

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
CHAPITRE I ETAT DE LA LITTERATURE & METHODOLOGIE DE RECHERCHE	7
I. La production de neige, enjeu de société.....	8
II. Etat de la littérature scientifique	16
III. Problématique de recherche	25
IV. Méthodologie de recherche : le choix d'une méthode mixte.....	25
V. Structuration du travail de thèse.....	27
CHAPITRE II L'EVOLUTION DES CONDITIONS D'ENNEIGEMENT A-T-ELLE UN IMPACT SUR LES INVESTISSEMENTS EN MATIERE D'ENNEIGEMENT DANS LES STATIONS DE SKI DES ALPES FRANÇAISES ?	29
I. Résumé long en français	31
II. Do changes in snow conditions have an impact on snowmaking investments in French Alps ski resorts?	36
CHAPITRE III ÉVOLUTION PASSEE DE LA FIABILITE DE L'ENNEIGEMENT NATUREL ET GERE DES STATIONS DE SKI DES ALPES FRANÇAISES DE 1961 A 2018	56
I. Résumé long en français	58
II. Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2018	63
CHAPITRE IV DEPENDANCE AU SENTIER ET EFFETS DE VERROUILLAGE DANS L'INDUSTRIE DES SPORTS D'HIVER: ETUDE DE CAS DE LA PRODUCTION DE NEIGE DANS LES ALPES FRANÇAISES ..	87
I. Résumé long en français	89
II. Path dependence and lock-in effects in the ski tourism industry: a case study for snowmaking in the French Alps.....	94
CHAPITRE V EQUIPEMENTS POUR LA PRODUCTION DE NEIGE DANS LES STATIONS DE SPORTS D'HIVER : ENTRE POLITIQUES DE SOUTIEN REGIONALES ET DECLINAISONS TERRITORIALES	112
ENJEUX ET CONCLUSION DE RECHERCHE.....	125
I. Enjeux et contributions du travail de recherche	125
II. Résumés des principaux résultats.....	127

ANNEXES	131
I. Annexes Chapitre I.....	132
II. Annexes Chapitre II.....	137
III. Annexes Chapitre IV.....	141
IV. Annexes Chapitre V.....	144
BIBLIOGRAPHIE	146
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	163
LISTE DES TABLES.....	166
TABLE DES MATIERES.....	168

ABBREVIATIONS

ACOSS	Agence centrale des organismes de sécurité sociale
ANMSM	Association Nationale des Maires des Stations de Montagne
AuRA	Auvergne-Rhône-Alpes
CEO	Chief Executive Officer
DDT	Direction départementale des Territoires
DREAL	Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DSF	Domaines Skiables de France
EBITDA	Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization
EEG	Evolutionary Economic Geography
ESF	Ecole du ski français
FE	Fixed-effect
FFS	Fédération française de ski
FNE	France Nature Environnement
FTE	Full-time equivalent
GEE	Géographie économique évolutionniste
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GLS	Generalized least squares
GMM	Generalized method of moments
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JSK	Journées skieurs
NEG	New economic geography
NOTRe	Nouvelle Organisation Territoriale de la République
NUTS	Nomenclature des unités territoriales statistiques
OLS	Ordinary least squares
OMT	Organisation mondiale du tourisme
PDG	Président-Directeur-Général
RE	Random effect
SROCC	Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate
STL	Système touristique localisé
TALC	Tourism area life cycle

PREAMBULE

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du Cross Disciplinary Project *Trajectories* financé par l'Idex de l'Université Grenoble Alpes, et a bénéficié d'un co-financement du CDP *Trajectories* et de Météo-France. Ce projet interdisciplinaire et transdisciplinaire, conduit de 2017 à 2020 s'est intéressé à l'étude des trajectoires des socio-écosystèmes de montagne. L'objectif était la création de connaissances permettant d'explorer l'évolution des interactions entre les sociétés humaines et leur environnement dans les régions alpines afin d'aider à l'adaptation des territoires. Le projet *Trajectories* a regroupé une centaine de chercheurs de la communauté scientifique travaillant sur les Alpes françaises, ainsi qu'une quinzaine de doctorants et post-doctorants dans plusieurs disciplines : écologie, climatologie, histoire, géographie, informatique et sciences humaines et politiques. Le projet *Trajectories* s'est articulé autour de 5 axes de recherche (work packages, WP) :

- WP1 : Développer des outils innovants pour construire des passerelles entre la production de connaissances et les besoins des utilisateurs au sein des territoires.
- WP2 : Construire un système intégré d'acquisition et de gestion des données socio-environnementales.
- WP3 : Développer et appliquer des modèles de la dynamique des socio-écosystèmes face aux changements globaux.
- WP4 : Reconstruire les trajectoires socio-écologiques passées sur la base des observations et de la modélisation.
- WP5 : Co-construire avec les acteurs des territoires des trajectoires d'adaptation futures au changement global.

Ce travail de thèse contribue principalement aux WP3 et WP4 avec le développement de modèles retraçant la dynamique de croissance de la production de neige et la reconstruction des trajectoires passées des stations des sports d'hiver des Alpes françaises.

INTRODUCTION

L'industrie des sports d'hiver connaît depuis plusieurs décennies de profondes évolutions qui ont entraîné une série de restructurations d'un secteur économique caractéristique de certains territoires de montagne. La récente crise de la COVID-19 a durement affecté l'industrie touristique et montré la dépendance de certaines destinations aux touristes internationaux. Gossling et al. (2021), dans leur étude sur l'impact de la COVID-19 sur le tourisme international, estiment que le tourisme intérieur peut jouer un rôle déterminant dans la reprise et la transformation à long terme de l'industrie du tourisme, notamment pour accompagner ces destinations vers plus de résilience. Dans une étude sur l'évolution de l'offre et de la demande touristique des stations de sports d'hiver canadiennes de l'Ontario, Scott et al. (2020c) suggèrent que la crise sanitaire de la COVID-19, ajoutée à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées au tourisme pour limiter l'ampleur du changement climatique futur, pourraient favoriser le marché domestique canadien des sports d'hiver. De son côté, l'industrie française des sports d'hiver a connu une saison blanche lors de l'hiver 2020-2021 avec la fermeture de l'ensemble des remontées mécaniques (François et al., 2021). Il est cependant encore trop tôt pour connaître les éventuels changements dans le comportement de la demande touristique et ses effets sur la fréquentation hivernale.

Hormis la récente crise liée au COVID-19, l'industrie des sports d'hiver fait face à des défis et des problèmes structurels depuis environ trois décennies. Le secteur des sports d'hiver en France est un marché très mature qui doit composer avec une demande stagnante voire en déclin (Vanat, 2018). En plus de la maturité de son marché, Bourdeau (2008) dresse un bilan critique de l'industrie des sports d'hiver. Il mentionne l'usure du produit ski traditionnel, la prise en compte tardive de la question environnementale par les opérateurs de domaines skiables, une offre touristique encore trop standardisée et la détérioration de l'imaginaire touristique associé au tourisme des sports d'hiver. Pröbstl-Haider et al. (2019) montrent dans leur ouvrage que les difficultés constatées dans l'industrie française des sports d'hiver sont, en grande partie, partagées avec d'autres destinations européennes. Ainsi l'évolution de la demande touristique ou la mise en concurrence avec d'autres destinations sont des changements qui touchent toutes les destinations européennes des sports d'hiver. Concernant l'offre touristique, George-Marcelpoil & François (2012) ont souligné que l'industrie des sports d'hiver était passée à partir de la fin des années 1980 d'un stade de construction et de développement des stations à un stade de gestion et de rationalisation du parc existant. Concernant le marché des fournisseurs des opérateurs de domaines skiables, Mayer (2009) observe une consolidation des acteurs dans le secteur des remontées mécaniques. Depuis le début des années 1990 et la fermeture de certaines stations très déficitaires (Lorit et al., 1990), la situation financière des communes dotées de stations de ski est un point de vigilance pour les pouvoirs publics. Le lourd endettement des collectivités locales développant des activités de sports d'hiver a été plusieurs fois pointé par la Cour des comptes (2011, 2018). Enfin, les 3 hivers sans neige de la fin des années 1980 et du début des années 1990, ont mis la question de la dépendance

à l'enneigement de l'industrie des sports d'hiver à l'agenda des gestionnaires de domaines skiables. Le changement climatique et ses risques avérés pour l'industrie des sports d'hiver se sont eux progressivement affirmés depuis les années 1990 comme un enjeu majeur pour les sociétés vivant en montagne. Ainsi, en 2019, le rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique confirme la réduction du manteau neigeux à basse et moyenne altitude dans les régions de montagne (GIEC,2019). Face à cette situation, la production de neige est la technique d'adaptation au changement climatique la plus largement répandue dans l'industrie des sports d'hiver (Abegg et al., 2007). Les projections climatiques futures prévoient néanmoins une probable diminution de 10 à 40 % de l'épaisseur moyenne de neige en hiver à basse altitude en 2031–2050 par rapport à 1986–2005 (Hock et al., 2019). Les territoires touristiques de montagne seront donc affectés négativement par ces changements à venir. Les communautés montagnardes qui dépendent du tourisme feront notamment face à un risque financier élevé causé par les pertes de revenus liées aux activités touristiques hivernales (Hock et al., 2019).

