

# Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche, application aux Alpes françaises et introduction de la prise en compte des pratiques de gestion (damage et neige de culture)

H. FRANÇOIS<sup>1</sup>, S. MORIN<sup>2</sup>, P. SPANDRE<sup>1,2</sup>, M. LAFAYASSE<sup>2</sup>, Y. LEJEUNE<sup>2</sup>, E. GEORGE-MARCELPOIL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irstea, UR DTM, Grenoble, France - e-mail : hugues.francois@irstea.fr

<sup>2</sup> Météo-France – CNRS, CNRM-GAME UMR 3589, Centre d'Etudes de la Neige, Grenoble, France - e-mail : samuel.morin@meteo.fr

**RÉSUMÉ.** – La neige au sol est une ressource essentielle pour le tourisme hivernal dans les régions montagneuses et en particulier pour les sports d'hiver. Les stations de ski sont d'ores et déjà sensibles à la variabilité des conditions météorologiques actuelles et sont menacées par le changement climatique sur le plus long terme. Nous présentons ici une approche dans laquelle les résultats détaillés de simulations du manteau neigeux ont été croisés avec une base de données socio-économiques, spatialisée à l'échelle des stations et qui contient des informations sur 142 stations de ski réparties dans l'ensemble des Alpes françaises. Cette approche permet de prendre en compte de façon explicite les caractéristiques géographiques, topographiques (altitude, pente et aspect) et d'organisation spatiale (répartition des remontées mécaniques et structuration du domaine skiable) des stations étudiées. Un indice de la viabilité des stations a été élaboré à partir des informations ci-dessus et des conditions d'enneigement naturel simulées de 2000 à 2012. Les résultats ont été comparés à des informations économiques (nombre de journées-skieur), mettant en lumière une relation complexe entre fonctionnement des stations de ski et conditions d'enneigement naturel. La méthode exposée dans cette étude présente un fort potentiel pour des analyses articulant des critères physiques et socio-économiques pertinents du fonctionnement de l'économie touristique hivernale ainsi que des projections dans l'avenir en fonction du changement climatique. L'intégration explicite des pratiques de gestion de la neige (neige de culture et damage) dans le modèle de manteau neigeux utilisé est requise pour améliorer l'adéquation avec la réalité, donc la pertinence, des résultats obtenus, ainsi que le montrent des résultats préliminaires de telles simulations.

Mots-clés : stations de sports d'hiver, climat, neige, Alpes

## Crossing numerical simulations of snow conditions with a spatially-resolved socio-economic database of ski resorts: a proof of concept with and without accounting for snow management practices in the French Alps

**ABSTRACT.** – Snow on the ground is a critical resource for winter tourism in mountain regions and in particular ski tourism. Ski resorts are significantly vulnerable to the variability of meteorological conditions already at present and threatened by climate change in the longer term. Here we introduce an approach where detailed snowpack simulation results were crossed with a resort-level geographical and socio-economic database containing information from about 142 ski resorts spanning the entire French Alps domain. This allows to take into account explicitly the geographical, topographical (altitude, slope and aspect) and spatial organisation (distribution of ski lifts and slopes) features of the ski resorts considered. A natural snow resorts viability index was built using all the above information and simulated natural snow conditions from 2000 to 2012. Results were compared to economically relevant information (skier days values) highlighting a complex relationship between ski resort operations and natural snow conditions. We provide preliminary results obtained when snow management practices (grooming and snowmaking) are implemented in the snowpack model used, which show promising prospects allowing in the future a finer analysis of the interactions between ski resorts operations and meteorological and climate conditions.

Key-words: ski resorts, climate, French Alps, snow

## I. INTRODUCTION

La neige au sol est une ressource essentielle pour le tourisme hivernal dans les régions montagneuses et en particulier pour les sports d'hiver. Ce secteur a continuellement réalisé des investissements lourds pour conserver ou améliorer sa compétitivité [Abegg, 1996, Abegg *et al.*, 2007,

Elsasser et Bürki, 2002, Koenig et Abegg, 1997] et contrer l'impact de la variabilité interannuelle des conditions météorologiques [Beniston *et al.*, 1997, Durand *et al.*, 2009a]. Ceci concerne en particulier les installations de production de neige, l'amélioration de la conception des pistes et les pratiques de damage [Guily, 1991, Fauve *et al.*, 2008, Steiger et Mayer, 2008]. Les projections climatiques indiquent une

augmentation sensible de la température et une réduction des apports naturels en neige dans les Alpes européennes [par ex. Steiger *et al.*, 2013, Gobiet *et al.*, 2014] et en particulier les Alpes françaises [Martin *et al.*, 1994, Rousselot *et al.*, 2012, Lafaysse *et al.*, 2014], ce qui peut constituer des conditions critiques pour ce secteur économique. Il est donc nécessaire d'analyser finement les liens entre conditions météorologiques, conditions d'enneigement et fonctionnement socio-économique du secteur des sports d'hiver.

En France, la construction de stations de montagne a été fortement soutenue par la planification de l'aménagement de l'Etat central [George-Marcelpoil et François, 2012]. Aujourd'hui, l'avenir des stations de sports d'hiver met en jeu l'économie de tout un ensemble de territoires. Ce contexte a amené les décideurs publics à adopter, dès les années 1990, un cadre contractuel visant à aider les stations à surmonter les difficultés liées aux risques économiques induits par la variabilité météorologique. Contrairement à l'Amérique du Nord, où l'offre touristique est généralement fournie par une seule entreprise dans une station donnée, les stations françaises fonctionnent avec diverses parties prenantes (entreprises de remontées mécaniques, gestionnaires de pistes de ski, hôtels, restaurants, etc.) [Flagestad et Hope, 2001, Gerbaux et Marcelpoil, 2006]. L'aide publique aux stations de sports d'hiver françaises a longtemps reposé sur l'hypothèse que la résilience des stations peut être améliorée par une meilleure organisation de l'offre touristique et de sa gouvernance au niveau de la collectivité [Gerbaux, 2004, Gerbaux et Marcelpoil, 2006, Svensson *et al.*, 2005]. Afin de réduire la dépendance à une activité fondée uniquement sur la neige, la diversification a été privilégiée au détriment des installations de production de neige dont le développement n'a pas pleinement profité du soutien des pouvoirs publics [Achin 2013, François, 2007]. D'un point de vue social, cette démarche contribue directement à la flexibilité de l'offre touristique locale, améliore sa résilience [Luthe *et al.*, 2008, 2012] et augmente sa capacité à dépasser les difficultés induites par les conditions météorologiques. Ces politiques publiques ont plus particulièrement ciblé les stations de moyenne montagne. Face à de nombreux inconvénients tels que leur petite taille et la moindre présence de neige par rapport aux stations de haute altitude (c'est-à-dire celles dont le bas du domaine skiable est situé à une altitude supérieure à environ 1 500 m), la démarche de diversification vise à contourner l'impact du changement climatique. Toutefois, les activités fondées sur la neige dans ces stations continuent à jouer un rôle essentiel dans l'économie locale. De ce fait, l'écart se creuse entre les stations de haute altitude et celles de moyenne montagne : d'une part, la neige reste la principale ressource et justifie des investissements en équipements pour la production de neige dans les grandes stations, alors que d'autre part, les stations de moyenne montagne doivent composer avec des difficultés chroniques liées à l'enneigement, particulièrement mises en avant depuis la fin des années 1980 [Lorit, 1991, Pascal, 1993], sans aide publique à la mise en œuvre des moyens techniques pour les contourner. Pour analyser l'aspect socio-économique de l'économie touristique hivernale, il est nécessaire de prendre explicitement en compte l'altitude, la taille, les caractéristiques organisationnelles des stations de sports d'hiver, ce qui n'a été tenté jusqu'à maintenant que pour un nombre limité d'études de cas [voir par ex. Damm *et al.*, 2014].

La viabilité des stations de sports d'hiver est le plus souvent évaluée avec la règle dite « des 100 jours », posant comme principe qu'une station est viable si une épaisseur de neige d'au moins 30 cm est présente pendant au moins

100 jours [Abegg *et al.*, 2007]. Il a été suggéré d'affiner cette règle en tenant compte de certaines caractéristiques structurelles pour le fonctionnement des installations de stations, en particulier l'organisation du domaine skiable (en prenant en compte les secteurs de basse et haute altitudes) et les périodes de vacances, mais aussi en ajoutant un niveau de complexité à la règle des 100 jours dans une perspective pluriannuelle [Abegg, 1996, Steiger, 2010]. Dans le dernier cas, une station est considérée comme viable si elle satisfait la règle des 100 jours pendant au moins 7 saisons sur 10.

Bien que la règle des 100 jours ait été établie sur la base de mesures d'épaisseur en neige naturelle, la caractérisation de l'enneigement en station devrait prendre en compte la quantité de neige réellement présente sur les pistes. En effet, les pratiques de gestion de la neige, comme le damage et la production de neige, ainsi que l'érosion induite par les skieurs, exercent une forte influence sur les propriétés du manteau neigeux sur les pistes de ski par rapport aux zones voisines enneigées naturellement [Guily, 1991, Fauve *et al.*, 2008]. Toutefois, de nombreuses études appliquent la règle des 100 jours et elle peut être considérée comme une échelle de référence pour évaluer la viabilité des stations. Dans ce cadre, les simulations numériques permettent d'étendre la couverture spatiale étudiée et ouvrent la voie à des rétro-analyses sur le long terme. Différentes études ont tenté d'estimer la viabilité des stations de ski sur la base de simulations numériques de l'épaisseur de neige naturelle. Par exemple, dans les Alpes françaises, Durand *et al.* [2009b] ont effectué une ré-analyse sur le long terme des conditions météorologiques et d'enneigement naturel simulées de 1958 à 2006 en calculant l'épaisseur moyenne minimale de neige que l'on trouve pendant 100 jours durant chaque saison touristique, permettant ainsi de repérer les zones d'altitude satisfaisant à la règle des 100 jours.

D'autres démarches de modélisation tentent de prendre en compte les réponses techniques au manque de neige. Scott *et al.* [2003] ont élaboré un modèle intégrant l'enneigement artificiel pour évaluer la présence de neige en tenant compte de contraintes de la production de neige. La partie physique de ce modèle est un modèle de manteau neigeux simplifié, estimant la couverture neigeuse à partir de données météorologiques régionales et calculant le bilan entre chute de neige et fonte, cette dernière étant estimée au moyen d'une approche degré-jour. Ce modèle a été progressivement amélioré pour une approche plus fine de l'enneigement artificiel, mais la simulation des processus internes au manteau neigeux est restée relativement simple. Une combinaison de la règle des 100 jours et des résultats de la modélisation a été utilisée par Steiger et Meyer [2008] et Steiger [2010] pour évaluer l'avenir des stations de sports d'hiver au regard de leurs caractéristiques et suivant différents scénarios de changement climatique. Ces études reposent partiellement sur des travaux antérieurs réalisés par Scott *et al.* [2003] et Scott et McBoyle [2007]. Étant donné que les conditions d'enneigement dépendent pour beaucoup des caractéristiques géographiques régionales (conditions météorologiques à grande échelle) et locales (plage d'altitude, orientation, pente) des stations de sports d'hiver et des pistes de ski, la prise en compte explicite de ces facteurs est un progrès significatif pour les études de modélisation de la neige appliquées à leur viabilité.

Nous présentons ici une démarche dans laquelle la chaîne de modélisation SAFRAN-Crocus pour les simulations numériques de neige au sol [Durand *et al.*, 1999, Vionnet *et al.*, 2012] a été utilisée conjointement à la base de données « BD stations », base de données socio-économiques

spatialisée à l'échelle de la station pour 142 stations de sports d'hiver dans les Alpes françaises [François *et al.*, 2012 ; voir <http://www.observatoire-stations.fr>]. Les simulations numériques réalisées sur une large plage d'altitudes, de pentes et d'orientations ont été associées aux caractéristiques géographiques des pistes de ski dans 130 stations de sports d'hiver des Alpes françaises par croisement d'informations spatiales. La méthode testée de 2000 à 2012, montre l'important potentiel du croisement des modélisations météorologiques et du manteau neigeux avec des informations socio-économiques pour évaluer le lien entre conditions d'enneigement et résultats économiques des stations de montagne, bien que seules les conditions d'enneigement naturel soient envisagées dans notre analyse à l'échelle des Alpes. En complément, nous présentons les résultats de l'extension de cette méthode à la prise en compte explicite de la gestion de la neige au sein du modèle Crocus (notamment la production de neige et le damage) qui permettent d'augmenter le réalisme des simulations et rendront possibles à l'avenir de meilleures projections de l'impact du changement climatique sur les conditions d'enneigement dans les stations.

