un seul relevé a pu être réalisé le 21 janvier 2016 avec des conditions similaires mais un réglage différent du paramètre qualité de l'enneigeur. Sur l'ensemble de la saison, cet enneigeur a utilisé un volume de 2947  $\text{m}^3$  d'eau. La distribution de la neige autour de l'enneigeur a été très similaire entre les sessions (Figures 18a et 18b). Nous avons déterminé le volume puis la masse de neige dans des cercles concentriques autour d'un

17. Modèle Numérique de Terrain : une information sur la position spatiale x,y et d'altitude z du terrain sans neige, à une résolution spatiale donnée,  $0.25\text{m}^2$  dans cette étude.

point fixe correspondant au sommet du tas et comparé cette masse à la masse d'eau employée pour la session de production relevée.

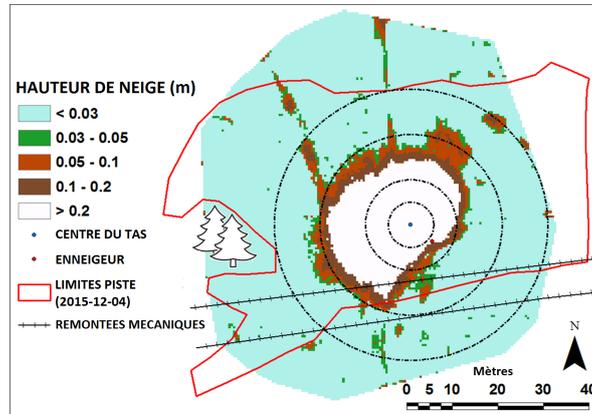


FIGURE 18a – Carte de hauteur totale de neige, position de l’enneigreur, du centre du tas et cercles concentriques de 5, 10, 20 et 30 m de rayon autour du centre du tas. La limite de la piste au 4 décembre 2015 est également présentée.

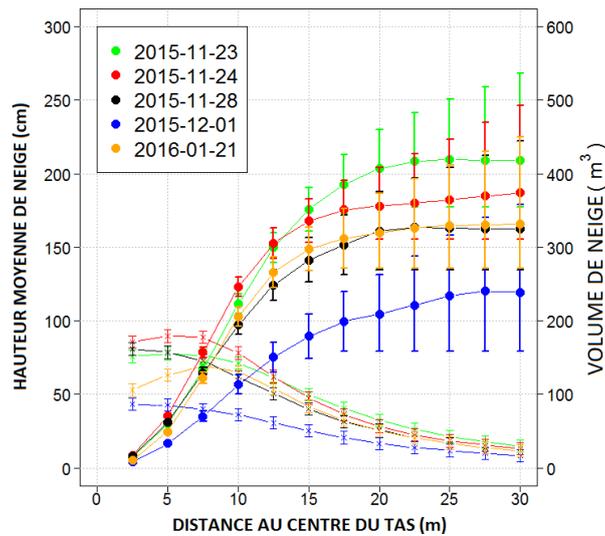


FIGURE 18b – Epaisseur moyenne de neige (x) et volume de neige (●) à l’intérieur des cercles concentriques de 5, 10, 20 et 30 m de rayon autour du centre du tas.

Un taux de conversion très similaire a été observé pour les différentes sessions de novembre avec 20 à 30% de la masse d’eau retrouvée sous forme de neige dans un rayon de 10 m autour du centre du tas et 40 à 50% dans un rayon de 20 m (Figure 19). En janvier, ces taux étaient significativement plus élevés, ce qui pose la question de l’influence du paramètre qualité mais également de la représentativité de cette unique mesure dans cette configuration.

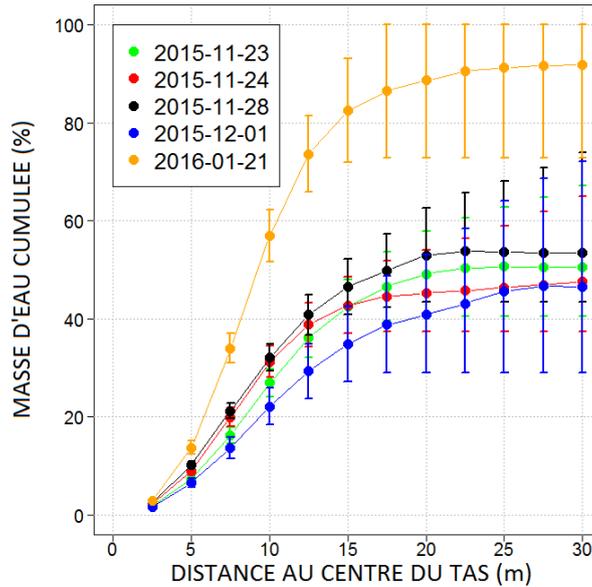


FIGURE 19 – Masse d'eau cumulée à l'intérieur des cercles concentriques de 5, 10, 20 et 30 m de rayon autour du centre du tas par rapport à la masse d'eau utilisée pour chaque session de production.

**Observations de la piste ouverte aux skieurs** La production de neige de culture a considérablement amélioré les conditions de ski sur ce tronçon de piste avec des conditions acceptables (un minimum de 20 cm de neige à  $400 \text{ kg m}^{-3}$ ) pendant 159 jours (observés) alors que cette durée était de 82 jours en neige naturelle damée et de 48 jours en neige naturelle (voir manuscrit). De plus la production de neige a permis le ski au cours des vacances de Noël 2015 alors que la zone des Coolidge était déneigée à cette date (neige naturelle ou damée).

Le 4 décembre 2015 veille d'ouverture, le 20 janvier 2016 et le 6 avril 2016 nous avons réalisé un relevé de l'ensemble du tronçon de piste, ce qui a permis de constater que la variabilité de l'épaisseur de neige était très importante, de l'ordre de 3 à 4 fois supérieure à l'incertitude sur la hauteur de neige. La forme des tas de neige de culture était encore très présente (Figure 20) et la distribution initiale de la neige pour l'ouverture de la piste le 5 décembre était encore nettement visible en janvier et en avril.

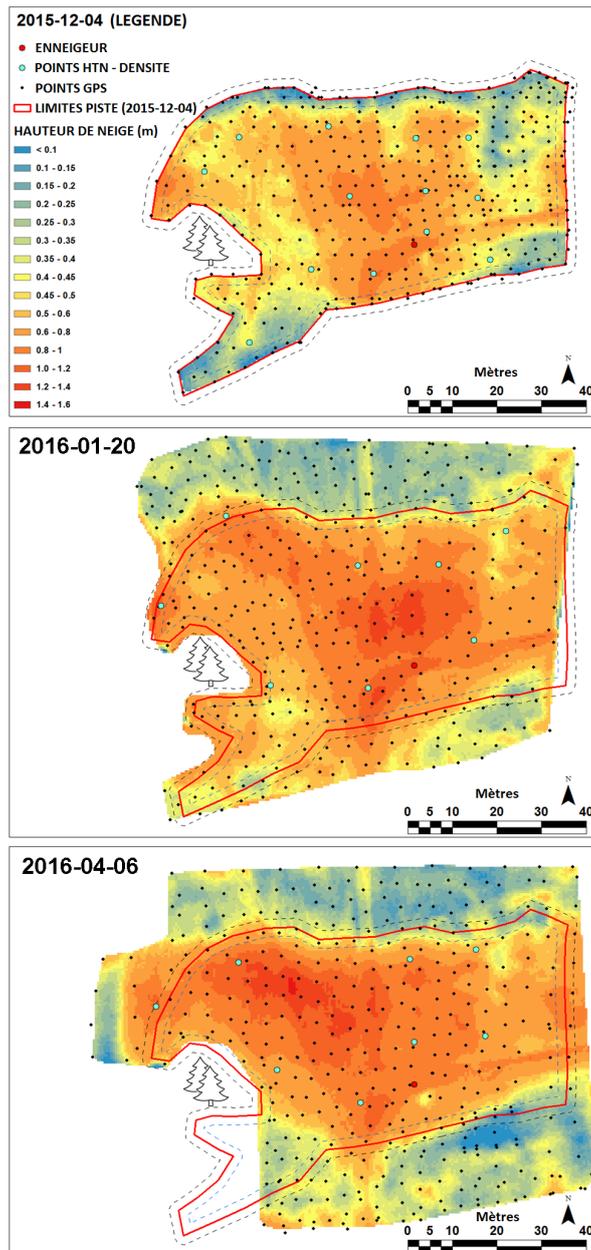


FIGURE 20 – Carte des hauteurs de neige observées le 2015-12-04 (haut), 2016-01-20 (milieu) et 2016-04-06 (bas).

A chaque reprise le volume total et la masse de neige correspondante ont été calculés, la masse de neige naturelle de la zone considérée a été soustraite et la différence a été comparée à la masse d'eau employée jusqu'à la date du relevé. Le 4 décembre, cette différence représentait 59.8% ( $\pm 10.2\%$ ) de la masse d'eau employée pour la production jusqu'à date, le 20 janvier 67.9% ( $\pm 13.4\%$ ) et le 6 avril 64.3% ( $\pm 10.7\%$ ), ce qui suggère qu'une part significative du volume d'eau initial utilisé pour la production ne se trouvait pas dans les limites de la piste définie par les services de pistes.

**Evolution saisonnière de la piste ouverte aux skieurs et comparaison aux simulations** La hauteur de neige et l'équivalent en eau ( $\text{kg m}^{-2}$ ) ont pu être agrégés pour chaque relevé des conditions sur

piste ouverte aux skieurs, fournissant une hauteur et un équivalent eau moyen avec une incertitude associée. Ces informations ont pu être comparées aux simulations réalisées avec le modèle Crocus dont la production quotidienne correspond à l'enregistrement transmis par les nivoculteurs de la station. Sur la période de production initiale (avant le 5 décembre), nous avons réalisé des simulations avec des taux de conversion eau - neige de culture de 100 à 30% avec un pas de 5%. Trois simulations utilisant les taux de 65, 60 et 55% ont fourni des conditions d'enneigement dans l'intervalle d'incertitude des observations. Ces trois situations possibles à la date du 5 décembre ont été ensuite employées comme états initiaux pour de nouvelles simulations sur la période du 5 décembre jusqu'à la fin de la saison avec plusieurs taux de conversion (100%, 65%, 55 et 45%). Trois couples de simulations ont fourni des conditions d'enneigement dans les intervalles d'incertitudes pour les trois dates d'observations : 60% (première période) et 45% (seconde période), ainsi que 55% et 55%, 55% et 45% (voir manuscrit). Ces résultats sont cohérents avec ceux déterminés par la méthode précédente et suggèrent que le taux de conversion est similaire entre la période avant le 5 décembre et après. Les durées simulées par ces trois couples de taux de conversion de la saison avec des conditions convenables pour le ski est également cohérente avec les observations avec 164 à 166 jours d'enneigement minimum de 20 cm à 400 kg m<sup>-3</sup>.