La production de neige est devenue une thématique au centre de nombreux enjeux notamment au regard de sa soutenabilité à court comme à moyen terme. En effet, son efficacité repose sur des pré-requis d'ordre technique, notamment la disponibilité de créneaux de froid et la présence d'une ressource en eau suffisante. La viabilité économique de cette pratique est aussi questionnée au regard des coûts de fonctionnement et d'investissement qu'elle nécessite. Ce travail de recherche entend contribuer à une meilleure compréhension des dynamiques d'évolution de l'équipement en production de neige dans les Alpes françaises, ainsi qu'aux trajectoires prises par les domaines skiables dans leur développement touristique.

Chapitre I
ÉTAT DE LA LITTÉRATURE
&
METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Rapport-Gratuit.com

I. LA PRODUCTION DE NEIGE, ENJEU DE SOCIETE

La production de neige aussi appelée « neige de culture » ou « neige artificielle » est une thématique au cœur de multiples enjeux. En effet, c'est une technologie largement répandue et utilisée dans l'industrie des sports d'hiver où elle sert à sécuriser la mise en œuvre d'une activité touristique météo-dépendante. La généralisation de son utilisation en fait d'ailleurs un objet discuté au-delà de la filière des sports d'hiver. Son empreinte environnementale ainsi que sa capacité à moyen et long terme à faire face aux impacts du changement climatique sont régulièrement critiquées, voire accusées de conduire les territoires à une impasse. Enfin les aménagements associés au développement d'installations de production de neige ravivent les débats sur l'aménagement et l'artificialisation des espaces de montagne. Aux discussions que suscite la production de neige dans l'opinion publique s'ajoutent les positions que prennent les différents pouvoirs publics impliqués de longue date dans le développement et le soutien de la filière des sports d'hiver.

1. Un sujet de débat public

La production de neige est un sujet propice aux débats entre d'un côté, un usage revendiqué et soutenu par les professionnels de l'industrie du ski et de l'autre, une dénonciation de son emploi systématique, notamment par les associations environnementales. Giaccone (2019) a montré que la production de neige était devenue, depuis plusieurs années, un sujet médiatique. Une recherche des articles dans la presse nationale française mentionnant les termes de « neige de culture », « neige artificielle » ou « canons à neige », et en utilisant la base de données en ligne Europresse, nous a permis de recenser 88 articles entre 1993 et 2019 abordant ce sujet (Voir Annexe Table 14 pour la liste complète des articles recensés). La Figure 1 présente le nombre d'articles s'intéressant à la production de neige par année ; elle montre une augmentation sensible des publications sur les 4 dernières années (2015 à 2019), avec en moyenne entre 3 et 6 articles par an sur le sujet.

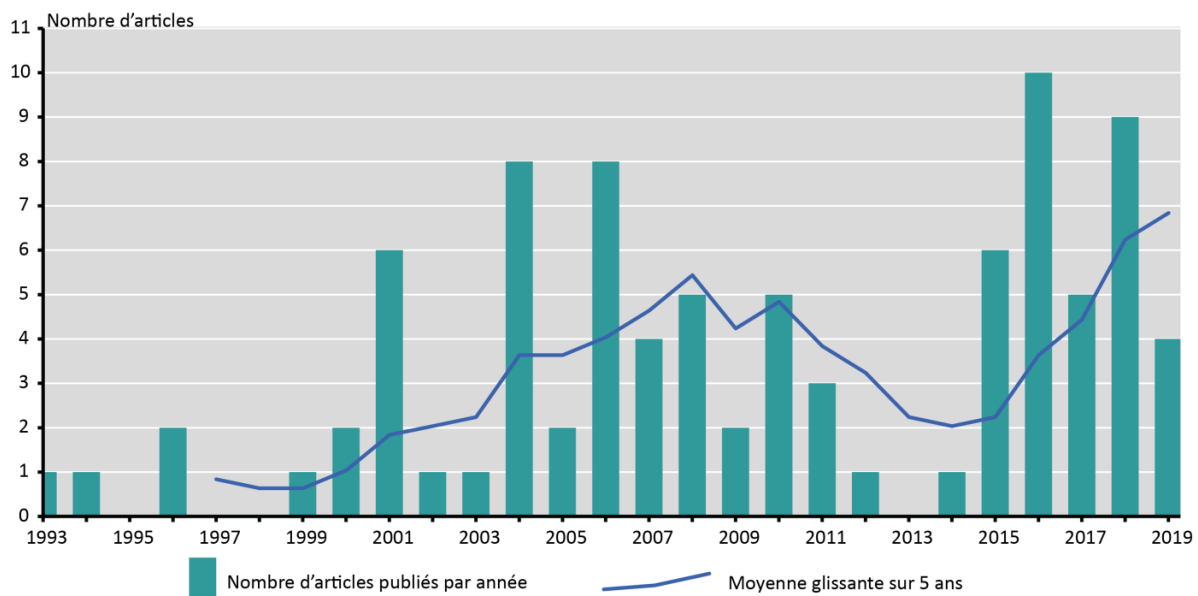


Figure 1. Nombre d'articles dans la presse nationale s'intéressant à la production de neige entre 1993 et 2019 (élaboration L. Bérard-Chenu)

La production de neige est le plus souvent traitée dans les médias au début ou pendant la saison hivernale. Paccard notait dès 2010 une évolution concernant la perception publique de l'emploi de la production de neige, évoquant des débuts marqués par « un regard enthousiaste sur l'intérêt de l'outil » à une situation actuelle qu'il qualifiait de « prudente quant à ses implications » (Paccard, 2010, p. 226). L'analyse des contenus des articles de la presse nationale sur la période 1993-2019 est cohérente avec cette synthèse. En effet, les premiers articles sont relativement neutres quant à l'utilisation de la production de neige, tandis qu'au tournant des années 2000, son utilisation est régulièrement questionnée voire dénoncée, notamment pour ses conséquences sur la ressource en eau. Les controverses sur l'usage de la production de neige ont augmenté à mesure que cette pratique se généralisait dans l'industrie des sports d'hiver.

Concernant les termes employés pour mentionner cette technologie, Magnier (2013) fait le constat d'un basculement sémantique, avec la raréfaction dans les documents officiels comme médiatiques de l'utilisation des termes de «neige artificielle» et «canon à neige» au profit de «neige de culture» et « enneigreur ». Le glissement sémantique est le résultat d'une opération de communication au long cours des domaines skiables. Le syndicat professionnel des remontées mécaniques, Domaines Skiables de France (DSF), produit une première campagne de communication en 2008 intitulée « les talents insoupçonnés de la neige de culture ». En 2018, DSF, en partenariat avec l'Ecole du Ski Français (ESF) et l'ANMSM (Association Nationale des Maires des Stations de Montagne), a réalisé une nouvelle campagne de communication pour rappeler le vocabulaire qu'il préconise d'utiliser. En opposition, les associations de protection de la nature et de l'environnement telle que France Nature Environnement (FNE) préfèrent généralement des termes différents. La Table 1 présente les différences sémantiques au sujet de la production de neige.

Dans le cadre de notre travail de recherche, nous avons fait le choix d'utiliser, en anglais, le terme largement utilisé dans la communauté scientifique de « snowmaking » et en français celui de « production de neige ».

Table 1. Différences sémantiques concernant la production de neige entre le discours des acteurs du tourisme hivernal (à gauche) et celui des associations de protection de la nature et de l'environnement (à droite).