Cet article reprend une grande partie des éléments publiés par François *et al.* [2014] qu'il complète en intégrant une information géographique plus proche des réalités de terrain pour représenter les domaines skiables ainsi que des prolongements du modèle d'enneigement utilisé pour y intégrer les pratiques de gestion de la neige [Spandre *et al.*, 2016]. Ces nouveaux développements, toujours en cours sont présentés et mis en œuvre en dernière partie de cet article

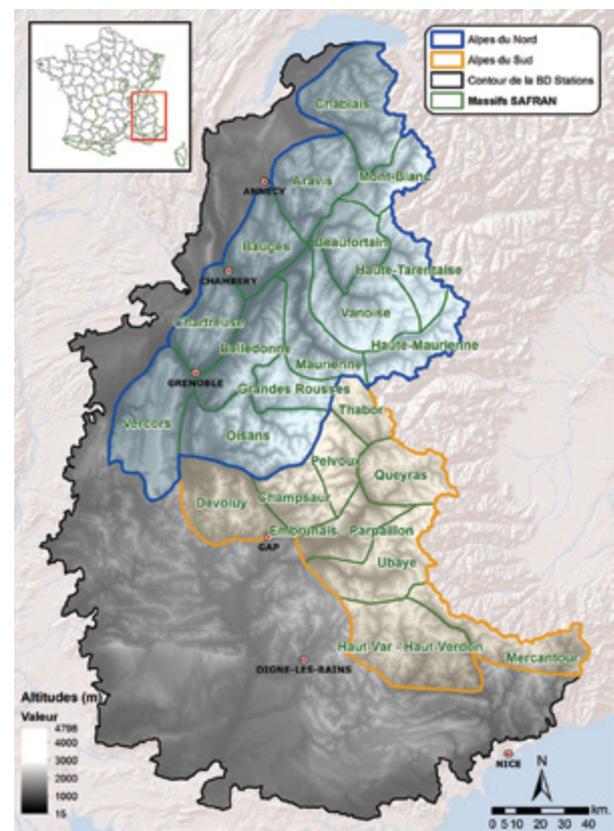
## II. MÉTHODOLOGIE : INTÉGRATION DE LA BD STATIONS ET DU MODÈLE CROCUS

### II.1. Simulation numérique des conditions d'enneigement naturel

Cette étude combine le système de descente d'échelle météorologique SAFRAN [Durand *et al.*, 1993, 1999, 2009a, 2009b] et le modèle de manteau neigeux détaillé Crocus [Brun *et al.*, 1992, Vionnet *et al.*, 2012]. En mode d'analyse, lorsque des observations de surface et atmosphériques sont disponibles pour une date donnée, SAFRAN réalise une fusion optimale de résultats de modèle de prévision numérique du temps (champs atmosphériques de grande échelle incluant le profil vertical des variables atmosphériques), des observations de surface (notamment les précipitations dans les régions montagneuses), des observations de radiosondes atmosphériques et des informations de télédétection de la couverture nuageuse. Les observations de surface sont de plusieurs natures. Quelques stations de mesure météorologique automatisées (réseau Nivôse) se trouvent dans les régions montagneuses de haute altitude et mesurent la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et l'épaisseur de neige. En outre, des observations météorologiques manuelles, incluant les quantités quotidiennes de précipitations, la température minimum/maximum quotidienne et les mesures de neige fraîche grâce à une planche à neige, sont réalisées essentiellement dans les stations de sports d'hiver pendant leur période d'ouverture dans le cadre du réseau d'observation nivo-météorologique. SAFRAN est capable de combiner ces différentes sources d'informations pour fournir l'évolution au pas de temps horaire des données météorologiques nécessaires pour alimenter le modèle détaillé de manteau neigeux Crocus. Ces données dépendent de l'altitude

(par pas de 300 m) dans des zones géographiques, appelées massifs, qui ont été choisies pour leur homogénéité climatologique et qui sont supposées être également homogènes sur le plan météorologique. Dans la pratique, cela veut dire que deux endroits situés à la même altitude dans le même massif sont supposés rencontrer les mêmes conditions météorologiques. La figure 1 montre une carte des 23 massifs SAFRAN définis pour les Alpes françaises, dont l'étendue moyenne est d'environ 900 km<sup>2</sup>. Cette carte montre que certaines stations se situent en dehors des régions couvertes par les massifs SAFRAN, de telle sorte que seules 130 stations sur 142 sont concernées par le croisement d'informations développé ci-dessous. Toutefois, notre échantillonnage inclut les stations de sports d'hiver les plus significatives dans les Alpes françaises.

Le modèle détaillé d'enneigement Crocus résout le bilan de masse et d'énergie du manteau neigeux et inclut une représentation explicite du métamorphisme de la neige, de son tassement, ainsi que de la diffusion thermique et de la percolation de l'eau liquide, lesquelles sont toutes deux liées aux processus de changement de phase (gel/dégel). À sa limite inférieure, Crocus est couplé à la composante terrestre du modèle de surface ISBA. Tous les détails concernant Crocus, couplé à ISBA dans la plateforme de modélisation SURFEX, se trouvent dans Vionnet *et al.* [2012]. Pour chaque massif et chaque tranche d'altitude, les simulations Crocus peuvent être réalisées à l'aide des données d'analyse météorologique SAFRAN pour diverses



**Figure 1 :** Cartes des Alpes française et des massifs SAFRAN (délimités en vert) selon deux catégories Nord (contour en bleu) et Sud (contour orange). Le fond relief grisé correspond à l'étendue de la BD Stations dont une part n'est pas couverte par les massifs SAFRAN.

pentés et orientations, pour lesquels les flux de rayonnement solaire direct entrant sont modifiés en conséquence. Dans notre étude, les simulations SAFRAN-Crocus ont été réalisées pour l'ensemble du domaine des Alpes françaises, couvrant 23 massifs SAFRAN, par pas de tranches d'altitude de 300 m (la plage des altitudes est différente pour chaque massif), et pour chacun d'eux, les simulations réalisées par le modèle Crocus ont été effectuées sur terrain plat et dans 8 orientations (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO) pour des pentes de 10°, 20°, 30°, 40° et 50°. Cela représente un total de 7 667 configurations géographiques et topographiques idéalisées pour lesquelles les résultats du modèle sont disponibles. Cette étude n'utilise que l'épaisseur de neige simulée, bien que le résultat du modèle contienne beaucoup plus d'informations (équivalent en eau de la neige, température en surface, profil vertical des propriétés physiques de la neige et notamment température, densité, variables de microstructure, contenu en eau liquide, etc. ; Vionnet *et al.*, 2012]. La chaîne de modèle SAFRAN-Crocus sert de façon opérationnelle dans l'évaluation des risques d'avalanche et est de plus en plus utilisée pour d'autres applications comme l'hydrologie nivale, le bilan de masse des glaciers, la climatologie de la neige et les projections de l'impact du changement climatique dans les régions montagneuses [Vionnet *et al.*, 2012 ; voir <http://www.cnrn-game.fr/spip.php?article268&lang=fr> pour un aperçu de l'utilisation connue du modèle à des fins de recherche]. Dans cette étude, nous considérons que les résultats de SAFRAN-Crocus sont représentatifs des conditions d'enneigement naturel rencontrées dans les Alpes françaises pour la période de 2000 à 2012. En effet, une évaluation récente de la performance de la chaîne de modèle SAFRAN-Crocus en termes d'épaisseur de neige a été réalisée en utilisant les observations de 83 stations de surveillance quotidienne et hebdomadaire de la neige dans les Alpes françaises, sur une période de 32 ans (1980-2012). Il a été constaté que l'écart moyen était de 4 cm et 0 cm pour les stations d'observation, respectivement quotidienne et hebdomadaire, et que l'écart-type était respectivement de 26 et 43 cm [Lafaysse *et al.*, 2013]. Ces valeurs, représentatives de la performance du système combiné SAFRAN et Crocus comparée à des mesures in situ de l'épaisseur de neige, correspondent au niveau type de performance des modèles de manteau neigeux ponctuels résultant de conditions météorologiques in situ [par ex. Essery *et al.*, 2013] et indiquent que l'utilisation des résultats de SAFRAN-Crocus convient à cette étude.

## II.2. Représentation spatiale des pistes de ski et répartition du débit des remontées mécaniques dans les stations de ski

Pour une analyse intégrée des conditions socio-économiques et d'enneigement pour un ensemble de stations de sports d'hiver, il est essentiel d'agrèger les résultats physiques et socio-économiques au niveau de chaque station. Cela nécessite de pondérer chaque piste de ski au sein de chacune des stations, en tenant compte de la géographie des remontées mécaniques et des caractéristiques topographiques du terrain (influence combinée de l'orientation, de la pente et de l'altitude). Précédemment, Steiger [2010] a considéré les domaines skiables selon deux zones inférieure et supérieure, en donnant plus de poids à la zone supérieure dans l'analyse de viabilité. Pour pouvoir évaluer pleinement le fonctionnement d'une station de ski, c'est-à-dire pour pouvoir combiner conditions d'enneigement, caractéristiques topographiques et caractéristiques des remontées mécaniques, il faudrait une connaissance exhaustive et fine de l'organisation spatiale des remontées mécaniques et des pistes de ski dans chaque station.

La base de données BD Stations contient certaines des informations spatiales requises et des données attributaires relatives aux stations de sports d'hiver [François *et al.*, 2012]. Les données géographiques pour les pistes ne sont disponibles que pour un petit nombre de stations (par ex. le projet OpenStreetMap, voir ci-dessous). En outre, le niveau de précision trop faible (pistes linéaires plutôt que surfaciques) ne serait pas cohérent avec l'ensemble des données utilisées dans notre travail. En termes de remontées mécaniques, mise à part leur localisation sur la carte au 1:25 000 de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière), les informations quantitatives à notre disposition sont celles du Catalogue Informatisé des Remontées mécaniques Nationales (CAIRN, fourni par le Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés - STRMTG) pour chaque appareil : altitudes basse et haute, moment de puissance (produit du dénivelé et du débit théorique, exprimé en personnes km h<sup>-1</sup>). Les données agrégées du moment de puissance des remontées mécaniques pour chaque station permettent de les classer en quatre types de stations (typologie inspirée de celle de DSF, Domaines Skiables de France), petites (S), moyennes (M), grandes (L) et très grandes (XL), respectivement moins de 2500 personnes km h<sup>-1</sup>, entre 2500 et 5000 personnes km h<sup>-1</sup>, entre 5000 et 15000 personnes km h<sup>-1</sup> et au-dessus de 15000 personnes km h<sup>-1</sup>. La figure 2 montre

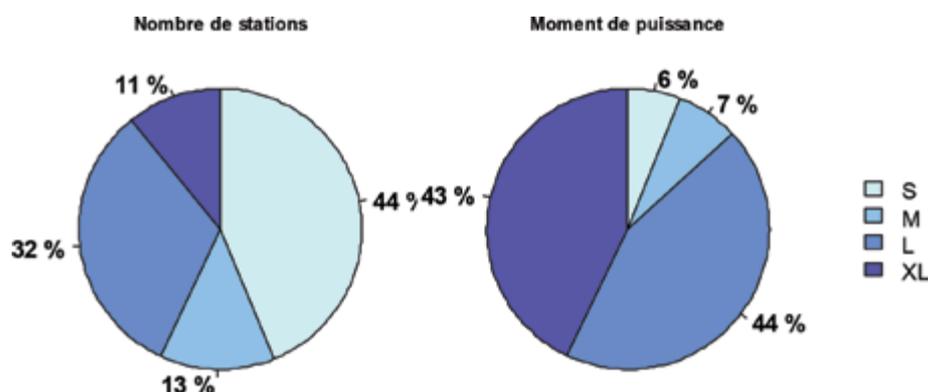


Figure 2 : Distribution des types de stations (S, M, L et XL) en nombre de stations (à gauche) et de moment de puissance (à droite) dans les Alpes françaises.

la répartition en termes de nombre de stations et de moment de puissance des 130 stations examinées dans cette étude. Alors que les stations L et XL ne représentent que 43 % du nombre total de stations, elles contribuent à hauteur de 86 % du moment de puissance total des remontées mécaniques. En revanche, les stations S et M représentent plus de la moitié des stations mais ne contribuent qu'à hauteur de 14 % du débit total des remontées mécaniques.

Notre analyse géographique de l'organisation spatiale des stations de ski repose sur le modèle numérique de terrain (MNT) de la BD Topo de l'IGN qui décrit l'élévation de terrain avec un pas de 25 m, sur la carte IGN des remontées mécaniques, et sur les données CAIRN (noter que ces deux dernières bases ne proposent pas de critère de jointure explicite et direct).

### II.2.1. Évaluation géographique de pistes de ski potentielles

Sur la base de l'information spatiale des remontées mécaniques, nous pouvons déterminer un domaine skiable potentiel, composé de l'ensemble des points accessibles par gravité depuis le haut des remontées mécaniques et qui permet de rejoindre le bas d'une remontée mécanique de la station considérée, dit enveloppe gravitaire. Pour ce faire, nous complétons l'information sur des linéaires de remontées mécaniques par le Modèle Numérique de Terrain (MNT) à une résolution de 25 m également fourni par la BD TOPO. Après avoir déterminé par le croisement de ces deux informations les points haut et bas de chaque linéaire, ainsi que les pixels du MNT correspondants, nous sélectionnons les pixels suivants par itérations successives en deux temps correspondant à la descente depuis le haut du domaine et à la remontée depuis le bas (c'est-à-dire l'ensemble des pixels depuis lesquels il est possible de rejoindre le pied d'au moins une remontée mécanique).