### **Conclusion sur le taux de conversion et détermination des effets thermodynamiques et mécaniques**

Les relevés réalisés sur piste ouverte aux skieurs suggèrent qu'une fraction de l'eau utilisée pour la production n'a pas été retrouvée sous forme de neige à l'intérieur des contours de la piste, de l'ordre de 40% ( $\pm 10\%$ ) en masse. Deux raisons peuvent être à l'origine de ces écarts : les processus thermodynamiques (évaporation et sublimation) et mécaniques (suspension et transport par le vent). Eisel et al. (1988) ont déterminé une relation linéaire entre les pertes en eau associées à l'évaporation et à la sublimation au cours du processus de production (pertes nécessaires au process) que nous avons pu utiliser pour estimer la fraction perdue par ce biais. Sur l'ensemble de la période de production, 6.7% de pertes thermodynamiques ont été estimées (voir manuscrit). Ce qui est loin d'expliquer les écarts constatés. Par conséquent, une fraction significative du volume d'eau initial n'est pas perdue par évaporation ni sublimation et aboutit certainement à la formation de neige qui n'a cependant pas été mesurée dans les limites de la piste. Pourtant le site expérimental choisi pour cette étude est de grande dimension (largeur de piste minimale 45 m, jusqu'à 75m), bien au-delà de la moyenne française (autour de 20 m). Les conditions de production peuvent également être considérées comme idéales (sans vent, températures froides).

La situation décrite dans le présent travail semble constituer une situation idéale avec une perte significative du volume d'eau initial sans doute de l'ordre de 40% et au minimum de 30%. Cette étude démontre particulièrement que la topographie locale peut jouer un grand rôle dans le taux de conversion eau - neige de culture sur la piste avec seulement 20 à 30%, maximum 50% du volume d'eau retrouvé sous forme de neige dans un rayon de 10 m autour du centre du tas, ce qui correspond (en diamètre) à la largeur moyenne d'une piste de ski en France (Spandre et al., 2016a). Des volumes de neige de culture ont également été observés au pied, voire à l'arrière de l'enneigeur (Figure 18a) ce qui confirme l'idée que la position idéale d'un enneigeur devrait être, si possible, au milieu de la piste. L'environnement immédiat de la piste peut également avoir un rôle important soit en permettant aux engins de circuler et ainsi récupérer ces volumes de neige pour les replacer au centre de la piste, soit les rendre définitivement inaccessibles dans le cas d'obstacles importants (blocs, falaises, arbres). Ce travail est néanmoins soumis à un certain nombre de limitations et ne peut être généralisé qu'avec prudence. Les écarts entre le relevé du 21 janvier par rapport aux autres sessions de production (Figure 19) restent largement inexpliqués et plaident pour des observations complémentaires, notamment de l'impact du paramètre "qualité" à

disposition des nivoculteurs pour varier le ratio eau/air des enneigeurs. Toutefois les tendances observées dans le présent travail sont cohérentes avec les précédents travaux sur ces questions (Eisel et al., 1990; Olefs et al., 2010) et suggèrent que la neige de culture, comme tout procédé industriel, dispose d'un rendement optimum qui est significativement en deçà des 100% avec des leviers puissants de pertes additionnelles associées aux caractéristiques du terrain (topographie, vent local) et au mode d'utilisation (paramètre "qualité"). Il convient par conséquent de redoubler de prudence à l'installation comme à l'utilisation de la neige de culture qui s'avère être un appui non négligeable dont l'intérêt et l'usage doivent cependant être questionnés à chaque étape. Les conditions marginales de production semblent être des facteurs de pertes très puissants que nous suggérons de ne pas négliger. La qualité de production la plus élevée possible doit être privilégiée et la production par vent non nul (supérieur à quelques km h<sup>-1</sup>) doit être, dans la mesure du possible, évitée. Le gaspillage de la neige de culture doit faire l'objet de la plus grande attention par les nivoculteurs, tout comme la surproduction, sans quoi son intérêt pourrait être largement remis en question.

## 5 Détermination et application d'indicateurs de la viabilité de l'enneigement dans les domaines skiables des Alpes françaises sur la période 1958 - 2014

### 5.1 Introduction et méthodes

**Introduction** Cette section décrit l'intégration du modèle physique de simulations des conditions d'enneigement incluant l'influence du damage et de la production de neige avec les représentations spatiales des domaines skiables dites "enveloppes gravitaires" développées par Francois et al. (2016) pour l'ensemble des stations des Alpes françaises. La répartition des équipements en enneigeurs à l'intérieur du domaine skiable a également été simulée. Les conditions d'enneigement ont été simulées pour la période 1958 - 2014<sup>18</sup> en prenant en compte l'enneigement naturel uniquement, l'effet du damage et le damage associé à trois niveaux d'équipement en neige de culture (15, 30 et 45% de surfaces équipées en enneigeurs). Nous avons défini des indices de la viabilité de l'enneigement dont nous avons déterminé la corrélation avec le nombre de journées skieurs sur la période 2001 - 2014 (DSF, 2014) et comparé les résultats avec des études existantes (Abegg et al., 2007; François et al., 2014). Les volumes d'eau nécessaires pour la production de neige et la consommation électrique associée ont été calculés pour la période 1985 - 2014 et comparés avec les données disponibles (Badré et al., 2009).

**Zone d'étude** Les Alpes françaises regroupent l'offre de ski la plus importante à l'échelle nationale avec 141 des 220 stations françaises (64%) situées dans cette région, dont 106 (48%) dans les Alpes du Nord (NA) et 35 (16%) dans les Alpes du Sud (SA). D'après le service d'Observation, Développement et Ingénierie Touristiques (ODIT, 2009), 84% des remontées mécaniques (RM) nationales sont implantées dans les Alpes (69% NA + 15% SA) et 84% des surfaces des pistes de ski (64% NA + 19% SA). Le nombre de journées skieurs vendues par les opérateurs de remontées mécaniques est largement réalisé dans les Alpes (89%, 78% NA + 11% SA) tout comme les emplois générés par l'industrie du ski (DSF, 2014) : 105 000 des 120 000 emplois (88%, 75% NA + 13% SA). Sur la période 2001 - 2014 la France s'est partagée la première place mondiale en nombre de journées skieurs vendues avec les Etats

<sup>18</sup>. La période 1958 - 2014 court du 1<sup>er</sup> Août 1958 au 31 Juillet 2015. NB : la saison "2001" désigne l'hiver 2001 - 2002.

Unis et l'Autriche avec une moyenne de 53.9 millions de forfaits vendus (Abegg et al., 2007; DSF, 2014). Domaines Skiabiles de France (DSF) distingue cinq périodes au cours de la saison d'hiver dont l'importance économique relative est assez stable dans le temps (DSF, 2014). La période d'ouverture jusqu'à la fin des vacances de Noël représente 25 à 30% des ventes annuelles de journées skieurs et les vacances scolaires d'hiver 30 à 35% (DSF, 2014). Une répartition similaire des nuitées a été publiée par Savoie Mont-Blanc tourisme<sup>19</sup> avec 19% des nuitées vendues au cours des vacances de Noël et 33% au cours des vacances scolaires d'hiver (Lecuret et al., 2014). Le nombre de journées skieurs vendues nous a été fourni par Domaines Skiabiles de France pour la période 1990 - 2014, révélant une augmentation statistiquement significative (Onwuegbuzie et al., 2007) sur la période 1990 - 2001 ( $R^2 = 0.69$ ,  $p$ -value =  $8.10^{-4}$ ) avec une augmentation moyenne de 600 000 journées skieurs supplémentaires par an. A partir de 2001, l'évolution tendancielle des journées skieurs vendues n'est plus statistiquement significative ( $R^2 = 0.16$ ,  $p$ -value = 0.15). Nous avons donc considéré dans cette étude les périodes suivantes : la période la plus longue pour laquelle nous disposons de données météorologiques (1958 - 2014), la période depuis le début des installations en enneigeurs (1985 - 2014) et la période depuis la stagnation des ventes de journées skieurs (2001 - 2014).

**Modélisation de la neige** Le modèle SAFRAN/SURFEX/ISBA-Crocus (Brun et al., 1992; Vionnet et al., 2012) a été utilisé pour cette étude, avec les récents développements baptisés "Crocus-Resort" permettant la prise en compte de la production de neige et du damage (Spandre et al., 2016c). Le schéma de production de neige a été déterminé d'après la française (Hennessy et al., 2007; Steiger, 2010; Hanzer et al., 2014) et en particulier en s'appuyant sur l'étude que nous avons réalisée sur les pratiques professionnelles (Spandre et al., 2016a). La saison hivernale a été divisée en trois temps :

- Entre le 1<sup>er</sup> novembre et le 15 décembre, une sous couche de 30 cm de neige de culture ( $150 \text{ kg m}^{-2}$ ) est produite, si les conditions météorologiques le permettent, quel que soit l'enneigement au cours de cette période ;
- Entre le 15 décembre et le 28 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 ;
- Après le 1<sup>er</sup> mars la production n'est plus possible.

En France, nous avons déterminé une moyenne de 2.5 à 3.1 enneigeurs de type perche par hectare de piste (Spandre et al., 2016a). Nous avons donc considéré que chaque enneigeur produit de la neige sur une surface moyenne de  $3500 \text{ m}^2$ , avec un débit d'eau moyen de  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , ce qui fournit un taux de production de neige de culture de  $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Dans le modèle Crocus-Resort, la production est possible de 18h à 8h le lendemain matin (Spandre et al., 2016c), ce qui permet une production maximale de  $60 \text{ kg m}^{-2}$  de neige sur les surfaces équipées, ce qui équivaut à une épaisseur de 12 cm de neige de culture. Le critère de déclenchement de la production a été fixé au seuil de limite technique de  $-2^\circ\text{C}$  (température dite "humide" ou température du thermomètre mouillé). Une vitesse de vent de  $4.2 \text{ m s}^{-1}$  maximum est permise pour la production de neige (Spandre et al., 2016c).

**Données structurelles sur les domaines skiables** La base de données "BD stations" a été employée dans cette étude pour fournir les données structurelles sur les domaines skiables (remontées mécaniques, altitudes, zones urbaines, etc.). Les représentations spatiales des domaines skiables développées par Francois et al. (2016), dites des "enveloppes gravitaires", ont été utilisées dans cette étude. Pour des raisons techniques, ces enveloppes gravitaires n'ont pu être exploitées que pour 129 stations des Alpes dont le total des infrastructures correspond à 96% des infrastructures alpines.

19. Départements de Savoie (73) et Haute-Savoie (74)

Nous avons également utilisé les altitudes ci-dessous :

- L'altitude moyenne des RM d'une station est définie comme l'altitude moyenne de chaque RM pondérée par son moment de puissance. Cette altitude est corrélée ( $R^2 = 0.93$ ) à l'altitude médiane du domaine skiable (altitude moyenne entre le point le plus haut et le point le plus bas du domaine). L'écart moyen est - 8 m (écart type 91 m).
- L'altitude moyenne du bâti immobilier de la station, baptisée "altitude du village" et définie comme l'altitude moyenne de chaque zone urbaine pondérée par sa surface (Breiling and Charanza, 1999).

Ces altitudes étaient, elles, disponibles pour l'ensemble des 129 stations alpines traitées dans ce travail. Les domaines dont la gestion est assurée par une même société sont agrégées dans cette étude (François et al., 2014). Par exemple, la vallée de Chamonix est gérée par la Compagnie du Mont-Blanc (Le Tour, Brévents/Flégère, les Bossons, Montenvers, Aiguille du Midi et Les Grands Montets) ou les stations du Mercantour gérées par l'opérateur Cimes du Mercantour (Auron, Isola 2000, La Colmiane).