Exemple de discours des acteurs du tourisme hivernal	Exemple de discours d'associations de protection de la nature et de l'environnement
« On ne dit pas neige artificielle, on dit neige de culture. La neige de culture, ce n'est que de l'eau transformée en cristaux de neige sous l'effet des basses températures. »	« La neige artificielle (NA) - que nous nous refusons à appeler "neige de culture" parce que nous ne voyons pas ce qu'il y a de " culture" dans de la production de grains de glace amorphe, qui ne sont pas des cristaux, et donc pas de la neige -, est ensuite utilisée, soit en sous couche de piste en avant saison, soit en rajout et en mélange avec de la neige naturelle en cours de saison. »
« On ne dit pas canon à neige, on dit enneigreur. En raison de la haute technologie des équipements et de la vocation "tourisme" de l'activité des domaines skiables, le terme enneigreur est plus approprié que celui de canon à neige. »	« Alors les canons sont « tirés » dès la mi-novembre [...] »
« On ne dit pas consommation d'eau, on dit prélèvement d'eau. L'eau est restituée lors de la fonte de la neige, directement dans le milieu où elle a été prélevée. Ce prélèvement est donc temporaire. »	« La production de NA [neige artificielle] est fortement consommatrice d'eau [...] »
Sources : extrait de « La neige de culture – les fondamentaux », document de promotion grand public produit par l'ANMSM, l'ESF et DSF de 2018	Source : Extraits de la « Neige artificielle - note de positionnement » – France Nature Environnement, section AuRA - actualisée en décembre 2018

2. Une pratique ancienne pour les opérateurs de domaines skiables

Si la production de neige comme sujet médiatique a gagné en importance ces dernières années, son usage et sa banalisation dans la filière des sports d'hiver s'avèrent plus anciens. Une étude des archives du magazine *Montagne Leaders*¹ permet de constater que les questionnements associés à la production de neige sont relativement anciens dans ce secteur. Le magazine, fondé en 1975, propose dès ses premiers numéros (n°5 - avril 1976, n°6 - juin-septembre 1976 et n°8 - décembre-janvier 1977) des articles dédiés à la production de neige dont un article traitant spécialement de la dimension économique de cette pratique. Dans les années suivantes, on note plusieurs publiereportages sur les progrès techniques (n°12 de septembre-octobre 1977 et n°19 d'avril-mai 1979) ou sur des nouvelles installations en production de neige (n°23/24 de mars-avril 1980) rédigés par des fabricants d'enneigeurs. En mars 1981, le magazine lui consacre un dossier spécifique de 20 pages, intitulé « Neige artificielle. L'ère du canon », avec le texte suivant :

« Faute de neige, la zone de montagne des Alpes du Sud vient de perdre près de 15 milliards de centimes et songe à se déclarer « zone sinistrée ». Avec des installations de production de neige, il eut été possible de limiter les effets de cette situation catastrophique. Aujourd'hui si la neige de culture ne peut pas tout, elle permet cependant beaucoup et tend à devenir à l'industrie touristique d'hiver, ce que l'irrigation est à l'agriculture » (extrait Aménagement et Montagne n°28 - février/mars 1981 - p.23)

La taille du dossier - 20 pages -, alors que les premiers magazines comptent une cinquantaine de pages au total - ainsi que l'extrait du chapeau sont révélateurs de l'attention accordée dès cette époque à la production de neige au sein de la profession. Le magazine indique que les stations de Flaine, Val Cenis (Alpes du Nord), de la Bresse (Vosges), et de Métabief (Jura) sont déjà équipées en production de neige. Enfin, dès le lancement des premières enquêtes annuelles sur les investissements réalisés par les opérateurs de domaines skiables au début des années 1990, le magazine *Aménagement et Montagne* tient compte de la production de neige parmi les investissements considérés dans son enquête.

Dans sa dernière campagne de communication en 2018, DSF considérait la production de neige comme un « élément essentiel et incontournable de l'économie des zones de montagne » (DSF et al., 2018). DSF met en avant la production de neige comme un élément permettant de réduire l'exposition à l'aléa climatique des opérateurs de domaines skiables. Pour étayer cette position, DSF et l'ANMSM s'appuient sur une comparaison entre les chiffres d'affaires des domaines skiables de 2 saisons connues pour être des hivers faiblement enneigés : les hivers 1988-1989 et 2006-2007. Entre ces deux saisons, les superficies équipées en production de neige des domaines skiables sont passées d'environ 2% en 1989 à 15% en 2007 (Spandre et al., 2015). En 2015, DSF et l'ANMSM estiment

¹ Jusqu'en 2003 *Aménagement et Montagne*, magazine professionnel de référence au sein de l'industrie des sports d'hiver français.

qu'avec la production de neige, associée au damage et à l'aménagement des pistes, « en 25 ans, l'exposition des stations à l'aléa climatique a été divisée par 3 » (DSF & ANMSM, 2015).

Bien que la médiatisation grand public des pratiques de production de neige soit apparue à la fin des années 1990, au moment où la pratique se généralisait, les opérateurs de domaines skiables étaient familiarisés avec cette technologie dès la fin des années 1970. La question de la consommation énergétique ainsi que celle des coûts associés à la production de neige étaient présentes dès les débuts de cette pratique. L'enjeu autour de la ressource en eau n'arrivera dans le débat public qu'à la fin des années 1990, à la suite de progrès techniques de la part des fabricants et de l'essor de la pratique qui coïncide aussi avec la tendance généralisée à l'édification de retenues d'altitude sur les domaines skiables.

3. Positions des organismes et pouvoirs publics à l'égard de la production de neige

En fonction de l'échelle considérée, la position des organismes internationaux et des pouvoirs publics est variable à l'égard de la production de neige. Nous décrivons ci-après les positions de l'Organisation Mondiale du Tourisme, des Etats et leurs gouvernements ainsi que celle des collectivités territoriales.

1. L'Organisation Mondiale du Tourisme

La production de neige a récemment été abordée dans un rapport de l'Organisation Mondiale du Tourisme (OMT) dédié au tourisme durable en montagne (OMT, Keller et al., 2018). Elle y est évoquée dans la section du rapport s'intéressant aux « Facteurs clés du succès des stations de montagne » :

« In the absence of good conditions for snowfall, artificial snowmaking equipment has proven useful and is already being widely applied. However, this method of providing sufficient snow cover has two major disadvantages. First, it needs low temperatures to make the technology applicable and second, the installation of the necessary infrastructure and the operation result in high costs for the ski resort operators. In positive terms, a solid foundation of artificially produced snow at the beginning of the season represents at least a fairly sustainable solution » (OMT, Keller et al., 2018, p. 97)

L'extrait du rapport montre que l'organisation reconnaît l'intérêt de la production de neige, mais sous certaines conditions, notamment météorologiques et économiques. La question environnementale de même que les impacts du changement climatique sont relativement peu évoqués dans ce rapport et ne sont pas directement associés aux enjeux de soutenabilité de la pratique de la production de neige.

Outre l'OMT, au niveau international, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a mis en perspective la pratique de la production de neige dans le tourisme des sports d'hiver avec la question du changement climatique, dans le cadre de ses rapports d'évaluation.

2. Commentaires des gouvernements pour le rapport spécial du GIEC

Les Etats membres du GIEC (groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat) constituent la maîtrise d'ouvrage des rapports du GIEC, et contribuent à la rédaction du « résumé à l'intention des décideurs ». Ce résumé est en effet examiné et adopté ligne par ligne par les représentants des Etats, en échange avec les scientifiques. L'objectif de la révision par les représentants des Etats est de s'assurer que la formulation du résumé est précise et répond à leurs attentes d'informations sur l'évolution climatique, ses conséquences, et les moyens d'en limiter les effets négatifs. Les rapports produits par le GIEC doivent avoir une pertinence politique sans être prescriptifs.