Pour chacune de ces deux opérations, nous considérons les 8 pixels voisins de ceux sélectionnés et les points de départ

de la sélection (haut ou bas) sont traités simultanément. Les critères de sélection diffèrent légèrement en fonction de son point de départ. Du haut vers le bas, nous n'avons sélectionné que les points dont l'altitude était strictement inférieure à la valeur du pixel considéré. En revanche, en partant du bas, nous avons considéré qu'un terrain plat, soit deux pixels voisins présentant des valeurs égales, était acceptable pour rejoindre le bas d'un appareil (ce type de situation correspondant plus particulièrement aux configurations de type grenouillère, point de départ pour un ensemble de remontées mécaniques). En complément, les pixels présentant une trop forte pente (supérieure à 60°) sont exclus de la sélection. Ainsi, cette méthode ne préjuge pas des choix des aménageurs quant au tracé des pistes au regard de critères d'enseoillement, de profilage, de leur environnement naturel, ou autre mais représente plutôt le potentiel exploitable en fonction des facteurs topographiques. Le tableau 1 permet de constater la cohérence de cette information avec celle recueillie auprès de 44 stations (correspondant à 53% du moment de puissance total des stations alpines) par Spandre *et al.* [2015]. Bien que présentant une variabilité importante, les valeurs moyennes des surfaces des enveloppes gravitaires et des surfaces de pistes déclarées présentent une évolution similaire en fonction du type de station. La surface de piste déclarée correspond à environ 10% de la surface de l'enveloppe gravitaire. La part de l'enveloppe occupée par les pistes permet également de constater le profil atypique des stations S. Avec peu d'équipements, elles franchissent le seuil d'ouverture d'un espace minimum au ski au-delà duquel l'accroissement du parc de remontées mécaniques a un effet sur le confort et la fluidité des flux de skieurs, mais un impact marginal sur l'espace accessible. Le domaine ainsi ouvert se révèle relativement important par rapport aux remontées mécaniques installées, mais, dans l'absolu, sa petite taille impliquerait un niveau d'aménagement important pour offrir une diversité et une quantité de pistes suffisantes pour être compétitif.

**Tableau 1** : Domaines gravitaires et surfaces de pistes par moment de puissance des stations alpines.

		Petites Stations (S)	Stations Moyennes (M)	Grandes Stations (L)	Très Grandes Stations (XL)
BD Stations (Alpes entières)	$\frac{\text{Surface}_{\text{DG Alpes}}}{\text{MP}_{\text{Alpes}}}$	0,42	0,21	0,21	0,16
	Ecart-type	0,40	0,09	0,09	0,07
Echantillon Enquête	$\frac{\text{Surface}_{\text{Pistes}}}{\text{MP}}$	0,061	0,023	0,020	0,017
	Ecart-type	0,039	0,006	0,007	0,005
Croisement enquête / BD Stations	$\frac{\text{Surface}_{\text{Pistes}}}{\text{Surface}_{\text{DG Alpes}}}$	0,13	0,09	0,10	0,12
	Ecart-type	0,03	0,04	0,04	0,06

$\frac{\text{Surface}_{\text{DG Alpes}}}{\text{MP}_{\text{Alpes}}}$  représente le rapport entre l'enveloppe gravitaire des stations alpines et leur moment de puissance pour chaque catégorie, en ha (km pers h<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>.

$\frac{\text{Surface}_{\text{Pistes}}}{\text{MP}}$  représente le rapport entre la surface de piste déclarée et le moment de puissance pour les stations de l'enquête pour chaque catégorie, en ha (km pers h<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>.

Cette méthode présente l'avantage d'être cohérente avec les données du MNT et de ses dérivés (pentes et orientations) mobilisés pour intégrer les résultats de SAFRAN-Crocus. Néanmoins, la résolution de 25 m présente tout de même deux principaux biais par rapport à la réalité de la pratique du ski. Le manque de précision peut avoir des effets contrastés dans le cas de fortes pentes selon qu'un accident de terrain bloquant pour la progression d'un skieur n'apparaisse pas ou, au contraire, qu'un itinéraire étroit mais praticable ne soit pas sélectionné dans un relief très découpé. Dans le cas des pentes les plus faibles, par exemple en bas d'une piste verte, l'altitude du pixel voisin peut être supérieure à celle du pixel considéré alors qu'un passage en légère descente est tout de même possible.

### II.2.2. Répartition du moment de puissance des remontées mécaniques

Après la construction des enveloppes gravitaires, l'étape suivante consiste à intégrer les données attributaires des remontées mécaniques et plus particulièrement leur moment de puissance. Avec le CAIRN, les seules informations dont nous disposons pour décrire la répartition spatiale des remontées mécaniques, sont les données altitudinales qui ont été utilisées pour ventiler le moment de puissance de chaque station au regard du découpage par tranche de 300 m conformes aux résultats de la modélisation SAFRAN-Crocus représentant la couverture neigeuse à +/- 150 m d'un niveau d'altitude donné (par exemple, l'altitude 1200 m correspond à une simulation du manteau neigeux entre 1050 et 1350 m). Pour cela, nous avons

considéré les remontées mécaniques comme des lignes verticales croisant les différentes tranches d'altitude par pas de 300 m. Ainsi, une remontée mécanique située entre 900 m et 1500 m voit 25 % de son moment de puissance attribué à la tranche de 900 m (750-1050 m), 50 % attribué à la tranche de 1200 m et les 25 % restant attribué à 1500 m (1350-1650 m). Ainsi, nous simplifions la réalité en ne tenant pas compte des variations de pente dans le parcours des remontées mécaniques, mais nous considérons que cet effet sera négligeable par rapport aux autres hypothèses faites dans notre étude. Enfin, chaque tranche d'altitude se voit attribuer la somme du moment de puissance des remontées mécaniques qui la traversent.

Cette première étape permet donc de répartir le moment de puissance des remontées mécaniques entre les tranches d'altitude dans chacune des stations. Après quoi, le lien avec les localisations SAFRAN-Crocus est établi par des traitements successifs du MNT illustrés par la figure 3, montrant en complément la correspondance entre les contours des enveloppes gravitaires et les pistes issues de la base OpenStreetMap. Tout d'abord, le MNT est reclassé en fonction des seuils d'altitude de SAFRAN-Crocus. Au sein de chaque tranche d'altitude, une part du moment de puissance total de la station est attribuée à chaque pixel au regard du moment de puissance dans la plage d'altitude considérée et du nombre de pixels qui la compose. Ensuite, l'opération de reclassement est effectuée pour chaque pixel en fonction de leur pente (moins de 5° pour le plat, entre 5° et 15° pour 10°, etc.), orientation (entre 337,5° et 22,5°, orientation N, entre 22,5° et 67,5°, NE, etc.) et appartenance à un massif SAFRAN. Le tableau 2 présente une liste de toutes les

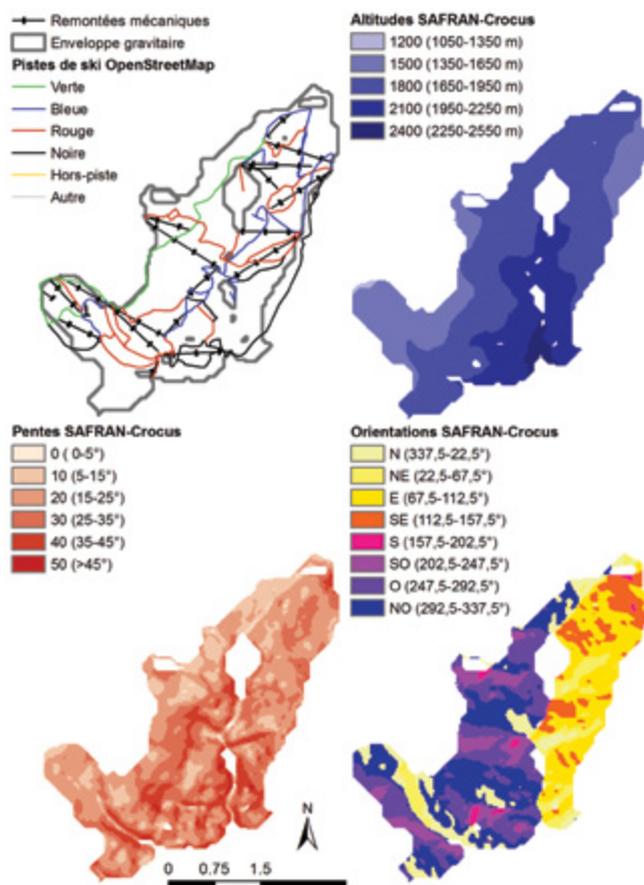


Figure 3 : Comparaison de l'enveloppe gravitaire d'une station (ici les Sept-Laux, proche de Grenoble) et des pistes de ski d'OpenStreetMap et appariement avec les données SAFRAN-Crocus (pentes, altitudes et orientations).

Tableau 2 : Liste et équipements des stations étudiées.

Station	Taille	Massif	Altitude min (m)	Altitude max (m)	Tire-fesses	Télé-sièges	Autres RM	Total RM	Moment de puissance (personnes km h <sup>-1</sup> )
Clusaz (La)	L	Aravis	1028	2375	18	16	1	35	13898
Grand Bornand (Le)	L	Aravis	940	2031	21	15	0	36	11381
Héry Sur Ugine	S	Aravis	912	1225	2	0	0	2	285
Manigod Croix Fry	S	Aravis	1416	1795	17	3	0	20	1875
Mont Saxonnex	S	Aravis	1050	1574	7	1	0	8	828
Montmin	S	Aravis	1110	1195	2	0	0	2	92
Nancy Sur Cluses	S	Aravis	920	1558	4	0	0	4	354
Portes du Mont Blanc (Les) - Combloux - Jaillet (Le) – Giettaz (La)	L	Aravis	988	2013	21	9	0	30	7854
Portes du Mont Blanc (Les) - Sallanche-Cordon	S	Aravis	1030	1538	7	0	0	7	1005
Reposoir (Le)	S	Aravis	950	1626	6	0	0	6	271
Saint Jean de Sixt	S	Aravis	951	1020	2	0	0	2	42
Saint Sixt - Orange Montisel	S	Aravis	1100	1166	3	0	0	3	88
Thorens Glières	S	Aravis	1037	1153	1	0	0	1	76
Aillon le Jeune-Margeriaz	M	Bauges	945	1834	17	3	0	20	3600
Savoie Grand Revard	S	Bauges	1165	1549	15	2	0	17	1331
Semnoz (Le)	S	Bauges	1025	1696	11	2	0	13	1463
Seythenex – Sambuy (La)	S	Bauges	1140	1835	3	1	0	4	1161
Arêches Beaufort	M	Beaufortain	1000	2137	11	4	0	15	4247
Crest Voland	M	Beaufortain	1200	1608	15	4	0	19	3611
Granier Sur Aime	S	Beaufortain	1390	1661	2	0	0	2	222
Saisies (Les)	L	Beaufortain	432	2041	20	15	1	36	8029
Val d'Arly	L	Beaufortain	960	2053	36	9	0	45	8160
Chamrousse	L	Belledonne	1420	2253	19	8	0	27	6234
Collet d'Allevard (Le)	M	Belledonne	1421	2089	11	4	0	15	2627
Sept Laux (Les)	L	Belledonne	1300	2380	21	9	0	30	9782
Abondance	S	Chablais	950	1758	7	2	0	9	1402
Avoriaz - Morzine	XL	Chablais	970	2501	17	20	1	38	17965
Belleaux Hirmentaz	S	Chablais	1100	1612	15	3	0	18	2076
Bernex	S	Chablais	960	1871	11	3	0	14	2355
Brasses (Les)	S	Chablais	880	1495	11	3	0	14	2499
Carroz d'Araches (Les)	L	Chablais	1011	2125	11	7	0	18	6374
Chapelle d'Abondance (La)	M	Chablais	983	1797	7	5	0	12	3009
Chatel	L	Chablais	1100	2093	28	14	0	42	14275
Col du Corbier	S	Chablais	1000	1615	6	2	0	8	637
Espace Roc d'Enfer	M	Chablais	945	1790	12	4	0	16	2838
Flaine	L	Chablais	1580	2482	11	12	3	26	12974
Gets (Les)	L	Chablais	1000	2131	16	15	0	31	10523
Habère Poche	S	Chablais	920	1505	4	3	0	7	1363
Lullin Col de Feu	S	Chablais	1085	1175	1	0	0	1	81
Morillon-Samoens-Sixt	L	Chablais	697	2118	19	16	1	36	12691
Morzine Pléney Nyon	L	Chablais	980	2127	12	14	2	28	8467
Plaine-Joux	S	Chablais	1325	1718	8	0	0	8	747
Praz-de-Lys - Sommand	L	Chablais	1240	1961	19	6	0	25	5095
Thollon les Mémises	S	Chablais	1026	1938	13	4	0	17	2331

Tableau 2 (suite)