**Distribution spatiale des enneigeurs au sein des domaines** La répartition spatiale des enneigeurs au sein des domaines skiables a été simulée selon une méthode similaire à celle des "enveloppes gravitaires" et sur la littérature disponible sur les équipements en enneigeurs dans les Alpes françaises (Agrawala et al., 2007; Spandre et al., 2015, 2016a). Au cours de ce travail de thèse, nous avons déduit de nos travaux que l'objectif des enneigeurs était de garantir une zone skiable, en priorité sur les pistes les plus accessibles aux skieurs de tous niveaux et qui permettent une continuité du ski entre le haut de RM sélectionnées jusqu'au village (Spandre et al., 2016a). Abegg et al. (2007) ont également indiqué que 15% des pistes étaient équipées en enneigeurs en France en 2003 et nous avons estimé que près de 32% des pistes étaient équipées en 2015 (Spandre et al., 2015) et pourraient atteindre 43% en 2020. Nous avons donc construit des représentations spatiales des zones équipées en enneigeurs au sein des domaines skiables pour trois taux d'équipement (15%, 30% et 45%) et en suivant les règles suivantes (Figure 22) :

- **Etape 1** : les RM les plus proches du village sont sélectionnées à partir de trois critères.
  - La distance au bâti. Marcelpoil et al. (2012) ont défini les bâtiments appartenants à un domaine skiable comme étant situés à une distance de 300 m maximum du bas d'une RM. A partir de ces bâtis, Fablet (2013) a défini des zones urbaines autour de ces bâtiments dont le nombre varie pour chaque zone urbaine (Figure 22). Les bâtiments isolés ont été exclus. Nous avons ensuite défini et sélectionné les RM prioritaires comme étant distantes de 300 m maximum des zones urbaines de la station.
  - L'altitude du bâti. Les zones urbaines dont l'altitude excède de plus de 30% l'altitude moyenne du village sont exclues. Nous avons supposé que ces bâtiments correspondaient en majorité à des bâtiments techniques (gares de RM) et/ou à des restaurants d'altitude.
  - La taille des zones urbaines. Les zones urbaines constituées de moins de cinq bâtiments ont été exclues et les RM à moins de 300 m des ces zones n'ont pas été sélectionnées (Figure 22).
- **Etape 2** : L'ensemble des points accessibles par gravité depuis le haut et permettant de rejoindre le bas des RM de la sélection de l'étape 1 sont sélectionnés à leur tour. Les points dont la pente est supérieure à 25° sont exclus. L'ensemble de ces points constitue une enveloppe dite de neige de culture.
- **Etape 3** : La taille de cette enveloppe de neige de culture est comparée à la taille de l'enveloppe gravitaire du domaine skiable. Si le ratio est différent du taux d'équipement souhaité (15, 30 ou 45%), une ultime étape est réalisée :

- Si le ratio est plus faible que souhaité (exemple des Deux Alpes, Figure 22), nous avons considéré les pixels formant le contour de l'enveloppe de neige de culture et sélectionné pour chacun l'ensemble de ses voisins dont l'altitude est plus élevée que la sienne. Cette étape a été répétée jusqu'à obtenir le ratio souhaité;
- Si le ratio est plus élevé que souhaité (exemple des Sept Laux, Figure 22), tous les pixels à partir de l'altitude la plus élevée de l'enveloppe de neige de culture ont été supprimés jusqu'à ce que le ratio souhaité soit atteint.

Cette méthode permet de produire des représentations spatiales des zones équipées en priorité par les enneigeurs. L'altitude maximum de ces enveloppes de neige de culture a été extraite. Conformément aux résultats de notre enquête, cette altitude était statistiquement corrélée à l'altitude moyenne des RM pour chaque station (Figure 21).

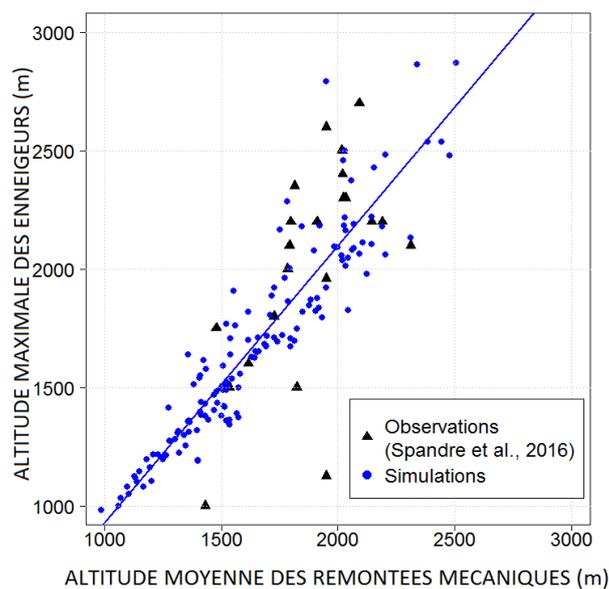


FIGURE 21 – Altitude maximum des enveloppes de neige de culture (pour un taux d'équipement de 30%) par rapport à l'altitude moyenne des remontées mécaniques des domaines skiables. En noir les données d'après Spandre et al. (2016a). Le modèle linéaire a une pente de 1.17.

La méthode de couplage des conditions d'enneigement simulées avec les représentations spatiales des domaines skiables est identique aux développements initiaux de François et al. (2014) et peut être consultée en détails dans le manuscrit. Lorsque la neige de culture est prise en compte et en fonction du taux d'équipement, une étape supplémentaire est réalisée pour déterminer si un pixel de l'enveloppe gravitaire appartient à l'enveloppe de neige de culture.

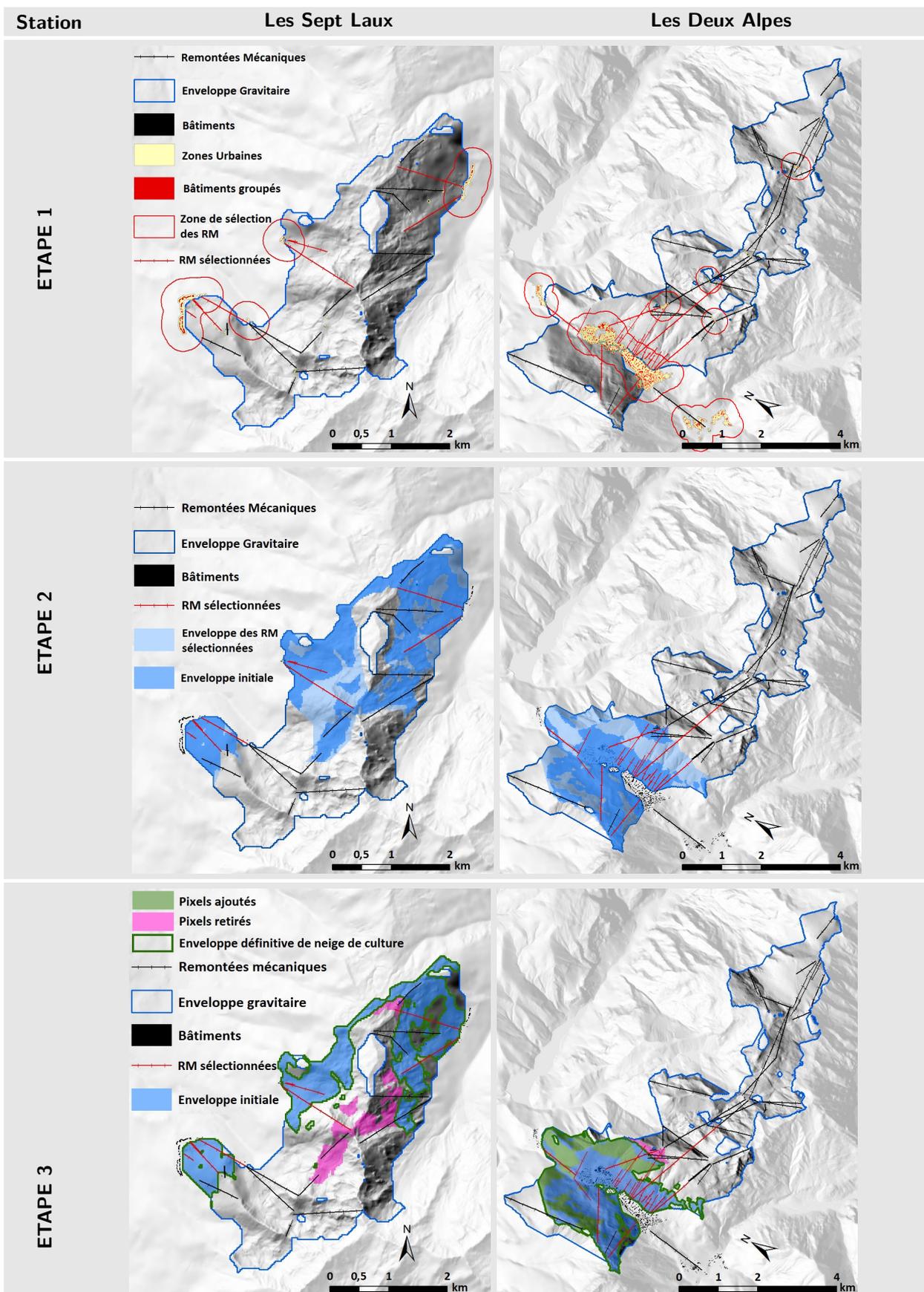


FIGURE 22 – Détermination des secteurs prioritaires pour l’implantation de la neige de culture sur les domaines skiables Les Sept Laux (Belledonne, France, gauche) et Les Deux Alpes (Oisans, France, droite). Les remontées mécaniques sont sélectionnées dans une distance maximum de 300m autour des bâtiments groupés (minimum 5 bâtiments et altitude limitée, étape 1). Les pentes accessibles depuis ces RM sont sélectionnées avec exclusion des pentes supérieures à 25° (étape 2). Des pixels sont ajoutés ou supprimés à cette enveloppe initiale pour atteindre l’objectif de couverture en équipement de neige de culture (ici 30%) pour fournir l’enveloppe définitive de neige de culture (étape 3).

**Indicateurs de la viabilité d'enneigement** L'Altitude de Viabilité de l'Enneigement (AVE, Table 3) a été déterminée pour les 23 massifs alpins sur la période 1958 - 2014 (Elsasser et al., 2002; Abegg et al., 2007). Cette altitude correspond pour chaque massif à l'altitude à laquelle la quantité de neige dépasse  $100 \text{ kg m}^{-2}$  (20 cm de neige damée à  $500 \text{ kg m}^{-3}$ ) pendant un moins 100 jours entre le 15 décembre et le 15 avril. Trois altitudes ont été calculées : l'altitude à laquelle ces conditions sont respectées en neige damée en moyenne ("GS Av."), l'altitude à laquelle ces conditions sont respectées en neige damée pour 70% des saisons sur l'ensemble de la période ("GS >70%") et l'altitude à laquelle ces conditions sont respectées avec production de neige pour 90% au moins des saisons sur l'ensemble de la période ("GS+SM >90%"). Les altitudes moyennes des RM et du village de chaque station ont été comparées à cette altitude AVE. Cette approche ne prend donc pas compte les représentations spatiales des domaines skiables et des enveloppes de neige de culture décrites plus haut.