Table 2. Extraits des remarques formulées par les Etats à l'égard de la production de neige à l'occasion de leurs relectures de la dernière version préalable à l'approbation du résumé à l'intention des décideurs du rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique (SROCC) du GIEC [notre traduction]

Extrait remarque 1	N'y a-t-il pas d'impacts négatifs [de la production de neige] sur l'environnement? Veuillez mettre en garde contre cet « enneigement artificiel efficace en de nombreux endroits ».
Extrait remarque 2	Mettez en garde contre cette « fabrication efficace de neige artificielle dans de nombreux endroits ». Comme nous le savons tous, l'enneigement artificiel pose des problèmes en termes de coût des ressources (...), d'utilisation de l'énergie/électricité pour produire la neige (...).
Extrait remarque 3	En fonction du contexte, «l'enneigement artificiel » semble être présenté d'une bonne manière. Cependant, il s'agit d'une méthode quelque peu consommatrice car elle ne peut pas être utilisée à grande échelle sous les tropiques.
Extrait remarque 4	Suggérons de remplacer «neige artificielle » par «technologie de fabrication de la neige ». La neige n'est pas artificielle en soi
Extrait remarque 5	[La production de neige] doit être supprimée en tant qu'exemple d'une option d'adaptation réussie, ou doit être soigneusement qualifiée, en soulignant le risque élevé de maladaptation.
Extrait remarque 6	Le point (...) tel qu'il est rédigé pourrait donner l'impression trompeuse que [la production de neige] continuera à être une forme efficace d'adaptation.
Extrait remarque 7	[La production de neige] n'est pas une option durable et elle ne devrait donc pas être présentée comme une mesure d'adaptation appropriée et efficace.
Extrait remarque 8	[La production de neige] est efficace uniquement lorsque diverses conditions sont réunies.
Extrait remarque 9	Il est suggéré (...) d'ajouter un qualificatif indiquant clairement que la fabrication de neige artificielle n'est pas une solution viable.
Extrait remarque 10	La fabrication de neige artificielle est une mesure d'adaptation qui n'est pas durable et ne devrait donc pas être présentée comme une mesure appropriée.

Les remarques faites par les représentants des Etats dans le cadre de la rédaction du résumé à l'intention des décideurs tiré du rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique (GIEC, 2019) permettent d'avoir un aperçu de la position des représentants des Etats sur la pratique de la production de neige. Le passage concernant la production de neige dans la dernière version intermédiaire du résumé à l'intention des décideurs a reçu 10 commentaires présentés dans la Table 2 (voir les commentaires complets en anglais en Annexes Table 15). Sur ces 10 remarques, une seule

apparaît comme favorable à la production de neige (remarque 4) tandis que les 9 autres remarques militent pour une mise en garde renforcée quant à l'usage actuel et futur de la production de neige comme technique d'adaptation de l'industrie des sports d'hiver pour faire face aux impacts du changement climatique. Alors que les remarques formulées par les représentants des Etats tendent le plus souvent à rappeler aux rédacteurs scientifiques du rapport de ne pas prescrire des choix de nature politique, la Table 2 nous montre que les Etats trouvent la rédaction initiale trop accommodante avec la production de neige. Les gouvernements souhaitent que le rapport mette davantage en garde contre les menaces quant à l'utilisation de cette technologie, voire la dénonce. Les représentants des gouvernements considèrent donc avec la plus grande réserve la production de neige, notamment au regard de ses coûts et de ses impacts sur l'environnement et encouragent les auteurs à endosser cette présentation. Cette posture est assez surprenante au regard de la nature non prescriptive des travaux du GIEC. Les commentaires formulés dépassent ici l'enjeu de clarification de la rédaction pour proposer une lecture empreinte de présupposés des relecteurs au sujet de la production de neige.

3. Les collectivités locales en France et en Europe

Il est difficile d'avoir une vision d'ensemble des différentes positions tenues par les collectivités locales à l'égard de la production de neige. Au niveau européen, les collectivités locales, voire les Etats, soutiennent ou ont soutenu cette pratique que ce soit en Suisse au niveau fédéral et cantonal (Gonseth, 2008) mais aussi en Autriche au niveau national et régional (Falk & Steiger, 2019; Pröbstl-Haider, 2019) ou encore en Italie (Joly & Ungureanu, 2018). Au niveau national français, et même si la montagne occupe une place moins centrale que chez nos voisins européens, on peut rappeler le rapport Badré et al. (2009) qui visait à réaliser un état des lieux de la production de neige. Au niveau infra-national, on constate une absence de vision consolidée à l'échelle des collectivités territoriales. En effet, avoir une vue d'ensemble s'avère difficile tant les dispositifs d'intervention ou d'aide en faveur de la production de neige peuvent prendre des formes diverses : subventions d'équipement ou d'investissement, aides à la réalisation d'étude, achats directs d'équipements, variété des programmes publics etc. De plus, la position des collectivités territoriales n'est pas immuable, elle peut notamment évoluer suite au changement d'exécutifs politiques.

Concernant les régions, elles ont la possibilité de se positionner sur la thématique de la production de neige compte-tenu de leur compétence en matière de développement économique qui leur permet notamment d'aider les entreprises. Des politiques favorables à l'équipement de systèmes de production de neige ont été mises en place à partir de 2016 dans les Régions Auvergne-Rhône-Alpes, Sud et Grand-Est tandis que la région Nouvelle Aquitaine signifiait son refus de financer des installations de production de neige. Historiquement, les départements ont pu jouer un rôle d'accompagnement et de soutien dans le développement du tourisme des sports d'hiver. On observe des positions variables concernant la production de neige. Ainsi, certaines collectivités ne soutiennent pas cette pratique tandis que d'autres y consacrent un programme spécifique comme les départements de la Haute-Savoie ou de l'Isère. Là aussi les positions peuvent évoluer à l'image du département de la Savoie qui n'a pas aujourd'hui de programme spécifique,

contrairement à la période 2008-2013 et son programme de soutien à la production de neige. Enfin pour l'échelon communal, la loi Montagne de 1985 a consacré le rôle des communes en tant qu'autorités responsables des services de remontées mécaniques. Les communes occupent donc un rôle déterminant dans l'orientation des choix de développement des domaines skiables, au même titre que certaines intercommunalités qui depuis la loi NOTRe de 2015 et du transfert de la compétence tourisme, peuvent être de plus en plus impliquées dans l'équipement et la gestion des domaines skiables.

De manière générale, les positions des collectivités régionales, départementales et locales à l'égard de la production de neige ont été peu étudiées à l'échelle du contexte français. Pourtant, nous avons vu que la production de neige est principalement abordée dans le débat public en lien avec les impacts du changement climatique dans l'industrie des sports d'hiver. Largement répandue chez les opérateurs de domaines skiables, cette pratique a été médiatisée et suscite des interrogations quant à sa soutenabilité future. Les attentes sociétales vis-à-vis de la recherche existent afin que cette dernière apporte des éclairages quant au devenir et aux implications de cette pratique. Ces attentes rejoignent d'une certaine manière les interrogations sur l'évolution des territoires touristiques de montagne dans le cadre des changements globaux auxquels ils font face.

II. ÉTAT DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

En parallèle des débats et controverses qu'elle suscite, la production de neige est devenue une thématique de plus en plus étudiée dans le champ scientifique. L'essor de la production de neige dans le cadre du changement climatique est un sujet au cœur des travaux sur la vulnérabilité de l'industrie des sports d'hiver. Ces travaux se développent en parallèle d'une littérature plus ancienne s'intéressant aux trajectoires d'évolution des destinations touristiques. La production de neige apparaît comme une technologie pouvant avoir un effet substantiel dans l'orientation du développement des économies touristiques des territoires de montagne. Cependant la capacité de la production de neige à orienter les trajectoires d'évolution des territoires touristiques de montagne a jusqu'ici été négligée. Une analyse fine des dynamiques de croissance de la production de neige dans les domaines skiables et ses effets sur l'ensemble de l'industrie des sports d'hiver français sont aujourd'hui des éléments manquants.

1. Lieux touristiques et trajectoire d'évolution

Le développement des destinations touristiques et de leurs évolutions est un des objets les plus étudiés dans la recherche en géographie sur le tourisme. Les modèles proposés sont nombreux et traduisent à la fois la diversité des approches et la complexité des phénomènes à modéliser. Les réflexions en géographie économique, notamment l'approche évolutionniste, offrent un cadre théorique novateur pour analyser l'influence de la production de neige dans les trajectoires d'évolution des territoires touristiques de montagne.

1. Théories d'évolution des destinations touristiques

L'étude de l'évolution des lieux touristiques constitue un domaine de recherche fécond en géographie où l'évolution des lieux a souvent été schématisée selon une trajectoire en courbe. Brouder, Clavé, Gill, & Ioannides (2016) ont identifié dans leur revue de littérature sur l'évolution des destinations touristiques pas moins de 23 contributions théoriques entre 1939 et 2014. Le modèle le plus utilisé est celui du cycle de vie d'un lieu touristique (*tourism area life cycle* – TALC) proposé par Butler (1980) qui se caractérise par 5 étapes de développement suivi d'une sixième étape pouvant prendre plusieurs formes entre un renouvellement du lieu touristique ou son déclin. Dans la théorie que propose Butler, le développement d'un lieu touristique se fait en fonction d'une capacité de charge du lieu qui, lorsqu'elle est atteinte, caractérise la phase de stagnation du lieu touristique.