Station	Taille	Massif	Altitude min (m)	Altitude max (m)	Tire-fesses	Télé-sièges	Autres RM	Total RM	Moment de puissance (personnes km h <sup>-1</sup> )
Ancelle	S	Champsaur	1322	1811	12	2	0	14	1876
Orcières Merlette	L	Champsaur	1363	2725	23	10	0	33	7959
Stations Village du Champsaur	M	Champsaur	1250	2240	25	4	0	29	3593
Col de Marcieu	S	Chartreuse	993	1350	5	0	0	5	220
Col de Porte	S	Chartreuse	1200	1701	5	1	0	6	590
Col du Granier - Désert d'Entremont (Le)	S	Chartreuse	990	1428	8	0	0	8	506
Saint Hilaire du Touvet	S	Chartreuse	260	1415	6	0	0	7	515
Saint Pierre de Chartreuse – Planolet (Le)	M	Chartreuse	900	1751	18	3	0	21	3261
Sappey En Chartreuse (Le)	S	Chartreuse	950	1344	5	0	0	5	365
Lus la Jarjatte	S	Devoluy	1160	1521	5	0	0	5	380
Massif du Dévoluy	L	Devoluy	1455	2490	22	5	0	27	6767
Orres (Les)	L	Embrunais - Parpaillon	1418	2704	17	9	0	26	6532
Réallon	S	Embrunais - Parpaillon	1555	2114	5	2	0	7	1407
Risoul	L	Embrunais - Parpaillon	920	2551	17	9	0	26	6730
Alpe d'Huez (L')	XL	Grandes Rousses	1450	3318	41	26	2	69	19828
Chazelet-Villar d'Arène	S	Grandes Rousses	1622	2164	8	1	0	9	1033
Oz - Vaujany	L	Grandes Rousses	1080	2817	15	7	2	24	7847
Bessans	S	Haute-Maurienne	1706	2079	3	0	0	3	184
Bonneval Sur Arc	S	Haute-Maurienne	1800	2937	9	3	0	12	2023
Bramans	S	Haute-Maurienne	1250	1304	1	0	0	1	16
Norma (La)	M	Haute-Maurienne	1300	2742	9	7	0	16	4049
Val Cenis	L	Haute-Maurienne	1300	2737	18	15	0	33	12464
Val Fréjus	M	Haute-Maurienne	1550	2731	7	5	0	12	3241
Arcs (Les) - Peisey-Vallandry	XL	Haute-Tarentaise	810	3220	45	33	5	83	31401
Rosière (La)	L	Haute-Tarentaise	1150	2572	19	7	0	26	6674
Sainte Foy Tarentaise	S	Haute-Tarentaise	1524	2612	3	4	0	7	2293
Tignes	XL	Haute-Tarentaise	1550	3459	28	24	2	54	25328
Val d'Isère	XL	Haute-Tarentaise	1786	3197	21	24	5	50	23976
Roubion les Buissons	S	Haut-Var - Haut-Verdon	1420	1898	7	1	0	8	720
Val d'Allos	L	Haut-Var - Haut-Verdon	1411	2500	25	14	2	41	9051
Val Pelens	S	Haut-Var - Haut-Verdon	1600	1737	3	0	0	3	168
Valberg-Beuil	M	Haut-Var - Haut-Verdon	437	2020	22	7	0	29	4898
Albiez Montrond	M	Maurienne	1480	2060	10	5	0	15	2695
Corbier (Le)-Saint Jean d'Arves-Saint Colomban des Villards	L	Maurienne	1083	2377	31	10	0	41	7948
Karellis (Les)	L	Maurienne	1550	2490	11	6	0	17	5116
Saint Sorlin d'Arves	L	Maurienne	1496	2590	9	8	0	17	7745
Toussuire (La) - Saint-Pancrace (Les Bottières)	L	Maurienne	1284	2367	18	9	0	27	5972
Valloire	L	Maurienne	1408	2530	10	10	0	20	9626
Valmeinier	L	Maurienne	1383	2579	22	11	0	33	9683
Stations du Mercantour	XL	Mercantour	1151	2585	30	19	2	51	16670
Chamonix	XL	Mont-Blanc	1000	3787	26	23	11	60	27293

Tableau 2 (suite)

Station	Taille	Massif	Altitude min (m)	Altitude max (m)	Tire-fesses	Télé-sièges	Autres RM	Total RM	Moment de puissance (personnes km h <sup>-1</sup> )
Contamines (Les)-Hauteluce	L	Mont-Blanc	1160	2437	17	12	0	29	9800
Houches (Les) - Saint-Gervais	L	Mont-Blanc	979	1892	12	8	1	21	5859
Megève	L	Mont-Blanc	1059	2014	22	13	2	37	12521
Saint Gervais Bettex	L	Mont-Blanc	568	2386	13	8	1	22	7014
Saint Nicolas de Verce	M	Mont-Blanc	1173	2364	4	5	0	9	3713
Vallorcine la Poya	S	Mont-Blanc	1350	1502	4	0	0	4	163
Alpe du Grand Serre (L')	M	Oisans	1280	2221	12	3	0	15	3225
Col d'Ornon	S	Oisans	1330	1855	4	0	0	4	401
Deux Alpes (Les)	XL	Oisans	979	3642	35	28	3	66	24045
Grave (La)	S	Oisans	1470	3532	1	0	0	3	915
Motte d'Aveillans (La)	S	Oisans	1290	1430	1	0	0	1	84
Notre Dame de Vaulx	S	Oisans	1030	1085	1	0	0	1	18
Saint Firmin Valgaudemar	S	Oisans	1350	1580	2	0	0	2	90
Villard Reymond	S	Oisans	1670	1712	1	0	0	1	37
Pelvoux-Vallouise	S	Pelvoux	1230	2237	8	1	0	9	1543
Puy St Vincent	L	Pelvoux	1410	2668	10	7	0	17	5569
Serre Chevalier	XL	Pelvoux	1200	2750	51	26	2	79	25988
Station du Queyras	L	Queyras	1450	2801	38	5	0	43	6240
Montgenevre	L	Thabor	1753	2581	16	13	0	29	8616
Névache	S	Thabor	1585	1707	3	0	0	3	112
Col Saint Jean	M	Ubaye	1134	2450	10	4	0	14	2935
Pra-Loup	L	Ubaye	1578	2500	15	9	1	25	7216
Stations de l'Ubaye	L	Ubaye	1370	2427	32	6	0	38	5815
Vars	L	Ubaye	1610	2721	26	10	0	36	9068
Aussois	M	Vanoise	1300	2670	8	6	0	14	3089
Courchevel	XL	Vanoise	1260	2919	52	41	4	97	38267
Ménuires (Les)	XL	Vanoise	1389	2841	18	21	1	40	20823
Méribel les Allues	XL	Vanoise	612	2701	15	16	0	31	15227
Notre Dame du Pré	S	Vanoise	1255	1510	3	0	0	3	225
Orelle	L	Vanoise	890	3242	1	4	0	5	5130
Plagne (La)	XL	Vanoise	1200	3167	76	42	3	121	36038
Pralognan	M	Vanoise	1400	2340	13	4	1	18	3680
Saint Francois Longchamp	L	Vanoise	1394	2514	16	6	0	22	5688
Val Thorens	XL	Vanoise	1718	3186	12	16	3	31	18780
Valmorel	L	Vanoise	1210	2401	19	9	1	29	8629
Autrans	S	Vercors	1032	1650	15	1	0	16	1709
Col de l'Arzelier	S	Vercors	1000	1477	3	1	0	4	470
Col du Rousset	S	Vercors	1251	1695	10	1	0	11	1289
Font d'Urle - Chaud Clapier	S	Vercors	1279	1650	12	0	0	12	600
Gresse en Vercors	S	Vercors	1000	1703	10	1	0	11	1252
Lans en Vercors	S	Vercors	1013	1801	15	0	0	15	1879
Méaudre	S	Vercors	971	1577	9	2	0	11	1645
Rencurel	S	Vercors	1050	1233	3	0	0	3	221
Saint Nizier	S	Vercors	1161	1200	2	0	0	2	50
Villard de Lans-Corrençon	L	Vercors	1095	2052	24	10	0	34	8204
Total			260	3787	1870	922	64	2859	812448

stations de ski considérées dans cette étude, avec le massif SAFRAN correspondant, la plage d'altitude la plus basse/la plus haute et le débit total des remontées mécaniques.

Le croisement des informations géographiques décrites ci-dessus permet ainsi d'appliquer pour chaque pixel les conditions d'enneigement correspondantes issues de la chaîne SAFRAN-Crocus. Chaque pixel de l'enveloppe gravitaire représentant une fraction spécifique du moment de puissance total de la station considérée, cette fraction a été utilisée pour pondérer les résultats des simulations SAFRAN-Crocus associées à chaque pixel. Ainsi, nous sommes en mesure de proposer une évaluation intégrée des conditions d'enneigement tenant compte de l'altitude, de la répartition du moment de puissance des remontées mécaniques et des caractéristiques topographiques de la station de ski.

### II.3. Calcul de l'index intégré de la présence de neige pour les stations de ski

Pour chaque pixel du MNT, nous utilisons les données quotidiennes d'épaisseur de neige de SAFRAN-Crocus pour attribuer une valeur binaire aux pixels selon qu'ils respectent (valeur de 1) ou pas (0) la règle des 100 jours sur une saison donnée. Ici, nous considérons la règle des 100 jours dans sa formulation la plus simple, à savoir que nous avons uniquement compté le nombre de jours pendant lesquels l'épaisseur de neige est supérieure à un seuil de 30 cm durant une saison donnée (c'est-à-dire du 1<sup>er</sup> août d'une année au 31 juillet de l'année suivante). Le résultat a ensuite été agrégé au niveau de la station pour calculer un indice de viabilité correspondant au pourcentage du moment de puissance jugé viable pour la saison considérée. La figure 4 donne un exemple de la façon dont cet indice est calculé, pour la même station que dans la figure 3 et pour les saisons de neige 2006-2007 et 2008-2009.

### II.4. Données socio-économiques des stations de ski

Pour compléter l'intégration de la BD Stations et des résultats SAFRAN-Crocus, l'évaluation de la viabilité a été mise en perspective avec les résultats économiques. Dans ce

domaine, la BD Stations comprend des données recueillies et mises à disposition par DSF : chiffre d'affaires, recettes hivernales et nombre de journées-skieur pendant la saison. Le chiffre d'affaires et les recettes hivernales sont intéressants pour étudier la santé économique des stations et ses variations, mais ils intègrent également des facteurs de gestion. Le chiffre d'affaires comprend la dynamique des investissements et les recettes hivernales constituent une variable d'ajustement par rapport aux conditions d'exploitation également dépendante de facteurs de concurrence variables d'une station à l'autre. Les journées-skieur quant à elles mesurent directement le nombre de personnes différentes qui ont fréquenté le domaine skiable pour une journée. Cette unité est fréquemment utilisée pour comparer les dynamiques touristiques entre stations. Dans tous les cas, ces données sont recueillies sur une base déclarative et susceptible de varier d'une année à l'autre et d'une station à l'autre. Toutefois, à l'heure actuelle, cette source de données demeure la seule pour appréhender la dimension socio-économique des stations de sports d'hiver. En effet, la diversité de statut des exploitants de remontées mécaniques (public, semi-public ou privé) induit une forte diversité des systèmes comptables et d'obligations légales associées qui empêche en pratique d'autres possibilités de disposer d'une information unifiée. En outre, les données de DSF s'appuient sur des entreprises gestionnaires de remontées mécaniques en cohérence avec l'organisation de la BD Stations. 105 stations ont fourni des informations suffisamment détaillées pour être utilisées dans l'analyse. Dans le cas de données manquantes pour une saison, nous avons réalisé une interpolation des informations sur la base des taux de croissance d'une année à l'autre des stations de même catégorie (S, M, L et XL). Cette approche a été nécessaire pour 57,14 % des stations (60/105) en 2006-2007 et 43,81 % des stations (46/105) en 2008-2009.

## III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats suivants reposent sur des simulations numériques de l'enneigement naturel dans les Alpes françaises, à l'aide de la suite de modélisation SAFRAN-Crocus et de

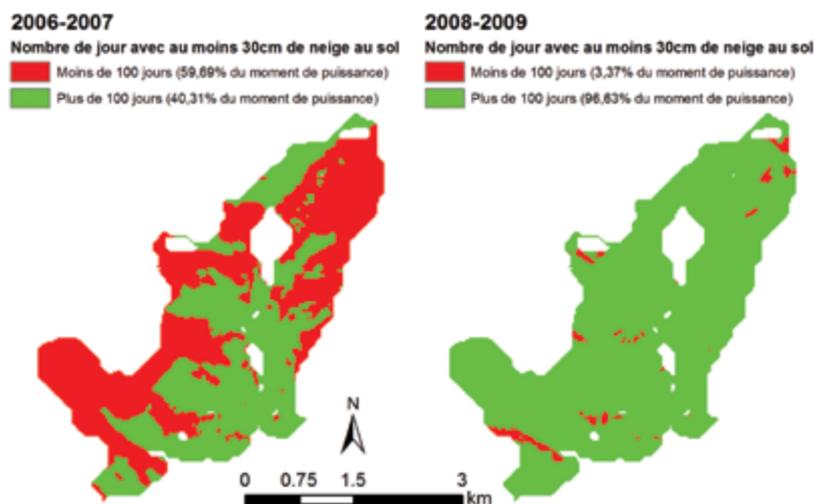


Figure 4 : Illustration du calcul de l'indice de viabilité dans le cas d'une station (les Sept-Laoux, voir figure 3) selon la règle des 100 jours appliquée pour les conditions de neige naturelle à deux saisons touristiques contrastées, 2006-2007 (à gauche) et 2008-2009 (à droite).

la base de données BD Stations. Les indices de viabilité, issus de ce croisement de SAFRAN-Crocus et de la BD Stations, sont calculés pour les 130 stations comprises dans les 23 massifs SAFRAN. L'analyse socio-économique est limitée à un sous-ensemble de 105 stations qui ont fourni des valeurs de journées-skieur parmi celles qui se trouvent dans les 23 massifs SAFRAN.