Un second indicateur a été calculé en prenant en compte les représentations spatiales de chaque domaine. Chaque jour la proportion du domaine skiable qui présente une quantité de neige d'au moins  $100 \text{ kg m}^{-2}$  (20 cm de neige damée à  $500 \text{ kg m}^{-3}$ ) est calculée. Cet indice quotidien de la viabilité du domaine skiable est calculé pour chaque station des Alpes françaises et pour chaque journée entre le 1<sup>er</sup> novembre et le 15 mai de 1958 à 2014. Cet indice est ensuite calculé pour les périodes des vacances de Noël (20 décembre - 5 janvier) et des vacances scolaires d'hiver (5 février - 5 mars) en prenant la moyenne des indices quotidiens pour chacune des deux périodes. L'indice de viabilité annuel d'une station est défini comme la combinaison de ces deux indices dont les poids relatifs sont 17% pour les vacances de Noël et 83% pour les vacances scolaires d'hiver. Ces poids relatifs ont fourni la meilleure corrélation possible avec les journées skieurs fournies par Domaines Skiables de France. Le détail de ce travail peut être consulté dans le manuscrit. L'indice annuel agrégé sur l'ensemble des 121 stations (pondéré par le moment de puissance de chacune) a été baptisé "vacances combinées". Un dernier indicateur a été calculé comme la moyenne saisonnière des indices quotidiens de la viabilité d'un domaine skiable, dont les résultats ne sont pas détaillés ici.

Massif	Altitude de Viabilité de l'Enneigement (AVE, m)			Total (N)	Nombre de stations (n) au dessus de l'AVE					
	GS Av.	GS > 70%	GS+SM > 90%		à l'altitude du Village			à l'altitude moyenne des RM		
					GS Av.	GS > 70%	GS+SM > 90%	GS Av.	GS > 70%	GS+SM > 90%
Chablais	1309	1372	870 (90%)	18	3	3	17	15	14	18
Aravis	1257	1323	750 (96%)	13	1	0	12	8	6	13
Mont-Blanc	1343	1415	1050 (100%)	7	1	0	6	7	6	7
Bauges	1301	1348	814 (90%)	4	1	1	4	4	4	4
Beaufortain	1368	1463	750 (91%)	5	1	0	5	5	4	5
Haute-Tarentaise	1479	1617	750 (93%)	5	4	4	5	5	5	5
Chartreuse	1401	1476	867 (90%)	6	0	0	6	1	0	6
Belledonne	1410	1463	850 (90%)	3	2	1	3	3	3	3
Maurienne	1478	1613	729 (90%)	7	6	2	7	7	7	7
Vanoise	1574	1715	750 (96%)	11	4	3	11	10	11	11
Haute-Maurienne	1942	1988	1050 (98%)	6	0	0	6	3	3	6
Grandes Rousses	1639	1773	750 (91%)	3	2	0	3	3	3	3
Thabor	1895	1958	1350 (95%)	2	0	0	2	1	1	2
Vercors	1537	1611	1125 (90%)	10	0	0	5	1	0	10
Oisans	1705	1841	1100 (90%)	8	0	0	6	3	2	7
Pelvoux	1767	1898	1050 (100%)	3	0	0	3	2	2	3
Queyras	2209	2334	1050 (100%)	1	0	0	1	0	0	1
Devoluy	1859	1904	1385 (90%)	2	0	0	1	0	0	1
Champsaur	1880	1978	1050 (98%)	3	0	0	3	1	1	3
Embrunais-Parpaillon	2183	2334	1020 (90%)	3	0	0	3	1	0	3
Ubaye	2219	2398	1050 (90%)	4	0	0	4	0	0	4
Haut-Var - Haut-Verdon	2137	2165	1433 (90%)	4	0	0	4	0	0	4
Mercantour	2167	2229	1460 (90%)	1	0	0	1	0	0	1
Alpes du Nord	1480	1570	870	106	25	14	96	75	67	105
Alpes du Sud	2035	2130	1170	23	0	0	22	5	4	22

TABLE 3 – Altitude de Viabilité de l'Enneigement (AVE) pour les 23 massifs alpins sur la période 1958 - 2014 basées sur un enneigement minimum de  $100 \text{ kg m}^{-2}$  pendant 100 jours ou plus entre le 15 décembre et le 15 avril. Les Alpes du Sud sont soulignées en gris foncé et les Alpes du Nord en gris clair. Les altitudes calculées correspondent aux altitudes où ces conditions d'enneigement sont respectées en moyenne ("GS Av.") et pour au moins 7 saisons sur 10 ("GS >70%") en conditions de neige damée. "GS+SM >90%" correspond à l'altitude à laquelle ces conditions d'enneigement sont respectées pour au moins 9 saisons sur 10 ("GS >90%") en prenant en compte le damage et la production de neige. Nous avons également (dans ce cas) détaillé la probabilité associée lorsque la plus faible altitude du système SAFRAN présentait une probabilité supérieure à 90% (12 massifs sur 23). Le nombre total de stations par massif (N) ainsi que le nombre de stations situées au dessus de l'altitude de viabilité de l'enneigement (n) en considérant l'altitude du village ("Village") ou l'altitude moyenne des remontées mécaniques ("RM").

**Détermination des besoins en eau et en énergie pour la production de neige** Cette chaîne de modélisation physique des conditions d'enneigement permet d'enregistrer la quantité quotidienne ( $\text{kg m}^{-2}$ ) de neige produite par le modèle pour chaque point d'une station. A la fin d'une saison, ces quantités peuvent être agrégées à l'échelle de la station pour fournir un volume d'eau employé pour la production, tel que simulé par le modèle. Le cumul des volumes de l'ensemble des stations a fourni un volume d'eau nécessaire pour l'échantillon de 129 stations de cette étude. Ce calcul a été réalisé pour les trois taux de pistes équipées en neige de culture (15, 30 ou 45%). Le taux réel d'équipement à l'échelle nationale entre 1985 et 2014 a été extrait de la littérature (Hahn, 2004; Abegg et al., 2007; Odit, 2009; Spandre et al., 2015). Pour chaque saison le volume correspondant au taux réel d'équipement a été

calculé par une approximation linéaire à partir des volumes obtenus pour 15, 30 et 45% de couverture (voir manuscrit). Enfin, Francois et al. (2016) ont calculé le rapport entre la surface réelle de pistes et la surface des enveloppes gravitaires et déterminé une moyenne de 11% dans les Alpes. Le volume d'eau correspondant aux besoins sur les pistes de ski a donc été calculé à partir du volume simulé, du taux réel d'équipement en neige de culture dans les Alpes françaises pour chaque saison entre 1985 et 2014 et du ratio entre le domaine gravitaire et les surfaces de pistes. A l'aide de cette méthode la surface totale de pistes pour les 129 stations de cette étude était de 16 133 hectares. La quantité d'énergie nécessaire à la production a ensuite été calculée à partir des volumes annuels agrégés sur l'ensemble des stations et d'un besoin énergétique moyen de 6 kWh par m<sup>3</sup> d'eau (Rixen et al., 2011; Hahn, 2004).

## 5.2 Viabilité aux conditions d'enneigement et besoin en neige de culture

**Altitude de Viabilité de l'Enneigement (AVE)** L'ensemble des résultats peut être consulté par massif dans la table 3. Six Petites station sur 55 (11%) ont un village situé au dessus de l'AVE moyenne en neige damée "GS Av." et 20 (36%) ont une altitude moyenne des RM plus élevée. Les Très Grandes stations sont 8 sur 14 à être situées au dessus de cette AVE moyenne en neige damée à l'altitude de leur village et 13 ont une altitude moyenne des RM plus élevée (93%). Sur l'ensemble des 129 stations, 25 ont une altitude du village plus élevée que l'AVE moyenne en neige damée (19%). Aucune n'est située dans les Alpes du Sud. A l'altitude moyenne des RM, 80 stations sur 129 sont plus élevées que l'AVE moyenne en neige damée (62%) et 71 sur 129 (55%) sont plus élevées que l'AVE basée sur une probabilité de 70% ("GS>70%"). En prenant en compte la production de neige de culture, douze des 23 massifs avaient une probabilité supérieure ou égale à 90% d'avoir une quantité de neige de 100 kg m<sup>-2</sup> pendant au moins 100 jours à l'altitude la plus faible du système SAFRAN (Table 3). A l'altitude moyenne des RM, 127 stations sur 129 (98%) sont plus élevées que l'AVE avec production de neige de culture "GS+SM>90%". A l'altitude du village, 118 stations sur 129 (91%) sont plus élevées que l'AVE avec production de neige de culture "GS+SM>90%".

**Corrélation entre l'indice de viabilité de l'enneigement et les journées skieurs** La corrélation des journées skieurs à l'indice de viabilité "vacances combinées" est excellente pour l'ensemble des simulations réalisées (neige naturelle, damée ou avec production de neige) avec un coefficient de corrélation R<sup>2</sup> entre 0.85 et 0.91 (voir manuscrit). L'amplitude des fluctuations des journées skieurs au cours de la période 2001 - 2014 est la mieux représentée par l'indice de viabilité "vacances combinées" pour un taux d'équipement entre 15 et 30% ce qui est très cohérent avec l'équipement réel au cours de cette période. Cet indice "vacances combinées" montre une variabilité assez importante depuis 1958 (Figure 23 et manuscrit) avec une moyenne en neige naturelle de 84.4% sur la décennie 1985 - 1994 et de 93.8% sur la décennie 1975 - 1984. La variabilité spatiale de cet indice est également forte avec un indice moyen plus faible et un écart-type plus élevé pour les massifs des Alpes du Sud et les massifs pré alpins (Figure 24 et manuscrit).

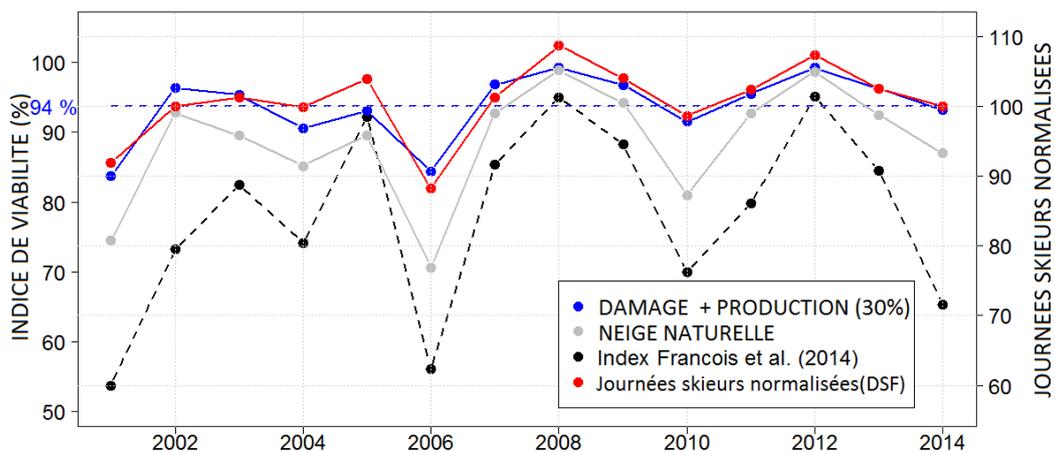


FIGURE 23 – L'indice de viabilité des vacances combinées (%) sur la base de l'enneigement naturel et en prenant en compte la gestion de la neige (30% d'équipement en neige de culture), sur la période 2001 - 2014. Les journées skieurs normalisées (évolution relative à la moyenne sur la période) et agrégées au niveau national (données DSF) et l'indice de viabilité de François et al. (2014) sont également présentés. Les axes y ont une même échelle avec le 100% des journées skieurs normalisées (moyenne) centré sur la moyenne de l'indice de viabilité sur la période 2001 - 2014 (94%).