Sanz-Ibáñez & Clavé (2014) précisent que ce modèle a été abondamment discuté, modifié et réfuté y compris par son auteur qui lui proposa des révisions (Butler, 2005). Les chercheurs de l'Equipe MIT (2002, 2005, 2011) considèrent que les lieux touristiques n'ont pas une vocation intrinsèque à être touristique ou à entrer en déclin sous les effets d'un tourisme de masse comme le suggère Butler. Les chercheurs de l'Equipe MIT estiment que le tourisme possède une capacité à faire émerger des lieux touristiques associés à des pratiques et des systèmes d'acteurs qui leur sont propres. Darbellay et al. (2011), poursuivant les réflexions de l'Équipe MIT, proposent le cadre conceptuel du « capital

touristique » qu'ils définissent comme la somme de 6 sous-capitaux: urbain, monétaire, ressourciel, réputationnel, de gouvernance et cognitif. Clivaz et al. (2014) proposent d'articuler le concept de capital touristique avec un modèle d'évolution en abîme/métamorphose. Ces deux modèles combinés permettent de définir trois trajectoires typiques d'évolution des lieux touristiques: celle du relais, de la métamorphose ou de l'abîme. En fonction de la capacité des parties-prenantes d'une destination à renouveler le capital touristique et ses différents sous-capitaux, celle-ci peut soit disparaître par l'arrêt des pratiques touristiques (abîme) ou par la mutation économique des lieux (métamorphose) soit parvenir à demeurer un lieu touristique (relais). Les auteurs mobilisent notamment ces concepts pour analyser l'évolution des destinations sur des périodes parfois centennales (Stock et al., 2020), notamment des stations alpines suisses.

Ces dernières années, les recherches menées sur l'évolution des lieux touristiques ont été influencées par les réflexions théoriques menées dans le champ de la géographie économique évolutionniste. Bien que son emploi soit encore très peu développé pour étudier les destinations de montagne, le champ de la géographie économique évolutionniste apporte de nouveaux cadres conceptuels pour analyser les dynamiques d'évolution et l'orientation des trajectoires de développement des lieux touristiques. Nous allons voir comment la géographie économique évolutionniste et notamment la dépendance au sentier peut nous permettre d'étudier la dynamique de développement de la production de neige.

2. L'approche par la géographie économique évolutionniste et la notion de dépendance au sentier

Pour Boulay & Grandclément (2019), il est difficile de proposer une définition de ce que recouvre la géographie économique. Cette difficulté s'explique selon les auteurs par plusieurs facteurs : l'absence d'un corpus théorique unifié et stable, les différents tournants pris par cette discipline ainsi que les frontières floues entre géographie économique et économie. Généau de Lamarlière (2013) dans le dictionnaire de la Géographie de Lévy & Lussault (2013) décrit la géographie économique comme le champ de la géographie qui s'intéresse aux rapports « entre spatialité et dimension économique ». La géographie économique a connu un regain d'intérêt depuis les années 1990 sous l'influence des travaux menés en économie, notamment sous l'influence de Krugman (1991) et de la *New economic geography* (NEG) qui renouvelle les approches spatiales dans la science économique. La géographie économique évolutionniste (GEE) s'est développée elle aussi à partir des années 1990 et fait partie des nombreux sous-champs de la géographie économique. La notion de dépendance au sentier, issue des travaux menés en science économique, est un des piliers théoriques de la géographie économique évolutionniste. Le concept de dépendance au sentier a été initialement développé par les économistes Arthur (1988, 1989) et David (1985) avant de devenir un domaine de recherche établi. David a décrit la dépendance au sentier comme l'effet d'un « verrouillage » technologique, c'est à dire la tendance de certains domaines technologiques à s'enfermer dans une trajectoire, même si des technologies alternatives plus efficaces sont disponibles. Arthur (1994) définit la dépendance au sentier comme un processus de rendements croissants dans lequel des mécanismes d'externalité et d'apprentissage produisent des rétroactions positives qui renforcent les voies de développement existantes.

La GEE comme sous-champ de la géographie économique s'est progressivement affirmée comme un des cadres d'analyse pour étudier l'évolution des économies régionales. La dépendance au sentier permet d'étudier l'évolution d'un système (une entreprise ou l'économie d'une région) ayant une tendance à aller vers un renforcement de son modèle de fonctionnement. L'approfondissement des cadres théoriques de la dépendance au sentier et de la géographie économique évolutionniste ont été abondamment discutés ces dernières années (Boschma & Frenken, 2006; Boschma & Martin, 2007; MacKinnon et al., 2009; R. Martin & Sunley, 2006, 2015) et la place de l'approche évolutionniste en géographie économique est toujours en discussion (MacKinnon et al., 2019; Pike et al., 2016).

Dans les travaux s'intéressant au tourisme, Williams (2014) considère la géographie économique évolutionniste comme une approche prometteuse pour renouveler les modèles d'analyse de l'évolution des destinations touristiques. Ces dernières années, plusieurs auteurs ont inscrit leurs travaux dans ce cadre conceptuel et ont mobilisé plus particulièrement le concept de dépendance au sentier pour analyser l'évolution des lieux touristiques (Brouder, Clavé, Gill, Ioannides, et al., 2016; Brouder & Eriksson, 2013; Halkier et al., 2019; Ma & Hassink, 2013; Müller, 2019). Ainsi, les choix de développement touristique réalisés à un instant donné conditionnent les choix de développement ultérieurs. La notion de dépendance au sentier n'a cependant pas été employée pour analyser les évolutions des destinations de sports d'hiver, excepté via les approches monographiques menées par Gill & Williams (2014, 2016) pour la station canadienne de Whistler.

La GEE et la notion de dépendance au sentier n'ont, à notre connaissance, pas encore été employées dans les recherches francophones sur les lieux touristiques. Concernant les évolutions auxquelles les domaines skiables sont confrontés depuis une trentaine d'années, elles ont donné lieu à plusieurs travaux scientifiques. Plutôt que de parler de verrouillage, ces études mentionnent une évolution des domaines skiables selon une trajectoire de « fuite en avant ».

2. Evolutions de l'industrie française des sports d'hiver

Dès la fin des années 1950, Veyret-Verner (1959) considère le tourisme hivernal français comme la « deuxième révolution économique et démographique » des Alpes. Les pratiques aménagistes qui accompagnent le phénomène touristique produisent « la station de sports d'hiver », que Préau (1968) puis Knafo (1978) décrivent, notamment à l'aide de typologies. Les critiques concernant l'aménagement et le développement touristique dans les territoires de montagne apparaissent dès le milieu des années 1970 (voir les compte-rendu critiques de Gumuchian, 1976). Selon Knafo (1997), les hivers faiblement enneigés à la fin des années 80 et au début des années 90, combinés au ralentissement de la croissance de la demande puis à sa stagnation, sont les révélateurs d'une crise structurelle de l'industrie françaises des sports d'hiver. Dans ce contexte, les dynamiques de croissance observées dans le domaine de l'offre, que ce soit dans le secteur de l'immobilier de loisir ou dans le parc de remontées mécaniques, vont être qualifiées de « fuite en avant ». Utilisé la première fois par Knafo pour parler du développement des grandes stations (1987), le terme est ensuite repris par Chabert (1988) toujours au sujet du développement des stations. Le rapport Lorit (1990) emploie ce terme au sujet de l'endettement des collectivités supports de

station de montagne, de même que Perret (1993) pour décrire le modèle de croissance des stations de ski. Gauchon (1997) décline la « fuite en avant » au sujet des aides publiques apportées aux stations des Pyrénées tandis que Chevallier parle du développement des territoires de montagne « version ski, version « fuite en avant », version FFS, compétition, canons à neige [qui] restent [...] une mythologie vivace et signifiante en terme de destin collectif, de développement, d'identité montagnarde » (Chevallier, 1997, p. 169). Le terme est repris par Bourdeau (2008, 2009) ainsi que par Clarimont et Vlès (2009) au sujet des investissements réalisés dans les stations. Fablet utilise aussi cette expression au sujet de l'immobilier touristique (2013). Enfin Bonnemains déclare, concernant le modèle touristique des grandes stations de ski des Alpes, qu'il est « dans une fuite en avant constante dans la construction de nouveaux lits et dans l'investissement nécessaire pour rester attractif » (Bonnemains, 2015, p. 282). Selon Vlès, la généralisation de la production de neige dans les domaines skiables constitue un élément supplémentaire participant à ce phénomène de « fuite en avant » (Vlès, 2019).