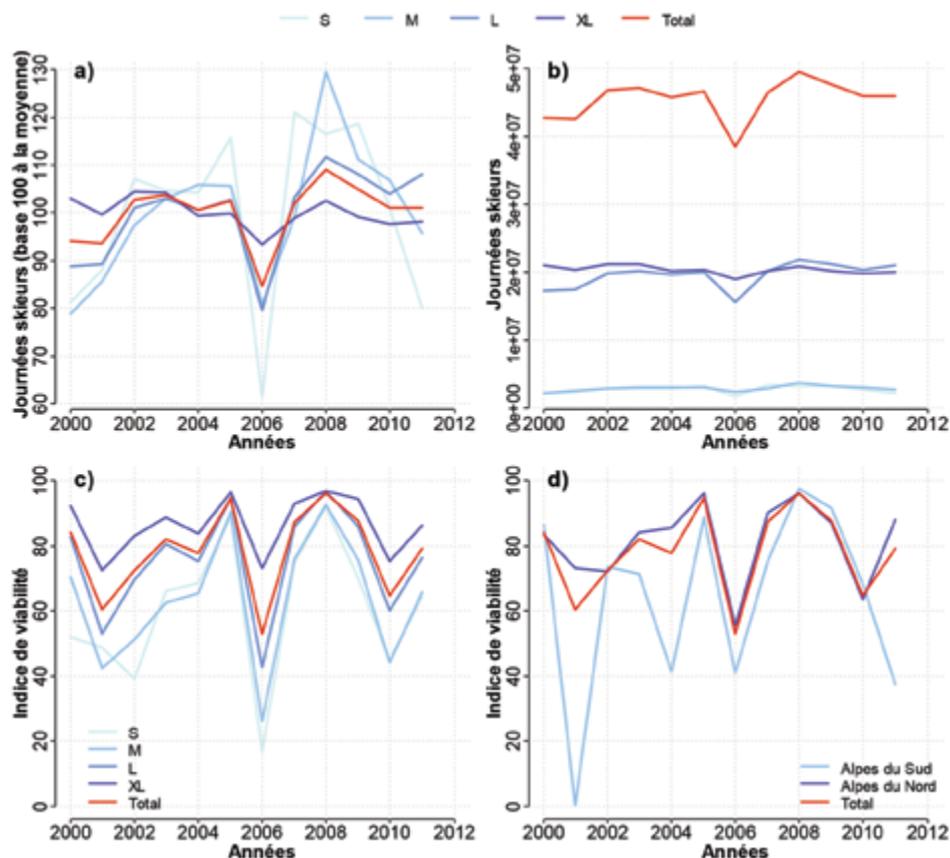
### III.1. Conditions d'enneigement naturel et fonctionnement des installations de remontées mécaniques

La figure 5 montre l'évolution dans le temps depuis les saisons 2000-2001 à 2011-2012 des valeurs relatives de journées-skieur par rapport à la moyenne de 2010-2012 dans chaque catégorie de station de ski et des valeurs absolues de journées-skieur en fonction de la catégorie de station de ski (S, M, L, XL et le total) et l'indice de viabilité basé sur des conditions d'enneigement naturel, en fonction de la catégorie de station de ski et en séparant les domaines des Alpes françaises du Nord et du Sud. La figure 5c illustre clairement la plus grande variabilité interannuelle des conditions d'enneigement dans les petites stations (de 18 à 90 % pour les stations S) que dans les plus grandes stations (par exemple de 65 à 97 % pour les stations XL). Cette différence s'explique principalement par la répartition en altitude des pistes de ski dans la mesure où le moment de puissance de plus petites stations est généralement localisé à des altitudes plus faibles

que celui des plus grandes. Les stations de catégories S et M présentent plus souvent des niveaux de viabilité inférieurs de 50 % à ceux des L et XL. Globalement, les saisons 2006-2007 et 2010-2011 se détachent comme étant les pires saisons de la dernière décennie en termes de conditions d'enneigement naturel, y compris pour les plus grandes. En se concentrant sur les stations de catégories S et M, on constate que lors des saisons 2001-2002 et 2002-2003 l'indice de viabilité est également inférieur à 50 %.

La figure 5d montre que les conditions d'enneigement dans les stations Alpes du Sud présentent des écarts plus importants d'une année sur l'autre que dans celles des Alpes du Nord, tous types de station confondus (données non présentées). En 2006-2007, les conditions d'enneigement ont été considérablement inférieures à la moyenne autant dans les Alpes du Nord que du Sud alors qu'en 2008-2009, les conditions d'enneigement ont été considérablement meilleures que la moyenne autant dans les Alpes du Nord que du Sud. En revanche, la saison 2010-2011 a été une des pires pour les Alpes du Nord. Enfin, la saison 2011-2012 montre de bonnes conditions de viabilité dans les Alpes du Nord (83 %) mais des conditions significativement dégradées dans les Alpes du Sud (24 %).

L'évolution des journées-skieur montre des formes différentes selon la taille des stations (figures 5a et 5b). Dans l'ensemble, la saison 2006-2007 a été la plus difficile en termes de journées-skieur pendant toute la période, alors que la saison 2008-2009 a été la meilleure. 2008-2009 est



**Figure 5 :** Variations pluriannuelles entre les saisons 2000-2001 et 2011-2012 des journées-skieurs par rapport à la valeur moyenne entre 2000 et 2012 (a) et en valeur absolue (b) en fonction du type de station ainsi que les variations pluriannuelles de l'indice de viabilité (en condition d'enneigement naturelles) en fonction du type de station (c) et de la distinction entre Alpes du Nord et Alpes du Sud (d). En abscisse, les étiquettes de l'axe correspondent à la première moitié de la saison considérée (par exemple, 2000 représente la saison 2000-2001).

également connue pour être la première saison où la France est devenue la première destination de ski du monde (en termes de journées-skieur). Les valeurs des journées-skieur dans les stations XL ne présentent pas d'écarts significatifs, excepté un déclin relativement stable d'environ 5 % sur la durée prise en compte. Les stations L et S présentent une diminution significative lors de la saison 2006-2007, mais également une augmentation remarquable durant la saison 2008-2009 (figure 5a). Enfin, les stations M présentent un comportement singulier. Après une croissance régulière du nombre de journées-skieur, le déclin de la saison de ski 2006-2007 a été relativement faible. Au contraire, pendant la saison 2008-2009, une croissance relative supérieure peut-être constatée. En résumé, sur la période étudiée, en termes de journées-skieur :

- Les stations XL semblent très peu sensibles aux écarts interannuels des conditions météorologiques et d'enneigement naturel,
- Les stations L et S réagissent fortement aux conditions naturelles, qu'elles soient favorables ou défavorables,
- Les stations M sont affectées de façon plus positive par des conditions favorables qu'affectées de façon négative par des conditions défavorables.

Il est intéressant de souligner que la saison 2006-2007 a été défavorable à la fois en termes de conditions d'enneigement et de journées-skieur, alors que la saison 2010-2011 a été défavorable en termes de conditions d'enneigement mais sans présenter la même baisse de journées-skieur qu'en 2006-2007. Il apparaît donc clairement que d'autres facteurs que les conditions d'enneigement naturel entrent en jeu pour expliquer ce constat. Ces résultats militent pour une prise en compte explicite des pratiques de gestion de la neige dans le système de modélisation de la neige.

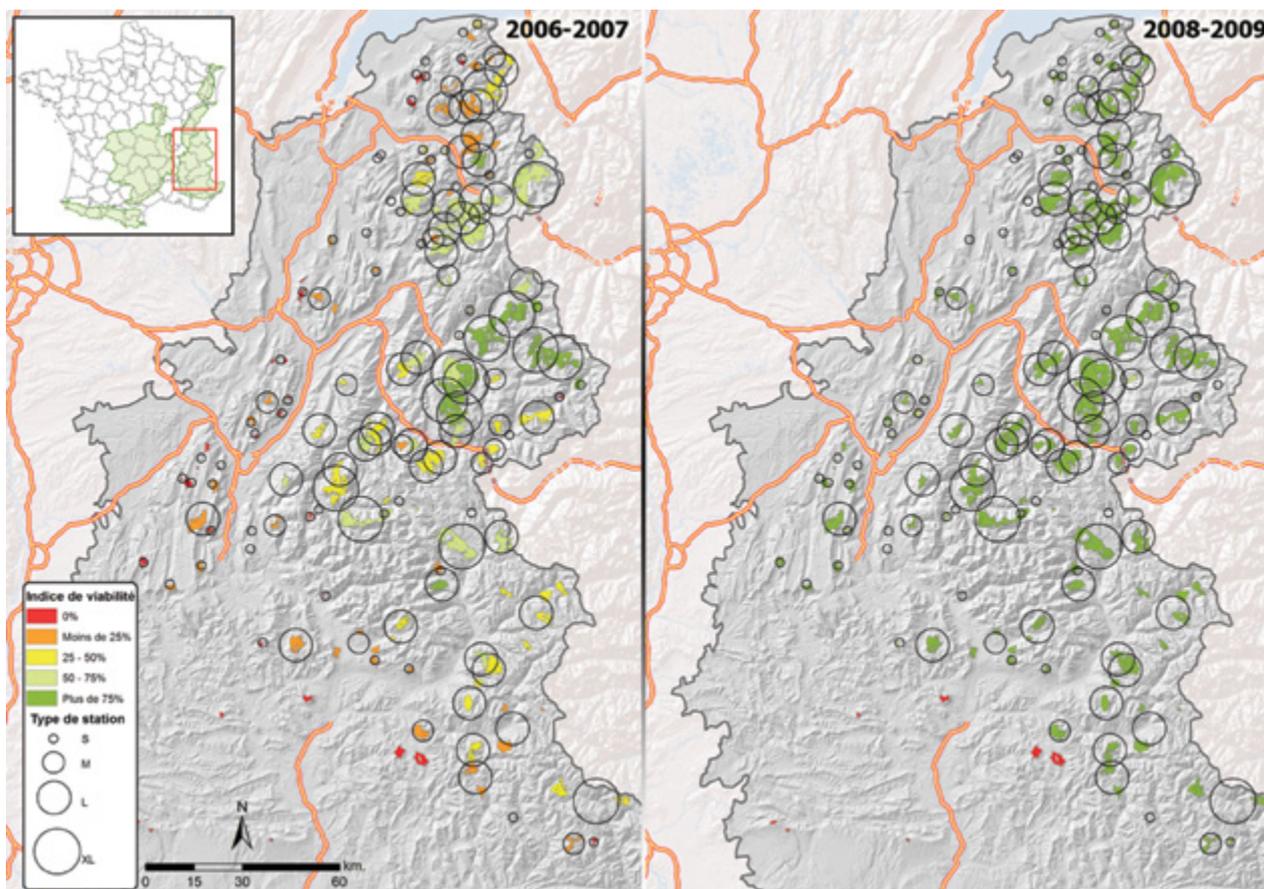
Dans ce qui suit, nous concentrons notre analyse sur les deux saisons extrêmes 2006-2007 et 2008-2009. Pour les professionnels du secteur, il est couramment admis que les mauvaises conditions de ski dans les stations pendant la saison 2006-2007 peuvent être expliquées par un hiver doux qui a limité la possibilité de fabriquer de la neige, ajouté à l'insuffisance des chutes de neige naturelle [Luterbacher *et al.*, 2007]. La figure 6 montre les résultats de l'indice de viabilité pour chaque station pendant les saisons considérées ainsi que leur taille, et elle illustre parfaitement le contraste entre les deux saisons étudiées. Pendant la saison 2008-2009, aucune station ne présente un indicateur de viabilité inférieur à 50 %, ce qui est cohérent avec les bons résultats économiques en termes de journées-skieur. Les cartes montrent également que le cœur de la région alpine, soit la partie est, est moins impacté. Cette différence entre stations peut être liée à leur altitude. La répartition spatiale suit celle de la topographie et souligne un gradient est-ouest, depuis les limites jusqu'au cœur des Alpes. Elle suggère le rôle primordial de l'altitude pour expliquer les résultats économiques.

### III.2. Inégalités entre régions et stations

La répartition spatiale et altitudinale des stations de ski est directement liée à leur dynamique de la construction dans le cadre de la politique française d'Aménagement du territoire appelée « *Plan neige* ». Cette politique reposait sur une forte intervention publique adossée à une doctrine forte déterminant les choix d'équipement. Les stations étaient alors construites selon un modèle dit des « stations de troisième génération », qui correspond à une station de haute altitude conçue selon une approche fonctionnelle de l'espace afin d'intégrer l'ensemble des besoins des touristes, depuis

le séjour jusqu'aux loisirs. Ce type de station a surtout été construit dans la vallée de la Tarentaise (voir figure 1). Cette logique transparaît des cartes présentées sur la Figure 6 où un bon indice de viabilité pour la saison 2006-2007, lié à une altitude élevée, se conjugue avec moment de puissance important. Les stations de ski des Alpes du Sud représentent quant à elles 17,2 % du moment de puissance total des remontées mécaniques, et jouent un rôle moindre dans le secteur du tourisme hivernal français que celles des Alpes du Nord. La plus grande variabilité des conditions météorologiques dans les Alpes du Sud peut expliquer en partie cette situation, mais des considérations historiques relatives à la politique de développement des stations de ski de haute altitude doivent également être prises en compte [George-Marcelpoil et François, 2012]. La figure 7, représentant la répartition altitudinale du moment de puissance, met en évidence le contraste entre les Alpes françaises du Nord et du Sud.