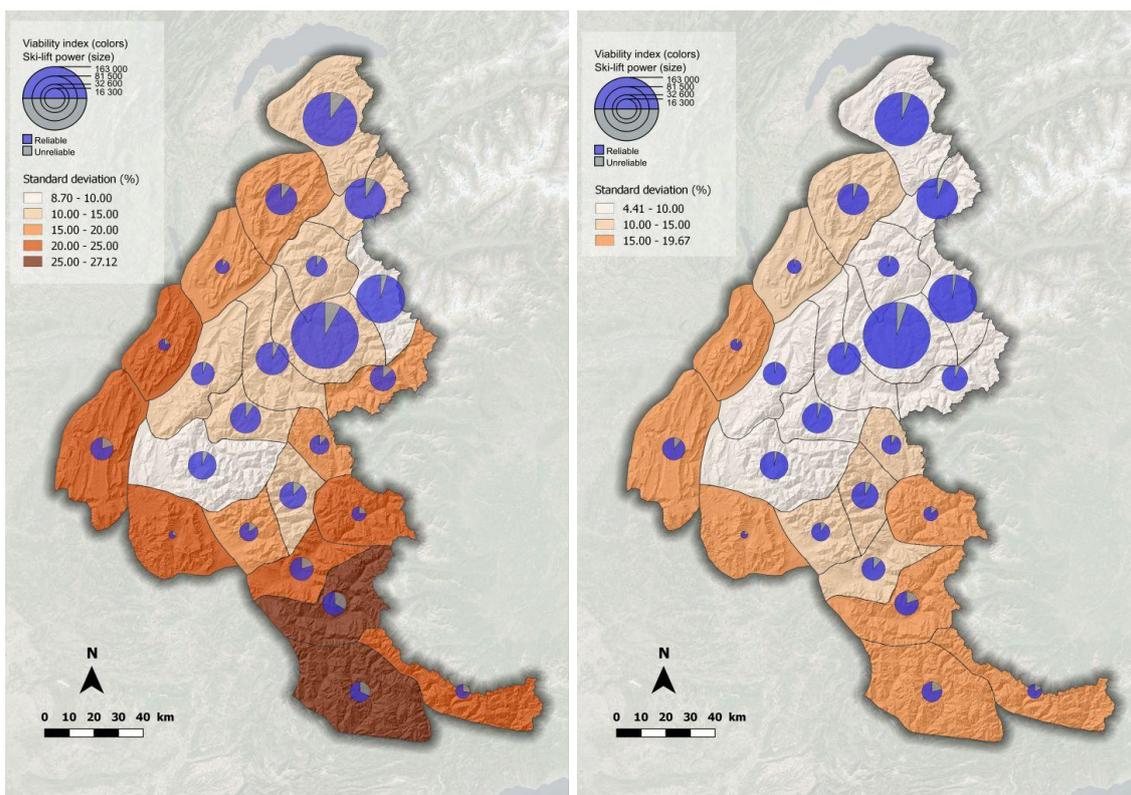


FIGURE 24 – Viabilité de l’enneigement des 23 massifs alpins au cours de la période 1958 - 2014 (indice de vacances combinées) en conditions d’enneigement naturel (gauche) et en prenant en compte l’impact du damage et de la production de neige de culture (30% d’équipement, droite). Pour chaque massif le camembert correspond à l’indice de viabilité moyen and la couleur de fond (tons bruns) correspond à la variabilité (écart-type) de l’indice de viabilité sur la période 1958 - 2014. La taille du camembert est proportionnelle aux infrastructures présentes dans le massif considéré.

L’indice “vacances combinées” montre également une forte sensibilité à la taille de la station : plus la station est grande, plus l’indice moyen est bon et moins sa variabilité (écart-type) est importante (voir manuscrit). Sur l’ensemble de la période 1958 - 2014 cet indice “vacances combinées” (en neige naturelle, damée ou avec production de neige) n’a pas connu d’évolution statistiquement significative à l’échelle des 129 stations.

**Besoins en eau et en énergie** Sur l’ensemble des 129 stations traitées, le besoin en neige de culture entre 1985 et 2014 était en moyenne de  $1982 \text{ m}^3$  d’eau par hectare ( $\text{ha}^{-1}$ ) de piste avec un écart type de  $390 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , un minimum de  $1509 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  et un maximum de  $3072 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Ces consommations correspondent à une épaisseur moyenne de neige de culture de 39.6 cm avec un minimum de 30.1 cm et un maximum de 61.4 cm. Ces valeurs sont similaires à celles observées par Rixen et al. (2011) à partir de données de deux stations en Suisse. Le besoin simulé en eau par hectare permettant d’atteindre les objectifs d’enneigement n’a pas montré d’évolution statistiquement significative sur la période 1985 - 2014. La croissance continue et soutenue du besoin total est liée à la croissance significative du taux d’équipement en enneigeurs, de moins de 1% des pistes équipées en 1985 à 32% en 2015 (Figure 25). La consommation totale d’énergie pour la production de neige de culture a été estimée à partir des

volumes simulés et à une consommation de 6 kWh par m<sup>3</sup> d'eau ( $\pm 1 \text{ kWh m}^{-3}$ ). La consommation énergétique totale a été estimée à 25.5 GWh ( $\pm 13.5 \text{ GWh}$ ) en 2003 quand le ratio de pistes équipées en enneigeurs était de 15% (Hahn, 2004) et à 61.0 GWh ( $\pm 32.3 \text{ GWh}$ ) en 2013 quand ce ratio a atteint 30% (Spandre et al., 2015).

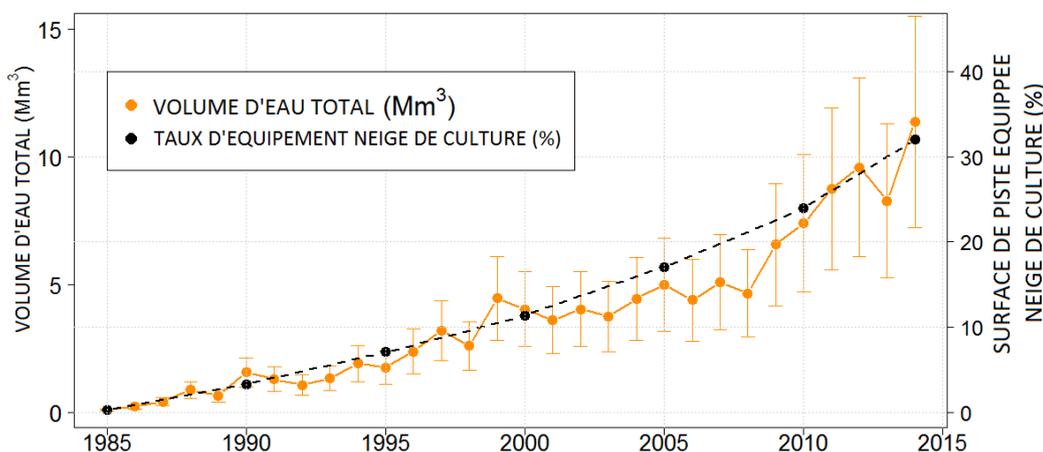


FIGURE 25 – Volumes d'eau simulés pour la production de neige de culture (Mm<sup>3</sup> ou millions de m<sup>3</sup>) est le produit du volume d'eau par hectare par la surface de piste équipée en neige de culture. L'incertitude est liée à la conversion entre la surface des domaines gravitaires et la surface effective des pistes de ski d'un domaine skiable. L'évolution du taux d'équipement en neige de culture depuis 30 ans est clairement le principal moteur de l'évolution du besoin en eau pour la production de neige de culture.

**Elements de discussion** Plusieurs éléments de méthode ou dans les résultats de cette étude font l'objet d'une discussion dans le manuscrit. Je ne développerai qu'un seul de ces éléments qui concerne les besoins en neige de culture que nous avons calculés ici. D'après des études de ODIT (2009) et Badré et al. (2009) sur la base d'indications fournies par les domaines skiables le volume d'eau total employé pour la production de neige de culture en France était de 6 Mm<sup>3</sup> (millions de m<sup>3</sup>) en 2003 quand 7% des pistes étaient équipées en enneigeurs et de 18.9 Mm<sup>3</sup> en 2007 quand 20% des pistes étaient équipées. Dans la mesure où les 129 stations de cette étude représentent 96% des infrastructures de RM alpines et 80.6% des infrastructures de RM nationales et que les RM sont significativement corrélées aux surfaces de pistes, nous avons estimé que le volume de ODIT (2009) et Badré et al. (2009) correspondant aux 129 stations de notre étude était 4.8 Mm<sup>3</sup> en 1995 et 15.2 Mm<sup>3</sup> en 2007. Les besoins simulés par notre approche étaient de 2.6 Mm<sup>3</sup> (contre 4.8 Mm<sup>3</sup>) en 1995 et 5.7 Mm<sup>3</sup> (contre 15.2 Mm<sup>3</sup>) en 2007 soit un facteur de 1.8 à 2.7. Badré et al. (2009) ont estimé que le besoin en eau par hectare de piste était assez stable entre 1995 et 2007 avec une moyenne de 3500 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Notre méthode sous estime donc nettement les besoins en eau, ce que nous tentons d'expliquer par trois raisons. D'abord, il est tout à fait possible que les domaines skiables produisent plus de neige que nous ne l'avons simulé, bien que notre approche de la production de neige soit cohérente avec les différentes études sur ces questions (Scott and McBoyle, 2007; Steiger, 2010; Hanzer et al., 2014; Spandre et al., 2016a). Ensuite, nous n'avons pas tenu compte des pertes en eau au cours du processus de production de la neige alors que plusieurs études (dont cette thèse) ont montré que ces pertes peuvent être importantes (Eisel et al., 1988,

1990; Olefs et al., 2010; Spandre et al., 2016b). Enfin, la surface totale de piste, et donc les surfaces de pistes équipées en enneigeurs, simulées par cette étude sont nettement inférieures aux chiffres de ODIT (2009). Si les 129 stations représentent 96% des pistes des Alpes françaises, la surface de piste correspondante à cet échantillon est de 21 393 ha d'après ODIT (2009) contre les 16 133 ha simulés dans cette étude, soit 24.5% de moins. Par conséquent, si on prend en compte un facteur de perte en eau de 30% et une surface de piste 24.5% supérieure, le besoin en eau simulée par cette étude est 4.8 Mm<sup>3</sup> en 1995 (contre 4.8 Mm<sup>3</sup>) et 10.8 Mm<sup>3</sup> en 2007 (contre 15.2 Mm<sup>3</sup>) soit des facteurs de 1 à 1.4 entre nos estimations et celles de Badré et al. (2009) et ODIT (2009). Ces écarts nous semblent très raisonnables dans la mesure où notre approche est très généraliste et que plusieurs sources significatives d'incertitudes existent, comme les pertes en eau lors de la production de neige.