Hormis son emploi pour décrire le phénomène d'émergence de coalitions d'acteurs favorables à une croissance immobilière tel que l'a développé Fablet (2013), l'utilisation de la notion de « fuite en avant » relève selon nous de trois écueils. Premièrement la connotation du terme de « fuite en avant » traduit un jugement négatif à l'égard des phénomènes décrits. La réprobation associée à l'usage de ce terme n'est cependant pas explicitée par les auteurs qui l'emploient. Deuxièmement, le terme, bien que régulièrement employé, décrit des situations et des configurations différentes en fonction des auteurs. Les auteurs qui l'emploient au début des années 1990 comme Perret (1993) se réfèrent à des dynamiques de développement où la profitabilité rapide de la promotion immobilière permet le financement de l'investissement dans des remontées mécaniques. Cette situation n'est plus valable à partir des années 1990 où les opérateurs de domaines skiables comme la Compagnie des Alpes revendiquent l'abandon de la promotion immobilière pour se spécialiser dans le transport par câble (George-Marcelpoil & François, 2012). Enfin le pouvoir évocateur du terme « fuite en avant » masque un relatif impensé des mécanismes dénoncés et constitue selon nous le troisième écueil de son emploi. Si par le passé, le terme de « fuite en avant » était utilisé pour décrire la déconnexion observée dans le développement de l'offre des sports d'hiver par rapport aux attentes de la demande touristique, le terme est actuellement utilisé pour caractériser le renforcement d'une offre touristique de ski considérée comme incohérente vis à vis des impacts observés et prévus du changement climatique dans les zones de montagne. Dans une perspective où la viabilité future de l'économie des sports d'hiver est remise en question, l'adaptation voire la transition économique des territoires touristiques de montagne apparaît comme une nécessité. Dans ce contexte, le développement de la production de neige constitue une forme d'adaptation au bénéfice seul du maintien de l'activité ski.

3. La production de neige comme adaptation au changement climatique

La présence d'un manteau neigeux est, selon Gössling et Hall (2005), « la condition sine qua non » pour la pratique du ski. Les travaux s'intéressant à la caractérisation de la sensibilité de l'activité touristique aux conditions météorologiques constituent ce que de Freitas (2003) appelle la « tourism climatology » soit le champ de recherche étudiant les interactions entre climat, conditions météorologiques et pratiques touristiques. Un corps de littérature combinant données climatiques et données sur le tourisme des sports d'hiver s'est progressivement constitué et s'est renforcé sous l'effet de l'accroissement des travaux s'intéressant aux impacts du changement climatique sur les activités touristiques. Largement ignorée par la littérature jusqu'au début des années 2000, la production de neige est pour la première fois intégrée dans les études de modélisation de l'enneigement en 2003 (Scott et al., 2003). La production de neige a été dès lors considérée comme la technique d'adaptation la plus répandue pour répondre aux risques avérés actuels et futurs du changement climatique dans l'industrie des sports d'hiver (Abegg et al., 2007).

D'après les définitions que propose le GIEC (GIEC, 2018), le risque climatique caractérise les potentielles conséquences néfastes d'aléas (ou facteurs climatiques générateurs d'impacts) évoluant sous l'effet du changement climatique sur des systèmes naturels ou humains. Le risque climatique se caractérise par l'interaction de trois composants que sont la vulnérabilité, l'exposition et l'aléa (ou facteur climatique générateur d'impacts) considéré. L'exposition représente la présence de personnes, [...] d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu susceptible de subir des dommages. L'aléa climatique, ou « facteur générateur d'impacts climatiques » comme le définit le GIEC dans son dernier rapport d'évaluation (IPCC, 2021), caractérise les conditions physiques du système climatique qui affectent un élément de la société ou des écosystèmes. En fonction de la tolérance du système, les facteurs générateurs d'impact et leurs changements peuvent être préjudiciables, bénéfiques, neutres ou mixtes. Enfin, la vulnérabilité se définit comme la propension à subir des effets néfastes et englobe une variété de concepts et d'éléments, parmi lesquels la susceptibilité de subir des dommages ainsi qu'un manque de capacité à faire face et à s'adapter. Appliquée à l'industrie des sports d'hiver, la vulnérabilité climatique correspond donc à l'impact de la variabilité interannuelle des précipitations sous forme de neige ainsi qu'à la baisse de l'enneigement liée aux impacts du changement climatique.

Le développement de la production de neige uniquement motivé par son rôle d'adaptation aux impacts du changement climatique apparaît comme le principal écueil du courant de littérature de la « tourism climatology ». En effet, la prise en compte relativement tardive de la production de neige dans les études portant sur l'impact du changement climatique, par rapport à son développement, a contribué à ignorer les raisons initiales de son essor. Considérée dans la littérature scientifique comme une technique d'adaptation au changement climatique controversée à moyen et long terme, cette approche ignore les antécédents de son développement, notamment celui de limiter la météo-dépendance de l'exploitation des domaines skiables. Les opérateurs de domaines skiables, en plus d'étendre leurs surfaces équipées, ont aussi modifié leurs modes de production pour faire face aux

impacts du changement climatique qui réduisent leurs possibilités de produire de la neige. Ils ont donc adapté la production de neige à l'évolution climatique. Cette adaptation, pensée par les opérateurs de domaines skiables comme une réponse de court terme, voit sa pertinence et sa soutenabilité questionnée à moyen et long terme. Il existe donc un enjeu d'articulation entre des échelles de temps différentes. D'un côté la production de neige est liée à une logique commerciale dans un secteur fortement capitalistique, météo-dépendant et affecté par les impacts du changement climatique. De l'autre, elle est remise en cause dans des perspectives d'évolution des territoires touristiques de montagne. En effet, la production de neige apparaît comme un choix de développement en contradiction avec la volonté de rendre des territoires de montagne moins dépendants de l'industrie des sports d'hiver, notamment en développant d'autres pratiques touristiques et économiques.

4. Modélisation des spécificités des domaines skiables dans les études d'impacts du changement climatique et limites rencontrées

Un des défis majeurs des études évaluant la vulnérabilité des domaines skiables réside dans leurs capacités à tenir compte à la fois des spécificités géo-topographiques des domaines et des pratiques des exploitants. Scott et al., (2012) ont montré que l'absence de prise en compte des modes de gestion de l'enneigement, y compris de la production de neige, dans les travaux scientifiques sur la fiabilité de l'enneigement exposait ces études à un discrédit de la part des professionnels du tourisme. Selon la revue de littérature de Steiger et al. (2019), la France, malgré l'importance de son marché du ski (numéro 2 en termes de journées skieurs en 2014) apparaît relativement sous-étudiée avec seulement 6 études comptabilisées jusqu'en 2017. Ces dernières années, les travaux réalisés dans le cadre d'une collaboration entre le LESSEM (INRAE) et le Centre d'Etudes de la Neige (Météo-France - CNRS, CNRM) (François et al., 2016; Morin et al., 2021; Spandre, 2016) ont contribué à combler ce manque d'informations. Les travaux de Spandre et al., (2015, 2016, 2018, 2019b), se basant sur les observations menées chez les exploitants de domaines skiables des Alpes françaises, ont permis d'intégrer les pratiques de gestion de la neige dans les modélisations de l'enneigement. Des simulations d'enneigement selon différentes configurations et différents scénarios à l'échelle individuelle des domaines skiables des Alpes françaises et des Pyrénées (Spandre, 2019b) ont été réalisées. Gerbaux et al., (2020) ont réalisé une étude hydrologique sur les consommations en eau simulées pour la production de neige en conditions climatiques actuelles et futures à l'échelle individuelle des 24 domaines skiables du département de l'Isère. La représentation spatiale a également connu de nombreuses améliorations depuis la représentation par des altitudes caractéristiques (Steiger, 2010) utilisées dans le contexte d'un modèle degré-jours (SkiSim2), qui a ensuite évolué vers des modélisations à base physique qui permettent une meilleure prise en considération des caractéristiques topographiques (hétérogénéité interne des domaines skiables) depuis des approches semi-distribuées à l'échelle d'une enveloppe gravitaire de domaine skiable (Spandre et al., 2019a) jusqu'à une approche distribuée à l'échelle de la piste (Marke et al., 2014).