La figure 6 montre clairement la grande différence entre les saisons de neige 2006-2007 et 2008-2009 mais le lien entre conditions d'enneigement et valeurs des journées-skieur n'est pas explicite. Malgré un indice de viabilité élevé, certaines stations présentent un nombre relativement faible de journées-skieur. Ce constat est analysé ci-dessous en utilisant des corrélations entre l'indice de viabilité, les valeurs des journées-skieur et le moment de puissance des remontées mécaniques. La figure 8 montre ainsi que les valeurs des journées-skieur et le moment de puissance des remontées mécaniques sont extrêmement bien corrélés pendant les deux saisons de neige 2006-2007 et 2008-2009, avec des niveaux de corrélation identiques. Indépendamment des conditions d'enneigement naturel, la taille des stations de sports d'hiver favorise leur niveau d'activité (durant une même saison). Bien que ne présentant pas des niveaux de corrélation très importants, l'évolution du lien entre l'indice de viabilité et journées-skieurs ou moment de puissance, par rapport aux deux saisons s'avère intéressante. Dans une situation difficile, les stations les plus équipées présentent une meilleure résistance aux conditions naturelles et les journées-skieurs sont mieux corrélées avec l'indice de viabilité. Au contraire, dans un contexte de bon enneigement général comme lors de la saison 2008-2009, le moment de puissance devient le seul facteur réellement déterminant par rapport aux autres variables étudiées. Ces résultats semblent pleinement conformes à l'évaluation empirique des relations entre les conditions d'exploitation et les journées-skieur pour les deux saisons étudiées. L'altitude joue quant à elle un rôle moins important. Durant la saison 2006-2007, les coefficients de corrélation entre la moyenne des altitudes moyennes des remontées mécaniques (pondérée par leur moment de puissance) et l'indice de viabilité ou le moment de puissance, respectivement de 0,74 et 0,48, ne sont pas très élevés, ce qui indique (1) que l'altitude moyenne ne suffit pas à expliquer l'indice de viabilité, même si elle joue un rôle majeur et (2) que le moment de puissance des remontées mécaniques n'est pas directement lié à leur altitude. Il existe de petites stations de haute altitude, et inversement, comme le montre la figure 9. En outre, les remontées mécaniques à basse altitude doivent disposer d'un moment de puissance suffisant pour alimenter en skieurs celles à plus haute altitude. Cela limite l'augmentation de l'altitude moyenne quel que soit le moment de puissance. Ce qui semble plus critique (et qui n'est pas spécifiquement traité ici), c'est à quel point la limite inférieure de la station est basse (et donc à quel point elle est enneigée). Pour autant, la corrélation positive entre altitude et viabilité globale a

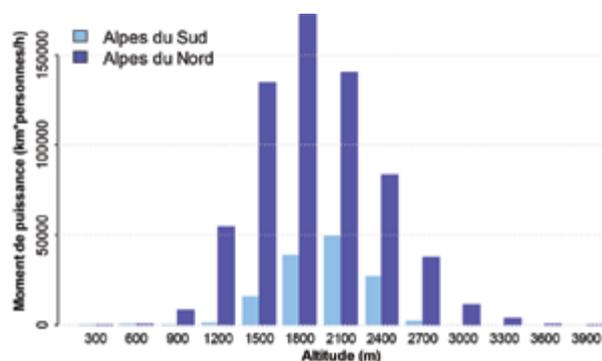


**Figure 6 :** Carte des stations de sports d'hiver en fonction de leur indice de viabilité calculé pour les conditions de neige naturelle et du type de station pour les saisons 2006-2007 (à gauche) et 2008-2009 (à droite).

longtemps encouragé les stations à investir dans des installations de plus haute altitude.

### III.3. Évolution des installations de remontées mécaniques sur le long terme

Des stations différentes ne renouvellent pas leurs installations de remontées mécaniques de la même façon. Elles



**Figure 7 :** Distribution altitudinale du moment de puissance dans les Alpes du Sud (bleu clair) et dans les Alpes du Nord (bleu foncé). Chaque étiquette en abscisse représente le centre d'une tranche de 300 m.

doivent tenir compte de leur patrimoine et leur dynamique est entraînée par un mécanisme d'autosuffisance. Étant donné qu'un lien physique doit être maintenu entre le bas et le haut d'un domaine skiable, des stations plus grandes ont été principalement implantées loin de villes existantes, dans des zones permettant l'accès à des domaines skiables plus élevés. Sur la période 1985-2012, la fraction du débit des remontées mécaniques à des altitudes plus basses s'est réduite de façon régulière, comme le montre la figure 10. Pour toutes les stations, les tranches au-dessous de 1 500 m montrent une nette tendance à la baisse. Ceci est encore plus marqué pour les stations XL qui tendent à étendre leur domaine skiable à une altitude plus élevée. Toutefois, les investissements à des altitudes plus élevées restent limités car ils ne sont pas à la portée de chaque station et aussi parce qu'ils n'offrent pas nécessairement les meilleures conditions pour skier (températures très basses et exposition au vent). Les stations L ont préféré s'équiper entre 1 500 et 2 000 m, et les stations XL ont choisi principalement la tranche supérieure, entre 2 000 et 2 500 m, tout en conservant la tranche inférieure.

## IV. EXTENSION À LA PRISE EN COMPTE DE LA GESTION DE LA NEIGE DANS CROCUS

Les résultats présentés précédemment s'appuient exclusivement sur la simulation par Crocus des processus naturels

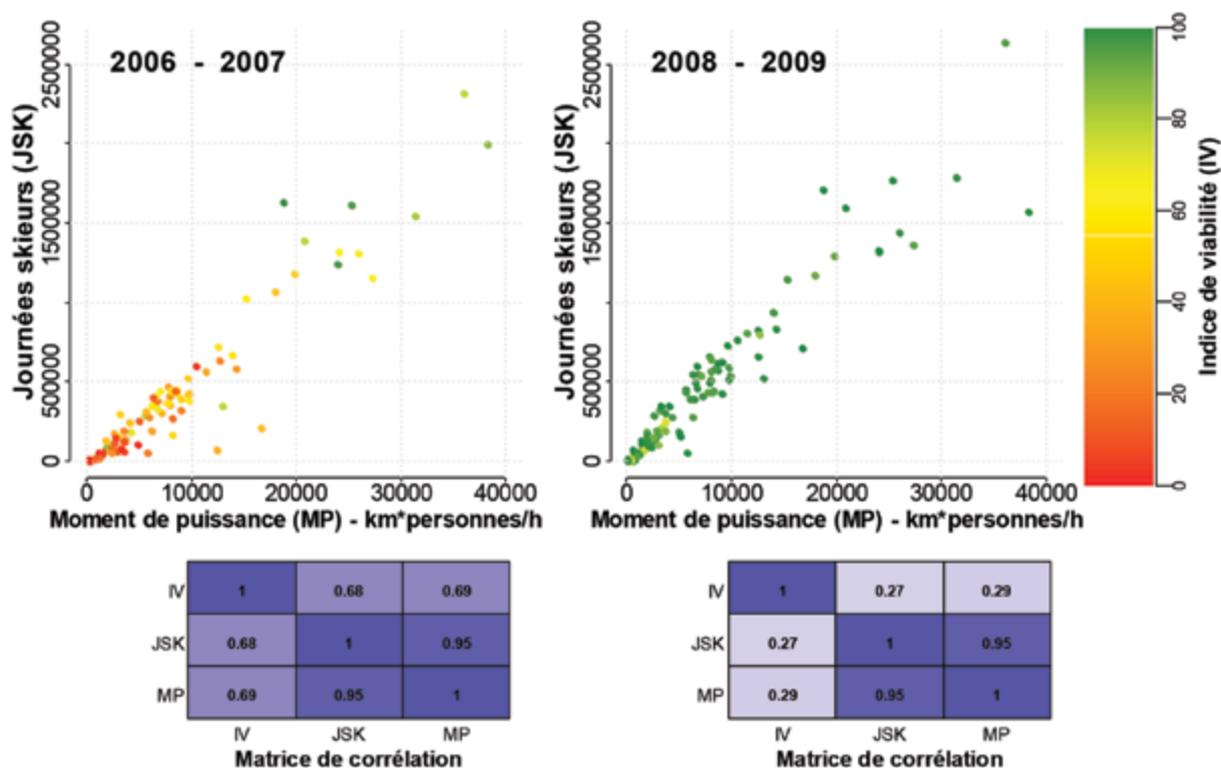


Figure 8 : Nuage de points entre les journées-skieurs et le moment de puissance des stations en 2006-2007 (à gauche) et en 2008-2009 (à droite). Le code couleur représente la valeur de l'indice de viabilité (en conditions d'enneigement naturelles). Sous les graphiques, figurent des matrices de corrélation de l'indice de viabilité calculé pour des conditions de neige naturelle (IV), des journées-skieurs (JSK) et du moment de puissance (MP) pour chacune des saisons considérées.

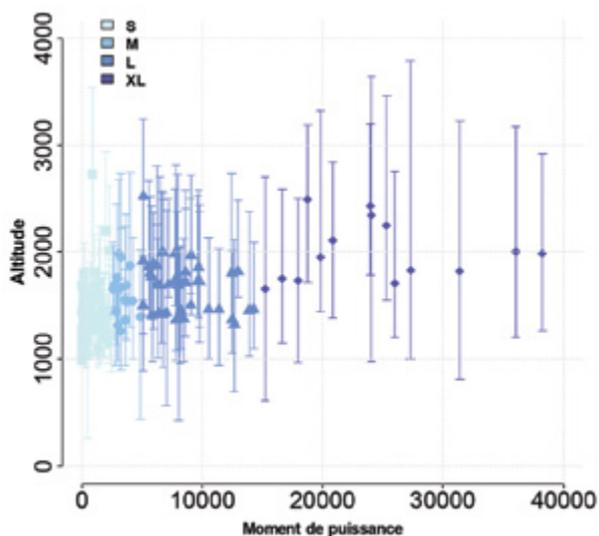


Figure 9 : Nuage de points entre l'altitude et le moment de puissance des stations. Aux extrémités de la barre d'altitude correspondent le point le plus haut et le plus bas des remontées mécaniques et le point entre ces deux extrémités correspond à la moyenne des altitudes moyennes des remontées mécaniques pondérée par leur moment de puissance. Les symboles et leur couleur représentent les différents types de station (S, M, L et XL).

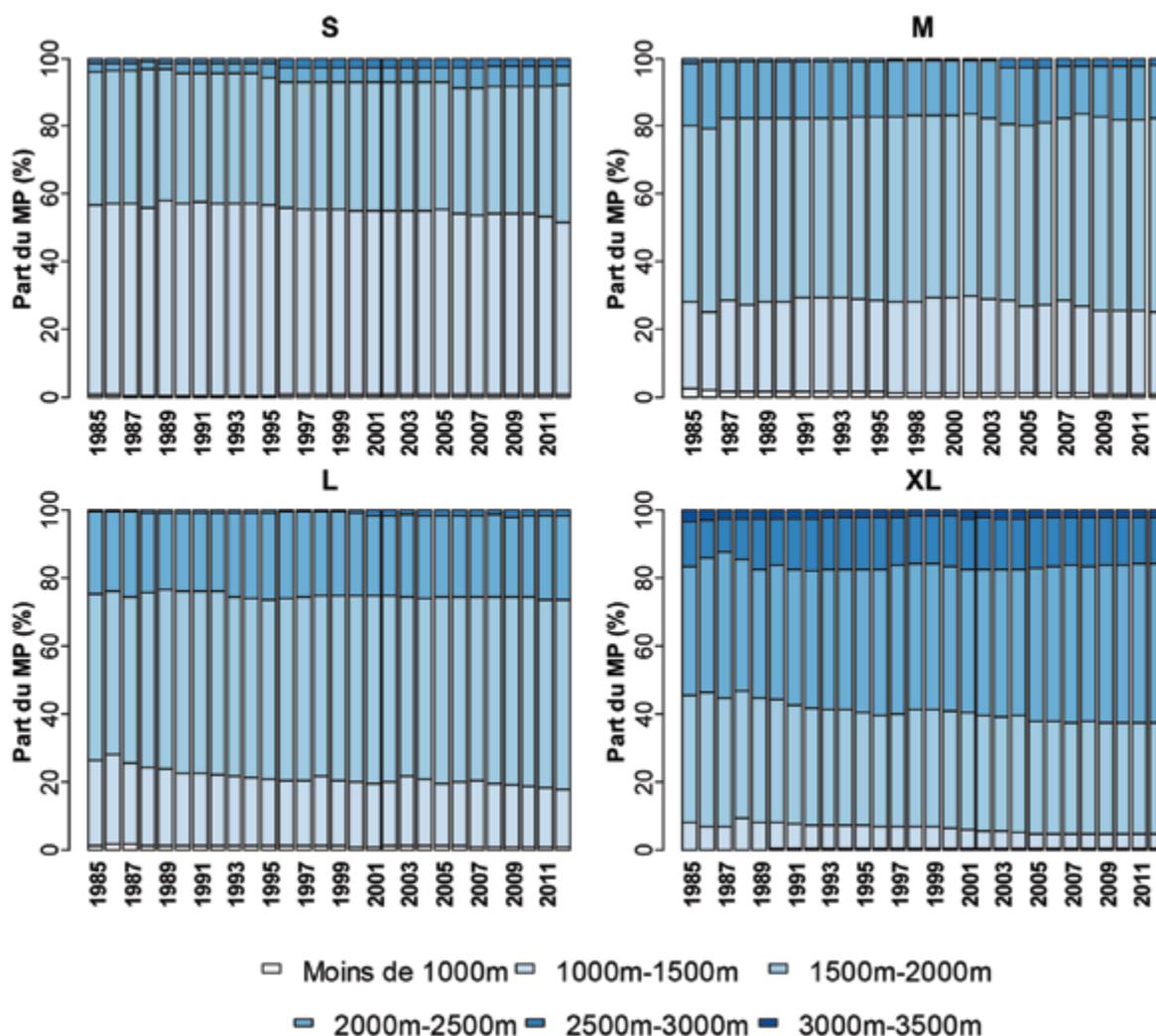
se produisant dans le manteau neigeux. Afin de pallier au manque de prise en compte des processus de gestion de neige dans le modèle, ce dernier a été amendé pour intégrer

le damage et la neige de culture. Des résultats de simulation dans le cas de la station des Sept-Laux pour les saisons 2006-2007 et 2008-2009 sont présentés en miroir de la figure 4 et à titre d'exemple, dans la mesure où les développements du module de gestion de la neige dans Crocus sont encore en cours.