**Conclusion** Nous avons exposé ici une méthode originale pour l'étude des interactions entre les conditions d'enneigement dans les domaines skiables français et des indicateurs socio économiques de leur activité. Cette méthode s'appuie sur des éléments structurants des domaines skiables (RM, taille, altitude) et fournit des simulations des conditions d'enneigement qui prennent en compte les spécificités géographiques des domaines skiables et les impacts physiques du damage et de la neige de culture sur les propriétés du manteau neigeux. L'altitude de viabilité de l'enneigement a été calculée sur la période 1958 - 2014 avec une moyenne en neige damée de 1480 m dans les Alpes du Nord et 2035 m dans les Alpes du Sud. Un second indicateur a été calculé qui prend en compte les spécificités des domaines skiables et notamment la répartition spatiale des enneigeurs au sein des domaines. Cet indicateur baptisé "vacances combinées" repose sur la viabilité de l'enneigement au cours des vacances de Noël et au cours des vacances scolaires d'hiver. Cette étude a montré qu'un poids relatif de 17% aux vacances de Noël et 83% aux vacances scolaires d'hiver fournit la meilleure corrélation aux journées skieurs sur la période 2001 - 2014. Cette étude a révélé une variabilité spatiale et temporelle importante de cet indicateur. Les besoins en eau et en énergie pour la production de neige de culture ont été calculés pour l'ensemble des 129 stations traitées dans cette étude sur la période 1985 - 2014 en prenant en compte l'évolution du taux d'équipement en enneigeurs au cours de cette période. Notre méthode semble sous estimer ces besoins, ce qui peut sans doute s'expliquer, au moins en partie, par une surface de piste simulée moins importante que les relevés existants et la non prise en compte des pertes en eau lors du processus de fabrication de neige de culture. Dans l'ensemble cette méthode a montré sa capacité à fournir des éléments fiables et pertinents, corrélés à l'activité économique des stations de sports d'hiver (journées skieurs) et permettant d'estimer les besoins associés en eau et en énergie pour la production de neige de culture grâce à une analyse rétrospective (1958 - 2014) des conditions d'enneigements dans les stations des Alpes françaises.

## 6 Conclusion générale

Ce travail de thèse a démarré sur un constat initial de méconnaissance des pratiques de gestion de la neige dans les domaines skiables et des variables pertinentes pour les activités de sports d'hiver par le milieu scientifique. Réciproquement les acteurs professionnels (gestionnaires, techniciens) et institutionnels (élus) rencontraient des difficultés pour s'approprier les résultats issus de travaux de recherche pour l'évaluation des opportunités et des risques associés aux évolutions techniques (neige de culture) et climatiques (changements climatiques) en lien avec les sports d'hiver. L'objectif de ce travail consistait donc à questionner les interactions entre les conditions d'enneigement, variables dans le temps et l'espace et peu prévisibles, et les activités des stations de sports d'hiver, aux exigences et

aux contraintes fortes.

Cette étude s'est par conséquent attachée dans un premier temps à définir les attentes des opérateurs de domaines skiables en termes d'enneigement, les méthodes employées pour y parvenir et les moyens à leur disposition pour les réaliser. Dans un second temps, l'impact physique de ces actions humaines sur les propriétés du manteau neigeux (damage, production de neige) a été observé au cours de plusieurs campagnes de terrain et intégré dans un modèle physique de simulation des conditions d'enneigement. Ces deux approches complémentaires ont constitué les piliers de ce travail de thèse et apporté des éléments pour le développement d'une chaîne de modélisation physique des conditions d'enneigement dans les domaines skiables. Cette approche permet de prendre en compte la dynamique interactive entre les contraintes et attentes opérationnelles liées à la gestion de la neige et les impacts physiques de ces opérations sur l'évolution du manteau neigeux tout au long de la saison hivernale. Enfin, cette chaîne de modélisation a pu être couplée à une approche géographique et structurelle des domaines skiables, applicable à l'ensemble des domaines skiables des Alpes françaises. Ceci a permis le développement d'une méthode intégrée de simulation des conditions d'enneigement dans les stations de sports d'hiver fondée sur une approche opérationnelle de la gestion de la neige, une prise en compte physique de cette gestion sur l'évolution saisonnière du manteau neigeux et des caractéristiques individuelles des domaines skiables (taille, altitudes, pentes, etc.). Cette approche systématique ouvre un large champ de possibles pour la détermination d'indicateurs objectifs et pertinents sur les conditions d'enneigement pour des études prospectives de l'activité socio-économique de l'industrie du ski. Le potentiel et la fiabilité de cette méthode ont été évalués et discutés dans une analyse rétrospective de la vulnérabilité des domaines skiables des Alpes françaises aux conditions d'enneigement au cours de la période 1958 - 2014. L'évolution des besoins en eau et en énergie pour la production de neige de culture a également été modélisée et évaluée. Cette approche pourrait donc être employée pour l'analyse de la vulnérabilité des domaines skiables dans d'autres massifs montagneux que les Alpes. Les résultats issus de ces travaux pourraient ainsi être communiqués aux milieux professionnels afin d'en conforter et réévaluer la pertinence en termes d'indicateurs et d'en confronter les résultats à l'expérience vécue des opérateurs de domaines skiables. Ce travail d'appropriation de la méthode et de ses indicateurs par le monde professionnel fournira un cadre solide pour des analyses prospectives, notamment des effets attendus du changement climatique sur l'activité des stations de sports d'hiver et/ou des évolutions des équipements de neige de culture.

# Bibliographie

- Abegg, B., Agrawala, S., Crick, F., de Montfalcon, A., 2007. Climate change impacts and adaptation in winter tourism, in : Agrawala, S. (Ed.), *Climate Change in the European Alps*, OECD Paris. pp. 25–60. doi :10.1787/9789264031692-en.
- Agrawala, S., et al., 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.
- Armstrong, R., Brun, E., 2008. *Snow and climate : physical processes, surface energy exchange and modeling*. Cambridge Univ. Pr. doi :10.1111/j.1751-8369.2010.00181.x.
- Badré, M., Prime, J., 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 URL : [http://www.mountainwilderness.fr/IMG/pdf/rapport\\_neige-de-culture\\_2009.pdf](http://www.mountainwilderness.fr/IMG/pdf/rapport_neige-de-culture_2009.pdf).
- Beniston, M., 1997. Variations of snow depth and duration in the swiss alps over the last 50 years : links to changes in large-scale climatic forcings. *Climatic Change* 36, 281–300. doi :10.1023/A:1005310214361.
- Beniston, M., 2006. Mountain weather and climate : a general overview and a focus on climatic change in the alps. *Hydrobiologia* 562, 3–16. doi :10.1007/s10750-005-1802-0.
- Bergstrom, K., Ekeland, A., 2004. Effect of trail design and grooming on the incidence of injuries at alpine ski areas. *British Journal of Sports Medicine* 38, 264–268. doi :10.1136/bjism.2002.000270.
- Breiling, M., Charamza, P., 1999. The impact of global warming on winter tourism and skiing : a regionalised model for austrian snow conditions. *Regional Environmental Change* 1, 4–14. doi :10.1007/s101130050003.
- Brun, E., David, P., Sudul, M., Brunot, G., 1992. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *J. Glaciol.* 38, 13 – 22. URL : [http://refhub.elsevier.com/S0165-232X\(14\)00138-4/rf0155](http://refhub.elsevier.com/S0165-232X(14)00138-4/rf0155).
- Calonne, N., Flin, F., Morin, S., Lesaffre, B., du Roscoat, S.R., Geindreau, C., 2011. Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow. *Geophys. Res. Lett.* 38, L23501. doi :10.1029/2011GL049234.
- Carmagnola, C.M., Morin, S., Lafaysse, M., Domine, F., Lesaffre, B., Lejeune, Y., Picard, G., Arnaud, L., 2014. Implementation and evaluation of prognostic representations of the optical diameter of

- snow in the surfex/isba-crocus detailed snowpack model. *The Cryosphere* 8, 417–437. doi :10.5194/tc-8-417-2014.
- 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* 8, 1673–1697. doi :10.5194/tc-8-1673-2014.
- Damm, A., Koeberl, J., Prettenthaler, F., 2014. Does artificial snow production pay under future climate conditions? - a case study for a vulnerable ski area in austria. *Tourism Management* 43, 8–21. doi :10.1016/j.tourman.2014.01.009.
- Dawson, J., Scott, D., 2013. Managing for climate change in the alpine ski sector. *Tourism Management* 35, 244–254. doi :10.1016/j.tourman.2012.07.009.
- De Jong, C., Previtali, F., Carletti, G., 2015. Challenges in Assessing and Managing Geo-hydrological Risk Related to Natural and Anthropogenic Pressures in Alpine Ski Resorts. Springer. pp. 781–785. doi :10.1007/978-3-319-09048-1\_152.
- DSF, 2011. L'observatoires - Indicateurs et Analyses. Technical Report. Domaines Skiabiles de France. URL : <http://www.domaines-skiabiles.fr/downloads/uploads/OBSERVATOIRERecueilIndicateur2011BD.pdf>.
- DSF, 2014. Indicateurs et analyses. URL : <http://www.domaines-skiabiles.fr/downloads/DSF-Indicateurs-et-Analyses2014-A4-BD.pdf>.
- Durand, Y., Brun, E., Méridol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., Martin, E., 1993. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Ann. Glaciol.* 18, 65–71. URL : [http://www.igsoc.org/annals/18/igs\\_annals\\_vol18\\_year1993\\_pg65-71.html](http://www.igsoc.org/annals/18/igs_annals_vol18_year1993_pg65-71.html).
- Durand, Y., Giraud, G., Laternser, M., Etchevers, P., Méridol, L., 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.* 48, 429–449. doi :10.1175/2008JAMC1808.1.
- Durand, Y., Giraud, G., Laternser, M., Etchevers, P., Méridol, L., 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.* 48, 2487–2512. doi :10.1175/2009JAMC1810.1.
- Eisel, L.M., Mills, K.D., Leaf, C.F., 1988. Estimated consumptive loss from man made snow. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 24, 815–820. doi :10.1111/j.1752-1688.1988.tb00932.x.
- Eisel, L.M., Mills, K.D., Leaf, C.F., 1990. Estimated runoff from man made snow. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 26, 519–526. doi :10.1111/j.1752-1688.1990.tb01390.x.
- Elsasser, H., Bürki, R., et al., 2002. Climate change as a threat to tourism in the alps. *Climate Research* 20, 253–257. doi :10.3354/cr020253.
- Essery, R., Martin, E., Douville, H., Fernandez, A., Brun, E., 1999. A comparison of four snow models using observations from an alpine site. *Climate Dynamics* 15, 583–593. doi :10.1007/s003820050302.

- Fablet, G., 2013. Real estate development in the ski resorts of the tarentaise valley. *Journal of Alpine Research— Revue de géographie alpine* doi :10.4000/rga.2196.
- Fahey, B.D., Wardle, K., Weir, P., et al., 1999. Environmental effects associated with snow grooming and skiing at treble cone ski field. *Department of Conservation 120B*, 49 – 62. URL : [doc.govt.nz/documents/science-and-technical/sfc120a.pdf](http://doc.govt.nz/documents/science-and-technical/sfc120a.pdf).
- Falk, M., 2010. A dynamic panel data analysis of snow depth and winter tourism. *Tourism Management* 31, 912–924. doi :10.1016/j.tourman.2009.11.010.
- Falk, M., 2014. The demand for winter sports : empirical evidence for the largest french ski-lift operator. *Tourism Economics* 21, 561–580. doi :10.5367/te.2013.0366.
- Fauve, M., Rhyner, H., Schneebeli, M., Schneebeli, M., Schneebeli, M., 2002. Preparation and maintenance of pistes : handbook for practitioners. Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF. URL : [http://www.ws1.ch/eshop/product\\_info.php?cPath=39\\_41&products\\_id=152](http://www.ws1.ch/eshop/product_info.php?cPath=39_41&products_id=152).
- Federolf, P., JeanRichard, F., Fauve, M., Lüthi, A., Rhyner, H.U., Dual, J., 2006. Deformation of snow during a carved ski turn. *Cold Regions Science and Technology* 46, 69–77. doi :10.1016/j.coldregions.2006.06.006.
- Francois, H., George-Marcelpoil, E., 2012. 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* 17, 227–242. URL : <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00036068>.
- 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. *Cold Regions Science and Technology* 108, 98–112. doi :10.1016/j.coldregions.2014.08.005.
- Francois, H., Morin, S., Spandre, P., Lafaysse, M., George-Marcelpoil, E., 2016. Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche et application aux alpes françaises. *La Houille Blanche* 4. doi :10.1051/1hb/2016041.
- Gerbaux, M., Genthon, C., Etchevers, P., Vincent, C., Dedieu, J., 2005. Surface mass balance of glaciers in the French Alps : distributed modeling and sensitivity to climate change. *J. Glaciol.* 51, 561–572. doi :10.3189/172756505781829133.
- Gilaberte-Búrdalo, M., López-Martín, F., Pino-Otín, M., López-Moreno, J.I., 2014. Impacts of climate change on ski industry. *Environmental Science & Policy* 44, 51–61. doi :10.1016/j.envsci.2014.07.003.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., 2014. 21st century climate change in the european alps. *Science of the Total Environment* 493, 1138–1151. doi :10.1016/j.scitotenv.2013.07.050.
- Guily, L., 1991. L'exploitation technique des pistes de ski alpin dans le domaine skiable français. Ph.D. thesis. Grenoble 1. URL : <http://www.sudoc.fr/041451392>.