#### IV.1. Intégration de processus de gestion de la neige dans Crocus

L'apport de neige de culture et le damage sont les deux principales actions humaines sur le manteau neigeux de stations de ski alpin. D'autres effets s'y ajoutent comme le déplacement de neige par les engins de damage et l'érosion du manteau neigeux par les skieurs qui ne sont pas pris en compte. Le damage est représenté de façon simplifiée dans le modèle par une masse pesante appliquée à la surface du manteaux neigeux et dont l'effet sur les couches de neige dépend de leur profondeur. L'apport de neige de culture s'effectue en fonction de critères météorologiques et d'un schéma de production. La neige de culture est ajoutée au manteau neigeux de façon analogue à une précipitation de neige naturelle en tenant compte de ses propriétés physiques distinctes, notamment une masse volumique initiale plus élevée que la neige naturelle et une microstructure proche de la neige évoluée [Guily, 1991]. Ceci permet de prendre en compte les propriétés spécifiques de la neige de culture et notamment son comportement physique face au rayonnement solaire et à la diffusion thermique.

Sur la base d'entretiens avec les gestionnaires de pistes, un schéma de production cohérent avec la pratique a été



**Figure 10 :** Evolution pluriannuelle entre 1985 et 2012 de la répartition (%) du moment de puissance entre différentes tranches d'altitude pour chaque type de station (S, M, L et XL).

développé. Dans le modèle, la production est autorisée du 1<sup>er</sup> novembre au 31 mars, entre 19h et 8h (pas de production pendant l'ouverture des stations). Chaque soir à 19h, le cumul de production depuis le début de la saison est comparé à une cible théorique. En cas de valeur inférieure à cette cible, la production est activée potentiellement pour toute la nuit suivante. La cible de production correspond à la production annuelle moyenne de neige de culture sur la décennie 2005-2014, et ne tient pas compte à ce stade de l'état d'enneigement au cours de la saison, qui peut influencer sur le régime de production mis en œuvre par les exploitants. La production est finalement autorisée en fonction des conditions météorologiques (température et humidité relative gouvernant la température dite « du thermomètre mouillé », qui détermine si la production de neige est possible, et la vitesse du vent dont des valeurs trop élevées n'offrent pas des conditions de production satisfaisantes). De plus amples détails sur l'implémentation de ces processus dans le modèle Crocus sont décrits par Spandre *et al.* [2016].

#### IV.2. Exemple d'application

L'implémentation dans Crocus des deux principaux processus de gestion du manteau neigeux dans les stations

de sport d'hiver (damage et neige de culture) autorise à étendre l'application de la méthode développée en utilisant les simulations pour la neige naturelle à des cas plus réalistes où la gestion de la ressource est prise en compte. A titre d'exemple, la figure 11 représente l'impact de la prise en compte des processus de gestion tels que décrits précédemment pour la station des Sept-Laux, pour les saisons 2006-2007 et 2008-2009. Les résultats des simulations incluant la production de neige de culture ont été appliqués à une altitude maximum de 1950m, en cohérence avec les résultats de notre enquête sur les pratiques de gestion de la neige, pour les stations de catégorie L comme les Sept-Laux [Spandre *et al.*, 2015]. Au-delà de cette altitude, les résultats des simulations incluant le damage uniquement ont été appliqués. Aucune autre distinction n'a été appliquée en fonction de l'orientation des versants ou de la pente, ce qui peut largement différer de la réalité de la disposition des enneigeurs. Notre exemple expose donc la situation d'enneigement simulée des Sept-Laux si l'ensemble des pistes d'une altitude de 1950m maximum était équipé en enneigeurs.

La figure 11 montre que la prise en compte de la gestion de la neige améliore significativement la viabilité du domaine des Sept-Laux, particulièrement pour la saison 2006-2007. Les zones dont la période d'enneigement à 30cm

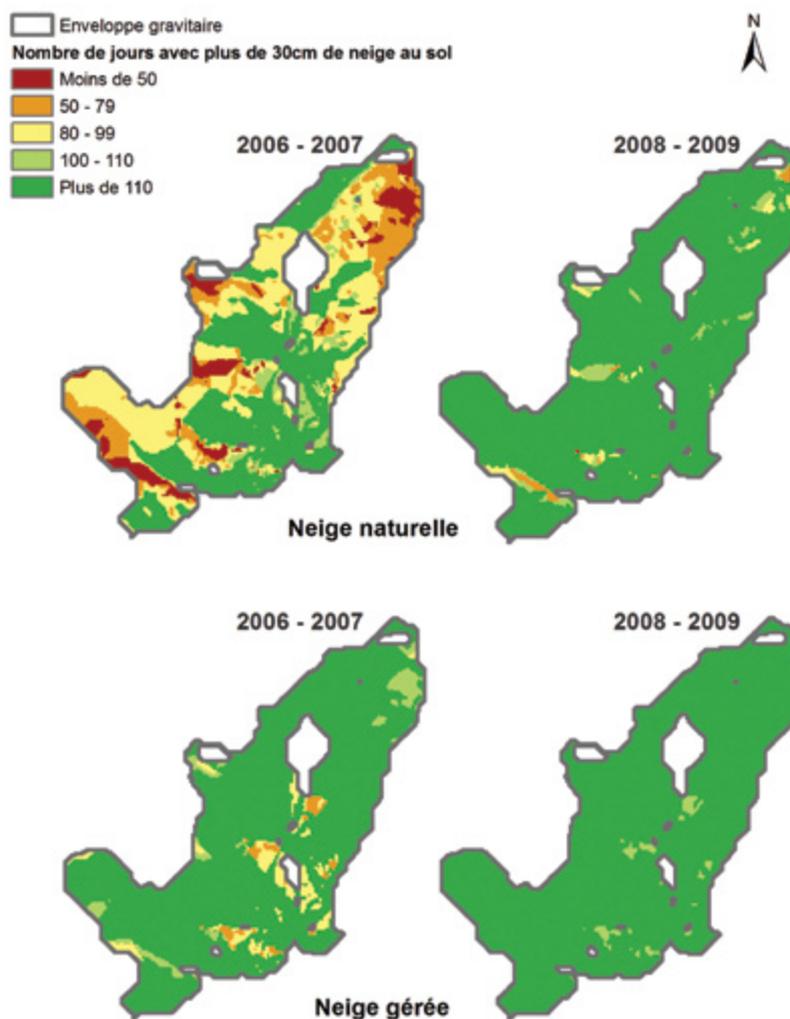
reste inférieure à 100 jours sont les secteurs d'altitude qui ne bénéficient pas de la neige de culture. La figure 12 montre cependant que la neige de culture ne permet de compenser le manque de neige naturelle qu'à la condition que la production soit possible, ce qui n'était pas le cas à l'automne 2006-2007 avec des températures trop douces qui n'ont pas permis d'améliorer franchement les conditions de ski pour le 15 décembre (période d'ouverture de la station). La dégradation de la viabilité au 15 décembre 2008 dans les zones où seul le damage est appliqué (et donc où l'épaisseur est diminuée par densification de la neige) tend à montrer que le critère de l'épaisseur ne permet pas à lui seul de rendre compte des conditions optimum permettant le ski.

### V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

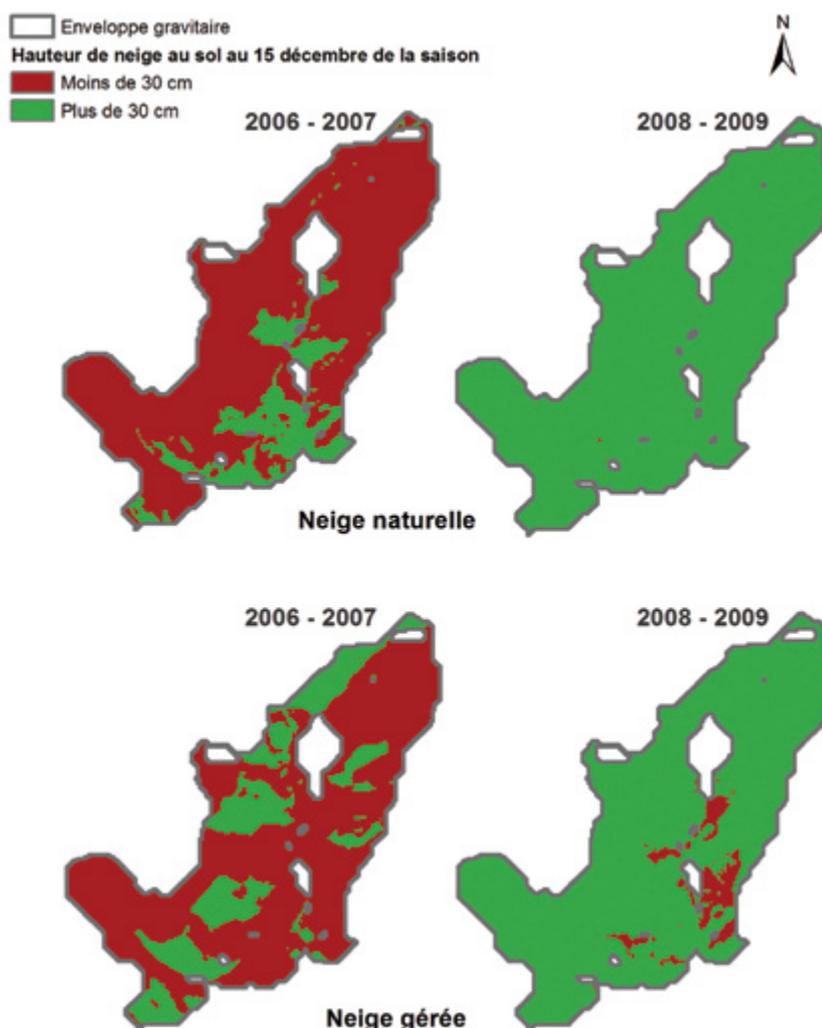
La présente étude a démontré la faisabilité technique et l'intérêt d'intégrer des simulations numériques à base physique des conditions d'enneigement avec des données socio-économiques spatialisées des domaines skiables à l'échelle des Alpes françaises. Les résultats obtenus de SAFRAN-Crocus pour la période allant de 2000 à 2012 ont été intégrés dans la BD Stations, ce qui permet une

comparaison quantitative des données socio-économiques stables (moment de puissance) et variables selon la saison (journées-skieur), la viabilité de la station étant exprimée comme la fraction de la superficie de la station de ski respectant la règle des 100 jours pondérée par le moment de puissance.

Deux saisons contrastées ont été étudiées plus attentivement : 2006-2007 et 2008-2009, la première ayant connu un fort déficit de neige au sol naturelle et la seconde ayant connu des quantités de neige et des valeurs de journées-skieur supérieures à la normale. Nous avons constaté que les flux totaux de skieurs dans les stations sont fortement corrélés au débit des remontées mécaniques, c'est-à-dire à la capacité maximale de la station. Il a été constaté que le niveau de viabilité des stations était faiblement corrélé aux journées-skieur et au débit des remontées mécaniques pour la saison 2008-2009, qui a présenté de bonnes conditions d'enneigement dans toutes les Alpes françaises, alors que la corrélation était plus forte pour la saison 2006-2007 où les conditions d'enneigement ont été défavorables. Au-delà des deux cas extrêmes rapportés ici, une perspective pluriannuelle révèle que les pratiques de gestion de la neige, non prises en compte dans la présente étude, font très probablement une différence en termes de



**Figure 11** : Illustration de l'effet de l'intégration des pratiques de gestion de la neige dans l'évaluation de la viabilité dans le cas d'une station (les Sept-Laux, voir figures 3 et 4) au regard de la règle des 100 jours appliquée à deux saisons touristiques contrastées, 2006-2007 (à gauche) et 2008-2009 (à droite).



**Figure 12 :** Illustration de l'effet de l'intégration des pratiques de gestion de la sur la hauteur de neige en pré-saison (au 15 décembre) dans le cas de la station des Sept-Laux pour les saisons 2006-2007 (à gauche) et 2008-2009 (à droite).

journées-skieur et d'attractivité des stations. Ceci est particulièrement bien illustré par le contraste entre les saisons 2006-2007, défavorable tant en termes de conditions d'enneigement naturel que de journées-skieur, et 2010-2011, également défavorable en termes de conditions d'enneigement naturel mais sans présenter la même diminution de journées-skieur, très probablement parce que les conditions météorologiques et les stratégies de production de neige ont permis un enneigement suffisant des pistes de ski.

Ce travail pose des bases à approfondir à plus long terme traitant de façon quantitative les interactions entre facteurs physiques et socio-économiques du secteur du tourisme de montagne [Strasser *et al.*, 2014]. L'intégration des pratiques de gestion de la neige dans Crocus est en cours, ce qui permet d'envisager d'accroître significativement le réalisme des simulations et autorise à utiliser le modèle pour tester l'impact des stratégies de gestion de la ressource sur les conditions d'enneigement des stations. A terme, l'intégration des pratiques de gestion de la neige dans le cadre de la modélisation que nous avons développée nécessitera d'autoriser des boucles de rétroaction entre conditions d'enneigement et résultats socio-économiques, ce qui devrait aboutir à un système beaucoup plus complexe. Pour achever notre démarche, il conviendrait également de disposer d'informations précises

sur les équipements de production de neige et la disponibilité de la ressource en eau associée.