- Hahn, F., 2004. L'enneigement artificiel dans l'arc alpin - rapport de synthèse. Commission Internationale pour la Protection des Alpes, URL : [www.cipra.org/fr/publications/2709/454\\_fr/at\\_download/file](http://www.cipra.org/fr/publications/2709/454_fr/at_download/file).
- 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* 108, 113–124. doi :10.1016/j.coldregions.2014.08.003.
- Hendrikx, J., Hreinsson, E., 2012. The potential impact of climate change on seasonal snow in new zealand : industry vulnerability and future snowmaking potential. *Theoretical and Applied Climatology* 110, 619–630. doi :10.1007/s00704-012-0713-z.
- Hennessy, K., Whetton, P., Walsh, K., Smith, I., Bathols, J., Hutchinson, M., Sharples, J., 2007. Climate change effects on snow conditions in mainland australia and adaptation at ski resorts through snowmaking. *Climate Research* 35, 255. doi :10.3354/cr00706.
- Hopkins, D., 2015. The perceived risks of local climate change in queenstown, new zealand. *Current Issues in Tourism* 18, 947–965. doi :10.1080/13683500.2013.776022.
- Hopkins, D., Maclean, K., 2014. Climate change perceptions and responses in scotland's ski industry. *Tourism Geographies* 16, 400–414. doi :10.1080/14616688.2013.823457.
- Howard, R., Stull, R., 2014. Piste : A snow-physics model incorporating human factors for groomed ski slopes. *J. Hydrometeorol.* 15, 2429–2445. doi :10.1175/JHM-D-14-0013.1.
- Hughes, M.G., Robinson, D.A., 1996. Historical snow cover variability in the great plains region of the usa : 1910 through to 1993. *International Journal of Climatology* 16, 1005–1018. doi :10.1002/(SICI)1097-0088(199609)16:9<1005::AID-JOC63>3.0.CO;2-0.
- 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., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp. URL : <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G., 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers, National Leader, Colo. Inst. for Irrig. Mgmt., USC 4th floor CSV, Ft. Collins, CO. URL : <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?67841>.
- Keddy, 1979. Snowmobile impact on old field and marsh vegetation in nova scotia, canada : An experimental study. *Environ. Management* 3, 409 – 415. doi :10.1007/BF01866580.
- Keller, T., Pielmeier, C., Rixen, C., Gadiant, F., Gustafsson, D., Stähli, M., 2004. Impact of artificial snow and ski-slope grooming on snowpack properties and soil thermal regime in a sub-alpine ski area. *Annals of Glaciology* 38, 314–318. doi :10.3189/172756404781815310.
- Koenig, U., Abegg, B., 1997. Impacts of climate change on winter tourism in the swiss alps. *Journal of Sustainable Tourism* 5, 46 – 58. doi :10.1080/09669589708667275.

- Kotlarski, S., Bosshard, T., Lüthi, D., Pall, P., Schär, C., 2012. Elevation gradients of european climate change in the regional climate model cosmo-clm. *Climatic change* 112, 189–215. doi :10.1007/s10584-011-0195-5.
- Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., G. Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., 2014. Regional climate modeling on european scales : a joint standard evaluation of the euro-cordex rcm ensemble. *Geosci. Model Dev.* 7, 1297–1333. doi :10.5194/gmd-7-1297-2014.
- 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. *Journal of Hydrology* 403, 116–129. doi :10.1016/j.jhydro1.2011.03.046.
- Lecuret, C., Raphoz, C., Collombat, C., Vagnard, J., Voltzenlogel, D., 2014. Tourism monitor. Savoie Mont Blanc facts and figures. Technical Report. Savoie Mont Blanc Tourisme. URL : <http://pro.savoie-mont-blanc.com/content/view/full/6682>.
- Leich, J., 2001. Chronology of snow grooming. Notes for Exhibit, New England Ski Museum URL : [http://newenglandskimuseum.org/wp-content/uploads/2012/06/ski\\_grooming\\_timeline.pdf](http://newenglandskimuseum.org/wp-content/uploads/2012/06/ski_grooming_timeline.pdf).
- Lesaffre, B., Lejeune, Y., Morin, S., Panel, J.M., Poncet, 2012. Impact du changement climatique sur l'enneigement de moyenne montagne : l'exemple du site du col de porte en chartreuse, in : Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. URL : [www.cnrm-game-meteo.fr/IMG/pdf/lesaffre\\_aic\\_2012.pdf](http://www.cnrm-game-meteo.fr/IMG/pdf/lesaffre_aic_2012.pdf).
- Lorit, J., 1991. Enquete sur les difficultés des stations de sports d'hiver.
- Marcelpoil, E., François, H., Fablet, G., Bray, F., Achin, C., Torre, A., Barré, J., 2012. Atlas des stations du massif des Alpes. Technical Report. URL : <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00036588>.
- Marke, T., Strasser, U., Hanzer, F., Stötter, J., Wilcke, R.A.I., Gobiet, A., 2014. Scenarios of future snow conditions in Styria (Austrian Alps). *Journal of Hydrometeorology* 16, 261–277. doi :10.1175/JHM-D-14-0035.1.
- Martin, E., 2015. Deux degrés de plus, deux degrés de trop. *Le Monde Diplomatique* 740, 14–15. URL : <http://www.monde-diplomatique.fr/2015/11/MARTIN/54201>.
- Martin, E., Brun, E., Durand, Y., 1994. Sensitivity of the french alps snow cover to the variation of climatic variables. *Ann. Geophys.* 12, 469–477. doi :10.1007/s00585-994-0469-6.
- Marty, C., 2013. Climate Change and Snow Cover in the European Alps in The Impacts of Skiing and Related Winter Recreational Activities on Mountain Environments. volume 15. Bentham Science. URL : <http://www.eurekaselect.com/107875/chapter/climate-change-and-snow-cover-in-the-european-alp>.
- Morrison, C., Pickering, C., 2012. Perceptions of the ski tourism industry and others to impacts, adaptation and limits to adaption to climate change in the australian alps. *Journal of Sustainable Tourism* 21, 173–191. doi :10.1080/09669582.2012.681789.
- Morrison, C., Pickering, C., 2013. Limits to climate change adaptation : case study of the australian alps. *Geographical Research* 51, 11–25. doi :10.1111/j.1745-5871.2012.00758.x.

- Mossner, M., Innerhofer, G., Schindelwig, K., Kaps, P., Schretter, H., Nachbauer, W., 2013. Measurement of mechanical properties of snow for simulation of skiing. *Journal of Glaciology* 59, 1170–1178. doi :10.3189/2013JoG13J031.
- Neuvonen, M., Sievänen, T., Fronzek, S., Lahtinen, I., Veijalainen, N., Carter, T.R., 2015. Vulnerability of cross-country skiing to climate change in finland—an interactive mapping tool. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism* 11, 64–79. doi :10.1016/j.jort.2015.06.010.
- ODIT, F., 2009. Les chiffres clés du tourisme de montagne en France - 7ème Ed. Technical Report. ODIT France. URL : <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. *J. Appl. Meteor. Climat.* 49, 1096–1113. doi :10.1175/2010JAMC2251.1.
- Olefs, M., Lehning, M., 2010. Textile protection of snow and ice : Measured and simulated effects on the energy and mass balance. *Cold Regions Science and Technology* 62, 126–141. doi :10.1016/j.coldregions.2010.03.011.
- Onwuegbuzie, A.J., Daniel, L., Leech, N.L., 2007. Pearson product-moment correlation coefficient. Neil J. Salkind, & K. Rasmussen (Eds.), *Encyclopedia of Measurement and Statistics* , 751–756doi :10.4135/9781412952644.
- Pascal, R., 1993. Problèmes structurels des stations de moyenne montagne. ministère de l'équipement, des transports et du tourisme, paris. .
- Pickering, C., 2011. Changes in demand for tourism with climate change : a case study of visitation patterns to six ski resorts in australia. *Journal of Sustainable Tourism* 19, 767–781. doi :10.1080/09669582.2010.544741.
- Pons, M., López-Moreno, J.I., Rosas-Casals, M., Jover, È., 2015. The vulnerability of pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack. *Climatic Change* 131, 591–605. doi :10.1007/s10584-015-1400-8.
- Pons-Pons, M., Johnson, P.A., Rosas Casals, M., Sureda Carbonell, B., Jover Comas, E., 2012. Modeling climate change effects on winter ski tourism in andorra doi :10.3354/cr01117.
- Rixen, C., Haeberli, W., Stoeckli, V., 2004. Ground temperatures under ski pistes with artificial and natural snow. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 36, 419–427. doi :10.1657/1523-0430(2004)036[0419:GTUSPW]2.0.CO;2.
- Rixen, C., Stoeckli, V., Huovinen, C., Huovinen, K., 2001. The phenology of four subalpine herbs in relation to snow cover characteristics. *IAHS PUBLICATION* 270, 359–362. URL : [hydrologie.org/redbooks/a270/iahs\\_270\\_359.pdf](http://hydrologie.org/redbooks/a270/iahs_270_359.pdf).
- Rixen, C., Teich, M., Lardelli, C., Gallati, D., Pohl, M., Pütz, M., Bebi, P., 2011. Winter tourism and climate change in the alps : an assessment of resource consumption, snow reliability, and future snowmaking potential. *Mountain Research and Development* 31, 229–236. doi :10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00112.1.