En complément de l'intégration des pratiques de gestion de la neige, le calcul de l'indice de viabilité peut également être amélioré. L'application de la règle des 100 jours, doit être testée en considérant l'équivalent en eau plutôt que l'épaisseur du manteau neigeux. Il conviendrait de pondérer l'analyse en prenant en compte des périodes de fonctionnement critiques durant la saison [par ex. vacances de fin d'année et vacances d'hiver, voir Damm *et al.*, 2014]. Par ailleurs notre approche spatiale du moment de puissance permet une vision fine des domaines skiables mais pourrait être précisée, entre autre pour différencier les zones haute et basse [par ex. Steiger, 2010] et intégrer la question du retour station "ski aux pieds". Afin d'améliorer la représentation spatiale des enveloppes gravitaires, des pistes sont d'ores et déjà à l'étude pour lier les informations attributaires et spatiales des remontées mécaniques afin de mieux déterminer l'importance d'un secteur par rapport à un autre. L'intégration de données d'altitudes plus précises que celles utilisées (résolution de 25m) est également à l'étude

Néanmoins, les résultats issus du croisement entre la BD Stations et SAFRAN-Crocus constituent dès à présent une base solide pour une approche croisée des évolutions du

manteau neigeux et de l'économie des stations de sports d'hiver, enjeu crucial pour l'économie montagnarde et pour le secteur du tourisme français. Du fait qu'il intègre en son noyau les informations géographiques concernant les stations de ski, les applications de cet outil aux projections climatiques permettront de fournir des évaluations sur le possible état futur de ce secteur économique plus pertinentes que les projections climatiques pour une plage d'altitude fixe, qui ne sont pas nécessairement adaptées à des projections dans le monde complexe des stations de ski de montagne. Encore une fois, tenir compte des pratiques de gestion de la neige de selon des critères physiques et socio-économiques judicieux sera la clé pour fournir des évaluations pertinentes et réalistes de l'impact du changement climatique sur le tourisme hivernal.

## VI. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'une bourse de doctorat (P. Spandre) financée par la Région Rhône-Alpes (Arc Environnement) et d'un financement complémentaire fourni par la Fondation Eau, Neige & Glace et le LabEx OSUG@2020 (ANR10 LABX56). Nous remercions le STRMTG et DSF pour la fourniture des données CAIRN et des données socio-économiques, respectivement. La mise à disposition de données géographiques par l'IGN a également facilité ce travail. La mise en place de la BD Stations a été financée par le Comité de Massif des Alpes et le programme FEDER (No. PRESAGE 39.992). Nous remercions les stations de sports d'hiver pour leur participation à l'enquête utilisée dans ce travail, ainsi que pour les échanges ayant permis d'amorcer la prise en compte des techniques de gestion de la neige dans Crocus. Nous remercions C. Coléou (CNRM-GAME/CEN) pour ses remarques et suggestions, Y. Durand, G. Giraud et L. Mérindol (CNRM-GAME/CEN) pour la mise à disposition des données SAFRAN, et F. Bray, E. Maldonado et J.-B. Barré (Irstea) pour leur contribution au développement de la BD Stations. Le CNRM-GAME/CEN et Irstea sont membre du LabEx OSUG@2020 (ANR10 LABX56).

## VII. REFERENCES

ABEGG B. (1996) — Klimaänderung Und Tourismus – Klimafolgenforschung Am Beispiel Des Wintertourismus In Den Schweizer Alpen. Schlussbericht Nfp 31, Zürich.

ABEGG B., S. AGRAWALA F. CRICK A. DE MONTFALCON (2007) — Climate Change Impacts And Adaptation On Winter Tourism. In S. Agrawal, Climate Change In The European Alps : Adapting Winter Tourism And Natural Hazards Management. *Oecd Publishing, Paris*. 25-60

ACHIN C., GEORGE-MARCELPOIL E. (2013) — Sorties De Pistes Pour La Performance Des Stations De Sports D'hiver. *Tourisme Et Territoires/ Tourism And Territories*. **3** 67-92

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*. **3** 281–300

BRUN E., P. DAVID M. SUDUL ET G. BRUNOT (1992) — A Numerical Model To Simulate Snowcover Stratigraphy For Operational Avalanche Forecasting. *J. Glaciol.* **38(128)** 13-22

BRUN E., E. MARTIN V. SIMON C. GENDRE C. ET C. COLÉOU (1989) — An Energy And Mass Model Of Snow Cover Suitable For Operational Avalanche Forecasting. *J. Glaciol.* **35(121)** 333-342

DAMM A., KÖBERL J., PRETTENTHALER F. (2014) — Does Artificial Snow Production Pay Under Future Climate Conditions? – A Case Study For A Vulnerable Ski Area In Austria. *Tour. Man.* **43** 8-21, Doi:10.1016/J.Tourman.2014.01.009

DURAND Y., E. BRUN L. MÉRINDOL G. GUYOMARCH B. LESAFFRE, ET E. MARTIN (1993) — A Meteorological Estimation Of Relevant Parameters For Snow Models. *Ann. Glaciol.* **18** 65-71

DURAND Y., GIRAUD G., BRUN E., MÉRINDOL L., ET MARTIN E. (1999) — A Computer-Based System Simulating Snowpack Structures As A Tool For Regional Avalanche Forecasting. *J. Glaciol.* **45** 469–484

DURAND Y., LATERNER M., GIRAUD G., ETCHEVERS P., LESAFFRE L., ET MÉRINDOL L. (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. Meteorol. Clim.* **48** 29–449

DURAND Y., LATERNER M., GIRAUD G., ETCHEVERS P., MÉRINDOL L., ET LESAFFRE B. (2009b) — Reanalysis Of 47 Yr Of Climate In The French Alps (1958-2005): climatology and trends for snow cover. *J. Appl. Meteorol. Clim.* **48** 2487–2512

ELSASSER, H ET BÜRKI R. (2002) — Climate Change As A Threat To Tourism In The Alps. *Clim. Res.* **20** 253-257

FAUVE M.; RHYNER H.; LÜTHI A.; SCHNEEBELI M.; LEHNING M., PUTTING (2008) — Snow Knowledge Into The Development Of Winter Sports Equipment. *Sports Technol.* **1(2-3)** 145-151

FLAGESTAD A ET HOPE C.A. (2001) — Stratégie Success In Winter Sports Destinations : A Sustainable Value Creation Perspective. *Tourism Management.* **22** 445-461

FIERZ C, ARMSTRONG RL, DURAND Y, ETCHEVERS P, GREENE E, MCCLUNG DM, NISHIMURA K, SATYAWALI PK, SOKRATOV SA. (2009) — The International Classification For Seasonal Snow On The Ground. *Ihp-Vii Technical Documents In Hydrology.* **83** 1

FRANÇOIS H., S. MORIN M. LAFAYASSE AND E. GEORGE-MARCELPOIL (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 Reg. Sci. Technol.* **108** 98–112, Doi : 10.1016/J.Coldregions.2014.08.005

FRANÇOIS H. (2007) — De La Station Ressource Pour Le Territoire Au Territoire Ressource Pour La Station. Le Cas Des Stations De Moyenne Montagne Periurbaines De Grenoble. *Phd Thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble*. 352 p.

FRANÇOIS H., GEORGE-MARCELPOIL E., FABLET G., BRAY F., ACHIN C., TORRE A., ET BARRE J.-B. (2012) — *Atlas Des Stations Du Massif Des Alpes, Irstea*. 103

GEORGE-MARCELPOIL E. ET H. FRANÇOIS (2012) — From Creating To Managing Resorts. *Revue De Géographie Alpine | Journal Of Alpine Research.* **100(3)** Doi :10.4000/Rga.1925

GERBAUX F., LANDMARKS: EUROPEAN AGRICULTURAL AND REGIONAL POLICIES IN FAVOUR OF LESS-FAVOURED AREAS AND MOUNTAIN AREAS (2004) — *Revue de Géographie Alpine | Journal of Alpine Research.* **92(2)** 14-16, doi 10.3406/rga.2004.2288

GERBAUX F. ET E. MARCELPOIL (2006) — Governance Of Mountain Resorts In France : The Nature Of The Public-Private Partnership. *Revue De Géographie Alpine.* **94(1)** 20-31, Doi : 10.3406/Rga.2006.2381

GOBIET A., S. KOTLARSKI, M. BENISTON, G. HEINRICH, J. RAJCAK, ET M. STOFFEL (2014) — 21st Century Climate Change In The European Alps-A Review. *Science Of The Total Environment.* Doi:10.1016/J.Scitotenv.2013.07.050

GUILY L. (1991) — *L'exploitation Technique Des Pistes De Ski Alpin Dans Le Domaine Skiable Français, These De Doctorat.*

KOENIG U. ET ABEGG B. (1997) — Impacts Of Climate Change On Winter Tourism In The Swiss Alps. *J. Sustain. Tourism.* 5-1

- LAFAYSSÉ M., B. HINGRAY, A. MEZGHANI, J. GAILHARD ET L. TERRAY (2014) — Internal Variability And Model Uncertainty Components In Future Hydrometeorological Projections: The Alpine Durance Basin. *Water Resour. Res.* **50** 3317–3341
- LAFAYSSÉ M., S. MORIN, C. COLÉOU, M. VERNAY, D. SERÇA, F. BESSON, J.-M. WILLEMET, G. GIRAUD ET Y. DURAND (2013) — Towards A New Chain Of Models For Avalanche Hazard Forecasting In French Mountain Ranges, Including Low Altitude Mountains. *Proceedings Of The International Snow Science Workshop Grenoble - Chamonix Mont-Blanc - 2013, 7-11 October, Grenoble, France.* 162-166
- LORIT J.-F. (1991) — *Enquete Sur Les Difficultes Des Stations De Sports D'hiver, Paris, Ministere De L'interieur.*
- LUTHE T., R. ROTH ET H. ELSASSER (2008) — Skisustain - Sustainable Management Of Ski Destinations In The Contexte Of Tourism Demand, Ski Area Strategies And Global Change. *Managing Alpine Future. Strategies In Global Change. Innsbruck, 15-17 Octobre 2007, Innsbruck University Press.*
- LUTHE T., WYSS R. ET SCHUCKERT M. (2012) — *Network Governance And Regional Resilience To Climate Change: Empirical Evidence From Mountain Tourism Communities. Regional Environmental Change.* Doi: 10.1007/S10113-012-0294-5
- LUTERBACHER J., M. A. LINIGER, A. MENZEL, N. ESTRELLA, P. M. DELLA-MARTA, C. PFISTER, T. RUTISHAUSER ET E. XOPLAKI, EXCEPTIONAL EUROPEAN WARMTH OF AUTUMN (2007) — 2007: Historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts. *Geophys. Res. Lett.* **34** L12704, doi:
- MARTIN E., BRUN E. ET DURAND Y. (1994) — Sensitivity Of The French Alps Snow Cover To The Variation Of Climatic Variables. *Annales Geophysicae.* **12** 469-477
- PASCAL R. (1993) — *Problemes Structurels Des Stations De Moyenne Montagne, Paris, Ministre De L'equipement, Des Transports Et Du Tourisme.*
- ROUSSELOT M., DURAND Y., GIRAUD G., MÉRINDOL L., DOMBROWSKI-ETCHEVERS I., DÉQUÉ M., ET 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
- SCOTT D., G. MCBOYLE ET B. MILLS (2003) — Climate Change And The Skiing Industry In Southern Ontario (Canada): Exploring The Importance Of Snowmaking As A Technical Adaptation. *Climate Research.* **23**(2) 171
- SCOTT D., MCBOYLE G. (2007) — *Climate Change In The Ski Industry, Mitig Adapt Strat Glob Change.* **12** 1411-1431
- SPANDRE P., FRANÇOIS H., MORIN S. ET GEORGE-MARCELPOIL E. DYNAMIQUE DE LA NEIGE DE CULTURE DANS LES ALPES FRANÇAISES : CONTEXTE CLIMATIQUE ET ETAT DES LIEUX — *Journal of Alpine Research | Revue de Géographie Alpine.* **103** 15-DOI 10.4000/rga.2840
- SPANDRE P., MORIN S., LAFAYSSÉ M., FRANÇOIS H., GEORGE-MARCELPOIL E. ET LEJEUNE Y. (2016) — Integrating Snow Management Processes Into A Detailed Snowpack Model. *Cold Reg Sci Technol.*
- STEGER C., KOTLARSKI S., JONAS T. ET SCHAR C. (2013) — Alpine snow cover in a changing climate: A regional climate model perspective. *Climate Dyn.* **41** 735-754
- STEIGER R. ET M. MAYER (2008) — Snowmaking And Climate Change. Future Options For Snow Production In Tyrolean Ski Resorts. *Mountain Research And Development.* **28**(3/4) 292-298. Doi:10.1659/Mrd.0978
- STEIGER R. (2010) — The Impact Of Climate Change On Ski Season Length And Snowmaking Requirements In Tyrol, Austria. *Climate Research.* **43**(3) 251-262
- STRASSER U., U. VILSMAIER, F. PRETTENHALER, T. MARKE, R. STEIGER, A. DAMM, F. HANZER, R.A.I. WILCKE, J. STÖTTER, (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
- SVENSSON B., NORDIN S. ET FLAGESTAD A. (2005) — A Governance Perspective On Destination Development – Exploringpartnerships, Clusters And Innovation Systems. *Tourism Review.* **60** (2)
- VIONNET V., BRUN E., MORIN S., BOONE A., FAROUX S., LE MOIGNE P., MARTIN E. ET WILLEMET J.-M. (2012) — The Detailed Snowpack Scheme Crocus And Its Implementation In Surfex V7.2. *Geosci. Model Dev.* **5** 773-791