- Rousselot, M., Durand, Y., Giraud, G., Merindol, L., Daniel, L., 2010. Analysis and forecast of extreme new-snow avalanches : a numerical study of the avalanche cycles of february 1999 in france. *J. Glaciol.* 56, 758–770. doi :10.3189/002214310794457308.
- Rousselot, M., Durand, Y., Giraud, G., Mérindol, L., Dombrowski-Etchevers, I., Déqué, M., Castebrunet, H., 2012. Statistical adaptation of ALADIN RCM outputs over the French Alps -application to future climate and snow cover. *The Cryosphere* 6, 785–805. doi :10.5194/tc-6-785-2012.
- Schmidt, P., Steiger, R., Matzarakis, A., 2012. Artificial snowmaking possibilities and climate change based on regional climate modeling in the southern black forest. *Meteorologische Zeitschrift* 21, 167–172. doi :10.1127/0941-2948/2012/0281.
- Scott, D., McBoyle, G., 2007. Climate change adaptation in the ski industry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12, 1411–1431. doi :10.1007/s11027-006-9071-4.
- Scott, D., McBoyle, G., Mills, B., 2003. Climate change and the skiing industry in southern ontario (canada) : exploring the importance of snowmaking as a technical adaptation. *Climate research* 23, 171–181. doi :10.3354/cr023171.
- Spandre, P., François, H., George-Marcelpoil, E., Morin, S., 2016a. Panel based assessment of snow management operations in french ski resorts. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism* doi :10.1016/j.jort.2016.09.002.
- Spandre, P., François, H., Morin, S., George-Marcelpoil, E., 2015. Snowmaking in the french alps. climatic context, existing facilities and outlook. *Journal of Alpine Research— Revue de géographie alpine* doi :10.4000/rga.2913.
- Spandre, P., François, H., Thibert, E., Morin, S., George-Marcelpoil, E., 2016b. Seasonal evolution of a ski slope under natural and artificial snow : detailed observations and modelisation. *The Cryosphere Discussions* doi :10.5194/tc-2016-194.
- Spandre, P., Morin, S., Lafaysse, M., George-Marcelpoil, E., François, H., Lejeune, Y., 2016c. Integration of snow management in a detailed snowpack model. *Cold Regions Science and Technology* doi :10.1016/j.coldregions.2016.01.002.
- Steiger, R., 2010. The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in tyrol, austria. *Climate research* 43, 251. doi :10.3354/cr00941.
- Strasser, U., Vilsmaier, U., Prettenhaler, F., Marke, T., Steiger, R., Damm, A., Hanzer, F., Wilcke, R., Stötter, J., 2014. Coupled component modelling for inter-and transdisciplinary climate change impact research : Dimensions of integration and examples of interface design. *Environmental Modelling & Software* 60, 180–187. doi :10.1016/j.envsoft.2014.06.014.
- Töglhofer, C., Eigner, F., Prettenhaler, F., 2011. Impacts of snow conditions on tourism demand in austrian ski areas. *Climate Research* 46, 1–14. doi :10.3354/cr00939.
- Trawöger, L., 2014. Convinced, ambivalent or annoyed : Tyrolean ski tourism stakeholders and their perceptions of climate change. *Tourism Management* 40, 338–351. doi :10.1016/j.tourman.2013.07.010.
- Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., Kiehl, J., 2009. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90, 311. doi :10.1175/2008BAMS2634.1.

- Vanat, L., 2014. 2014 international report on snow and mountain tourism. URL : <http://www.vanat.ch>. Genève.
- Vanham, D., Fleischhacker, E., Rauch, W., 2009. Impact of snowmaking on alpine water resources management under present and climate change conditions. *Water Science and Technology* 59, 1793–1801. doi :10.2166/wst.2009.211.
- 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* 30, 1627–1644. doi :10.1002/joc.2003.
- Vionnet, V., Brun, E., Morin, S., Boone, A., Martin, E., Faroux, S., Moigne, P.L., Willemet, J.M., 2012. The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2. *Geosci. Model. Dev.* 5, 773–791. doi :10.5194/gmd-5-773-2012.

## Publications

### Avec comité de relecture

- **Spandre P.**, François H., George-Marcelpoil E., Morin S. Investigations on socio economic indicators of French Alps ski industry from an explicit spatial modelling of managed snow on ski slopes, In prep
- **Spandre P.**, François, H., Thibert E., Morin S., George-Marcelpoil, E., 2016. Determination of snowmaking efficiency on a ski slope from observations and modelling of snowmaking events and seasonal snow accumulation. The Cryosphere Discussion, doi :10.5194/tc-2016-194
- **Spandre P.**, François H., George-Marcelpoil E., Morin S., 2016. Panel based assessment of snow management operations in French ski resorts, Journal of Outdoor Recreation and Tourism, doi 10.1016/j.jort.2016.09.002
- 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 socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche et application aux Alpes françaises, La Houille Blanche,4. doi 10.1051/lhb/2016041
- **Spandre P.**, Morin S., Lafaysse M., Lejeune Y., François H., George-Marcelpoil E., 2016. Integration of snow management processes into a detailed snowpack model Cold Regions Science Technology, vol. 125, pages 48–64, doi :10.1016/j.coldregions.2016.01.002
- **Spandre P.**, François H., Morin S., George-Marcelpoil E., 2015. Dynamique de la neige de culture dans les Alpes Françaises : Contexte climatique et état des lieux Journal of Alpine Research — Revue de géographie alpine, doi 10.4000/rga.2913

### Presse, magazines professionnels, entretiens

- Ducros C., **Spandre P.**, Goetz D., 2016. “La neige de culture” Neige et Avalanches, Revue de l'ANENA, November 2016. Article.
- Sandraz R., **Spandre P.**, 2016. “La neige, vraiment éternelle?” K'Info, Revue de Kassböhrer, October 2016. Article.
- Mérindol-Bonniecuelle S., **Spandre P.**, George-Marcelpoil E., 2016. “Observer et modéliser l'enneigement dans les domaines skiables, c'est possible?” Lettres des Pistes de l'ADSP, September 2016. Article.
- Soureillat A., **Spandre P.**, 2016 “Projet de recherche : Analyse et simulation de la gestion de la neige dans les domaines skiables” La Lettre du réseau des acteurs Eau en Montagne, April 2016. Article.
- **Spandre P.**, 2016. “Intégration de la gestion de la neige dans un modèle détaillé de manteau neigeux” Rapport Recherche 2015, CNRM. Report.
- Reju E., Reynaud L., George-Marcelpoil E., **Spandre P.**, 2016. “Les stations accros à la neige de culture” La Croix, February 2016. Article.
- **Spandre P.**, François H., Guerrand A., 2015. “La station de montagne de demain” France 2, TV news “Télématin”, December 2015. Interview.
- Claude C., **Spandre P.**, Guerrand, A., Carmagnola C., 2015. “Gestion du capital neige. Quand la recherche exporte ses conclusions sur le terrain” DSF Magazine, 39, pp 11-13, July 2015. Article.
- Perretier C., **Spandre P.**, 2015. “Gestion de la neige et préparation des pistes : bilan et perspectives” Montagne Leader, 249, pp. 34-35, May - June 2015. Article.

- **Spandre P.**, Morin S., George-Marcelpoil E., Lafaysse M., Lejeune Y., François H., 2014 “Integrating snow management processes and practices into a detailed snowpack model. Relevance, applications and prospects” Proceedings of the International Snow Science Workshop, October 2014, Banff, Canada.

## Conférences internationales

- International Snow Science Workshop, October 2014, Banff, Canada
  - **Spandre P.**, Morin S., George-Marcelpoil E., Lafaysse M., Lejeune Y., François H., 2014. Integrating snow management processes and practices into a detailed snowpack model. Relevance, applications and prospects. Poster at the ISSW 2014, Banff, Canada.
  - Vernay M., Lafaysse M., Mérindol L., Giraud G., Morin S., **Spandre P.**, 2014. Ensemble prediction of avalanche hazard. Talk of the ISSW 2014, Banff, Canada.
- European Geosciences Union general assembly, April 2016, Vienna, Austria
  - **Spandre P.**, François H., Thibert E., Morin S., George-Marcelpoil E. - Assessing the efficiency of machine made snow production using observations in ski resorts. EGU 2016 Presenting Interactive Content (PICO)
  - **Spandre P.**, François H., George-Marcelpoil E., Morin S. - Snow management practices in French ski resorts. EGU 2016 Presenting Interactive Content (PICO)
  - **Spandre P.**, Morin S., Lafaysse M., Lejeune Y., George-Marcelpoil E., François H. - Integration of snow management processes and practices into a detailed snowpack model. EGU 2016 Presenting Interactive Content (PICO)
  - François H., **Spandre P.**, Morin S., George-Marcelpoil E., Lafaysse M. - Crossing physical simulations of snow conditions and a spatial model of ski areas to assess ski resort vulnerability. EGU 2016 Presenting Interactive Content (PICO)

## Séminaires

- **Spandre P.**, 2016. “Observation et modélisation des conditions d’enneigement dans les domaines skiables” Université des Alpes, Megève, September 2016. Présentation.
- **Spandre P.**, Morin S., George-Marcelpoil E., Lafaysse M., François H., 2016. “Observation et modélisation des conditions d’enneigement dans les domaines skiables” Journées R&D Météo-France, Toulouse, June 2016. Présentation.
- **Spandre P.**, François H., Morin S., George-Marcelpoil E., “Observation et modélisation de l’organisation structurelle et des impacts physiques de la gestion de la neige dans les domaines skiables français” Conseil Scientifique du Parc National de la Vanoise, Val Thorens, June 2016. Présentation.
- **Spandre P.**, François H., Thibert E., Morin S., George-Marcelpoil E., 2016. “Seasonal evolution of a ski slope snowpack and evaluation of water losses during snow production using spatial observations and modelisation.” Snow Workshop (Atelier Neige) of the Observatoire des Sciences de l’Univers de Grenoble (OSUG), Grenoble, May 2016. Présentation.
- Lejeune M., **Spandre P.**, May 2016. “Observation et modélisation de la température de sol sous couvert neigeux : impact du damage et des évolutions du schéma de sol ISBA-DIF. Snow Workshop (Atelier Neige) of the Observatoire des Sciences de l’Univers de Grenoble (OSUG), Grenoble, May 2016. Présentation.
- **Spandre P.**, Lafaysse M., Morin S., 2015. “Comment la filière du nordique s’adapte-t-elle au

- changement climatique ?”, 4<sup>èmes</sup> Rencontres Nationales du Nordique, Chamonix, November 2015. Présentation.
- **Spandre P.**, Morin S., George-Marcelpoil E., Lafaysse M., François H., 2015. “Quelles pratiques de gestion de la neige dans les stations françaises de sport d’hiver?” ‘Annual meeting of the Association nationale des Directeurs de Services des Pistes (ADSP), October 2015, Biarritz, France. Présentation.
  - **Spandre P.**, Verfaillie D., Morin S., 2015. “L’avenir du tourisme lié à la neige” Journée de formation “Autour de deux degrés” - Rectorat COP21 / Université Grenoble Alpes, Grenoble, October 2015. Présentation.
  - **Spandre P.**, Morin S., George-Marcelpoil E., Lafaysse M., François H., 2015. “Analyse et simulation de la gestion de la neige dans les stations de sport d’hiver” Workshop of the Communauté de Recherche Académique Rhône-Alpes (ARC), Lyon, September 2015. Présentation.
  - **Spandre P.**, François H., Verfaillie D., Carmagnola C., 2015. “Pourra-t-on skier dans les Alpes en 2100 ?” Journée de l’Observatoire des Sciences de l’Univers de Grenoble (OSUG), Grenoble, May 2015. Présentation.
  - François H., **Spandre P.**, Morin S., Lafaysse M., George-Marcelpoil E., 2015. “Croisement de simulations numériques des conditions d’enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d’hiver : Approche et application aux Alpes françaises” Journée de la Société Hydrologique de France (SHF), March 2015. Présentation.
  - **Spandre P.**, George-Marcelpoil E., 2014. “Gestion de la neige et préparation des pistes : bilan et perspectives” Annual meeting of the Association nationale des Directeurs de Services des Pistes (ADSP), October 2014, Montpellier, France. Présentation.

## Prix

- **Spandre P.**, “Analyse et simulation de la gestion de la neige dans les stations de sport d’hiver”, Fondation Eau, Neige et Glace, February 2014. <http://www.fondation-eng.org/laureats.php?lg=fr> (8 September 2016)