Malgré ces différents progrès, les travaux de modélisation font face à certaines limites dont certaines interrogent leur capacité à prendre en compte l'ensemble des facteurs explicatifs. La première est leur capacité à produire des données de meilleure résolution spatiale. Délivrer des informations plus précises, avec une résolution à l'échelle des domaines skiables et en tenant compte des singularités qui y sont observées, nécessite la constitution de modèles plus élaborés. La production d'évaluations plus précises des impacts de la production de neige reste conditionnée à l'accès à des données de qualité. Abegg et al., (2017) indiquent que ces données plus précises, notamment en ce qui concerne la gestion de l'enneigement, sont souvent détenues par les opérateurs de domaines skiables. Par exemple, l'absence de données individuelles sur le taux de couverture en production de neige conduit actuellement à l'utilisation de valeurs de taux appliqués uniformément à l'ensemble des domaines skiables, y compris sur la période passée. La modélisation des pratiques pousse aussi à l'intégration de données de plus en plus complexes : données de consommation, données de coûts, pratiques de travail, heures de fonctionnement, rendement de production. Lorsqu'elles existent à l'échelle des domaines skiables, ces données sont rarement comparables d'un domaine skiable à un autre à cause de l'absence d'unité de mesure partagée entre les exploitants de domaine skiable. Ainsi, la diversité des comportements que peuvent prendre les opérateurs s'avère difficile à décomposer et à intégrer dans un modèle.

Ces modèles restent perfectibles et poussent à envisager d'autres perspectives afin d'étudier la production de neige et sa dynamique. En effet, les déterminants d'ordre physique ne permettent pas d'expliquer à eux seuls la dynamique d'équipement en production de neige et d'autres facteurs sont susceptibles d'exister. Ce constat rejoint la proposition précédemment faite de caractériser le risque des domaines skiables davantage comme un risque d'ordre économique que climatique. Nous savons que la hausse au fil des ans des surfaces équipées en production de neige est avérée. En actualisant le rapport de Badré et al. (2009), l'étude de Spandre et al., (2015) permet de connaître l'évolution du taux moyen de couverture des domaines skiables français, estimé à 35% en 2015. Ce taux de couverture est cependant une moyenne qui masque des disparités dans les trajectoires d'équipement. De plus, une évaluation de la dynamique économique associée à la production de neige est aujourd'hui manquante. Outre un état des lieux sur cette dynamique, une analyse plus fine à l'échelle des domaines skiables permettrait de mettre en évidence d'éventuelles disparités ou régularités en fonction des domaines skiables. Les investissements réalisés en production de neige apparaissent comme la meilleure variable de substitution afin de comprendre la dimension économique de la production de neige.

5. Logiques d'investissement dans la production de neige dans l'industrie du ski

Variable clef en macroéconomie, les investissements, considérés dans un sens large comme « l'acquisition de biens de production » (Villieu, 2019, p. 3), déterminent les capacités de production d'un secteur économique et, sur le long terme, son potentiel de croissance. Pour ces raisons, le suivi de l'évolution des investissements est un indicateur clef de l'activité économique. En France, outre les enquêtes trimestrielles sur l'évolution de

l'investissement qu'assure l'Insee, Atout France - opérateur de l'Etat français chargé de renforcer le positionnement de la destination France à l'international et accompagner le développement touristique de la France - réalise un suivi annuel des investissements réalisés dans les différents secteurs de l'activité touristique. Concernant l'industrie des sports d'hiver, c'est le magazine Montagne Leaders, en partenariat avec les services d'Atout France, qui réalise chaque année une enquête sur les investissements des exploitants de domaines skiables.

D'un point de vue microéconomique, les investissements en production de neige constituent pour les exploitants de domaines skiables des investissements matériels participant à la formation d'un capital fixe. Il existe quelques travaux qui se sont intéressés aux effets économiques associés aux investissements dans la production de neige. Ainsi Gonseth estime qu'à partir de 30 km de pistes équipées, l'investissement dans la production de neige n'avait plus d'influence sur la rentabilité des exploitants suisses (Gonseth, 2008). Falk et Vanat ont montré qu'en France, l'investissement en production de neige permettait d'augmenter le nombre de journées skieurs pour les domaines skiables situés en altitude (≥ 1770 m) mais que passé 6,5 millions d'euros d'investissement, ce nombre de journées skieurs n'augmente pas davantage (Falk & Vanat, 2016). De manière générale, calculer la rentabilité du capital investi dans la production de neige s'avère difficile et les données financières sont peu nombreuses. Les coûts associés à l'équipement en production de neige sont extrêmement variables en fonction des études et des pays, Abegg et al. (2007) indiquent par exemple qu'en Autriche, un équipement en production de neige coûte entre 25 et 100 k€ par hectare. Concernant les coûts d'exploitation, Damm et al. (2014) estiment dans une étude de cas autrichienne, que les futures conditions de production de neige, moins favorables à cause des impacts du changement climatique et de la hausse prévue des prix de l'électricité, devraient conduire à une hausse des prix des forfaits si les opérateurs souhaitent maintenir leur rentabilité actuelle. La diversité des environnements réglementaires et économiques dans lesquels évoluent les domaines skiables rend les comparaisons internationales difficiles. Des modèles théoriques existent pour évaluer l'avantage net des techniques d'adaptation (Stern, 2007). Cependant, l'existence de données financières de qualité reste aujourd'hui un des principaux freins aux travaux de recherche sur les coûts de la production de neige, y compris comme technique d'adaptation au changement climatique.

Par ailleurs, alors que la production de neige est régulièrement étudiée comme une technique d'adaptation au changement climatique, plusieurs travaux ont montré que le développement de la production de neige reposait sur des combinaisons de plusieurs motivations. Mayer et al., (2007), Paccard (2010) ainsi que Spandre et al. (2016a) ont montré que les opérateurs de domaines skiables investissaient dans la production de neige afin d'assurer une exploitation minimale de leur domaine face à la variabilité interannuelle des précipitations neigeuses. La production de neige est utilisée pour sécuriser les dates d'ouverture et de fermeture des domaines skiables, décidées un an à l'avance. La production de neige est aussi un argument commercial, parfois mentionnée comme « garantie neige », permettant de garantir la vente de forfaits à l'avance, auprès de tour-opérateurs. Steiger et Mayer (2008) précisent que la production de neige apparaît comme une garantie d'exploitation dans un marché du ski compétitif. Enfin, la gestion de l'enneigement permet de

répondre aux attentes plus exigeantes des clientèles touristiques. Elle peut aussi être développée afin de se conformer aux standards internationaux et pouvoir accueillir des compétitions sportives. Les déterminants de l'investissement dans la production de neige sont donc multiples et les stratégies de développement ont pu varier au cours des dernières décennies.

Finalement, le développement de la production de neige repose sur un ensemble de motivations issues de l'activité économique de l'industrie des sports d'hiver, de la variabilité inhérente aux précipitations sous forme de neige ainsi que les conséquences irréversibles du changement climatique dans les territoires de montagne. S'appuyant sur des études s'intéressant aux mesures d'adaptation prises par les professionnels de l'industrie du ski pour s'adapter au changement climatique, Abegg et al. (2017) ainsi que Steiger et al. (2019) font état d'une incompatibilité entre l'échéancier du changement climatique et celui de l'exploitation commerciale d'un domaine skiable. L'investissement en production de neige, comme processus de réduction du risque climatique (Tang & Jang, 2011), peut être source d'un risque de « maladaptation » (Schipper, 2020) pour l'exploitant mais aussi pour les territoires de montagne. La réduction du risque climatique par des investissements est engageant à moyen terme puisqu'elle entraîne la constitution d'un capital spécifique uniquement dédié à l'exploitation des remontées mécaniques. Les investissements en production de neige sont irréversibles pour la firme, mais aussi pour le territoire. En effet, au-delà du matériel (perches ou ventilateurs) la production de neige nécessite des travaux d'aménagements : enfouissement de réseaux, salle des machines, retenues d'altitudes etc. Les aménagements réalisés, non transférables, ont vocation à revenir aux collectivités supports de stations de ski une fois la durée du contrat de délégation échue. Dès lors, la possession d'un capital en production de neige, son développement et son renouvellement conduisent à orienter durablement la trajectoire d'évolution des territoires touristiques de montagne et des sociétés locales qui y vivent.

III. PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

La dépendance à l'enneigement constitue un élément de vulnérabilité climatique pour l'exploitation d'un domaine skiable. Cette vulnérabilité est d'autant plus marquée que l'exploitation d'un domaine skiable repose sur de fortes immobilisations. Nous avons vu que l'essor de la production de neige dans les Alpes a souvent été associé à de mauvaises conditions d'enneigement des domaines skiables, notamment l'expérience d'hivers faiblement enneigés à la fin des années 1980 et au début des années 1990. Les impacts du changement climatique qui conduisent à une diminution du manteau neigeux accroissent le risque d'une défaillance d'exploitation.

Les aménagements lourds et les investissements conséquents que nécessite la production de neige contribuent donc à influencer les trajectoires d'évolution prises par les territoires de montagne dotés de domaines skiables. Afin de comprendre comment la production de neige participe à orienter les trajectoires de développement des territoires touristiques de montagne, ce travail de thèse a cherché à identifier les déterminants des dynamiques d'investissement dans la production de neige et à mieux quantifier l'apport de la production de neige pour les conditions d'exploitation des domaines skiables.

IV. METHODOLOGIE DE RECHERCHE : LE CHOIX D'UNE METHODE MIXTE

Afin de répondre à notre problématique, nous avons fait le choix d'utiliser une méthode mixte. La justification d'une méthode mixte est double. La combinaison de plusieurs méthodes permet à la fois une compensation et une complémentarité dans les processus de recherche. Ainsi une méthode mixte permet de bénéficier de vues complémentaires sur un même phénomène, mais également de compenser les faiblesses d'une méthode employée vis-à-vis d'une autre. La reconnaissance des faiblesses d'une méthode motive dès lors l'utilisation d'une méthode alternative afin de compenser les faiblesses identifiées. Notre travail de recherche s'est donc appuyé sur la collecte et le traitement de données à la fois extensives (données d'ordre quantitatif) principalement produites par des tiers ainsi que des données intensives (données d'ordre qualitatif) principalement récoltées lors de déplacements sur le terrain et d'entretiens.

1. Collecte et traitement de données extensives

L'observation d'éléments dans le cadre d'une recherche extensive (ou approche quantitative) a nécessité la disponibilité de données observables, quantifiables et comparables à l'échelle de plusieurs individus. Les données de modélisation de l'enneigement étaient disponibles (Spandre, 2016; Vionnet et al., 2012), ainsi que la représentation graphique des surfaces enneigées (François et al., 2014, 2016) et les

informations techniques des domaines skiables (George-Marcelpoil et al., 2012). Un travail de collecte de données d'ordre économique a été conduit en début de thèse.

Lorsque cela était possible, nous avons favorisé la collecte de données de panel (ou données longitudinales), soit des données contenant plusieurs observations au cours du temps pour plusieurs mêmes domaines skiables. Nous avons collecté des données d'investissements de cinq ordres (remontées mécaniques nouvelles, entretiens de remontées mécaniques, production de neige, signalétique et billettique) réalisées par les exploitants de 131 domaines skiables pour une période allant de 2005 à 2016. Les investissements en production de neige qui nous intéressaient plus particulièrement ont donné lieu à un travail de collecte sur une période élargie (1997-2018) avec un niveau de détails plus élevé pour un total de 100 domaines skiables. Les investissements en production de neige ont été compilés et ventilés en six sous-catégories². L'origine de ces données est l'enquête des investissements annuels réalisée par le magazine professionnel *Montagne Leaders*. Les données collectées et traitées afin d'être utilisées sont à la base des matériaux utilisés dans l'ensemble de ce travail de thèse. Ces données ont notamment servi au développement de modèles dans deux des articles de cette thèse: « Do changes in snow conditions have an impact on snowmaking investments in French Alps ski resorts? » (Berard-Chenu et al., 2020), et « Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2018 » (Berard-Chenu et al., 2021, en révision).

Des données de subventions, allouées par diverses autorités publiques : Régions Auvergne-Rhône-Alpes et Sud, Départements de la Savoie, de la Haute-Savoie, de l'Isère ont aussi été collectées auprès des collectivités territoriales. Une partie de ces données a été mobilisée dans le quatrième article de la thèse.

Des données de cadrage (chiffres d'affaires, emplois) ont été compilées via des bases de données externes : base de données *Diane* du Bureau Van Dijk³ ou données de l'Agence centrale des organismes de sécurité sociale. Ces données ont servi à apporter des éclairages complémentaires quant à la structure générale du secteur des remontées mécaniques.

Nous avons aussi entrepris une collecte de données de panel relative à l'évolution des superficies des domaines skiables couverts par des systèmes de production de neige. Cependant, l'absence de données comparables à l'échelle des départements de l'Isère, de la Savoie et de la Haute-Savoie nous a conduit à circonscrire l'utilisation de ces données à l'échelle du département de la Savoie. La Savoie est le territoire où la qualité de la donnée est la plus élevée avec des observations pluriannuelles et une stabilité de la méthode d'observation. Ces données ont été mobilisées dans le second article de notre thèse.

² Chaque investissement en production de neige réalisé par les opérateurs de domaines skiable est ventilé en six différents types: matériels et concepts, retenue d'altitudes, génie civil, bâtiment, électricité et une sixième catégorie mentionnée « autre »

³ *Diane* est une base de données qui permet d'accéder aux données comptables et financières des entreprises françaises ayant publié leurs comptes annuels auprès des Greffes des Tribunaux de Commerce.

L'ensemble des données économiques et spatiales collectées ont été compilées avec les données socio-économiques déjà présentes dans la *BD Stations* développée à INRAE (George-Marcelpoil et al., 2012).

2. Collecte et traitement de données intensives

La collecte de données dans le cadre d'une recherche intensive (ou approche qualitative) nous a conduit à la réalisation d'entretiens semi-directifs. Ces entretiens visaient à mieux comprendre les processus de croissance ainsi que l'utilisation des systèmes de production de neige dans les domaines skiables. La réalisation de ces entretiens a été précédée d'une phase exploratoire : documentation dans les archives du magazine professionnel *Montagne Leaders*, entretiens exploratoires auprès de professionnels du secteur, prises de contacts notamment lors de la participation à des événements professionnels (Congrès des Domaines Skiables de France, *Mountain Planet*) ou lors d'événements de vulgarisation scientifique (Rencontres Climat-Météo-Montagne). Cette collecte de données intensives a conduit à la réalisation d'une série de cinquante-trois entretiens semi-directifs. Les entretiens réalisés de préférence de visu, puis par téléphone ou en visioconférence suite aux conséquences de la crise de la COVID-19, étaient menés avec le support d'un guide d'entretien. Les entretiens, enregistrés, ont été retranscrits puis analysés avec un logiciel d'analyse de données qualitative (*Nvivo*). Le recueil de données passait également par la collecte de documents d'information grand public sur la production de neige, de documents transmis en marge des entretiens (cartes annotées, historique et évolution des installations). Enfin, des visites des installations extérieures (retenues, systèmes d'enneigement) ou des visites accompagnées, notamment des salles des machines, des domaines skiables enquêtés ont parfois eu lieu. Nous avons mobilisé l'ensemble de ces données dans deux des articles de cette thèse.

V. STRUCTURATION DU TRAVAIL DE THESE

Le travail de thèse s'organise en quatre volets correspondant à quatre articles publiés ou soumis dans des revues avec comité de lecture. Deux à deux, ces quatre parties traitent à la fois des déterminants physiques et des facteurs technico-économiques qui participent à orienter les dynamiques d'équipement dans la production de neige.

Nous avons adopté une posture de recherche alliant démarche extensive et intensive. Les articles 1 et 2 relèvent de la recherche extensive et cherchent des régularités dans des chroniques d'événements observés. Ces deux articles s'appuient sur des analyses conduites sur des données d'investissements et des données d'enneigement en neige naturelle et gérée. Les articles 3 et 4 sont le fruit d'une recherche intensive et se basent sur des échantillons de domaines skiables souvent plus restreints que ceux mobilisés dans les articles 1 et 2. Dans les articles 3 et 4, nous cherchons à mettre en évidence les mécanismes générateurs de l'investissement dans la production de neige et les structures qui les produisent.

Liste des articles de la thèse

- Article 1 Berard-Chenu, L., Cognard, J., François, H., Morin, S. and George, E. Do changes in snow conditions have an impact on snowmaking investments in French Alps ski resorts? *International Journal of Biometeorology* 65, 659–675. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01933-w>, 2020
- Article 2: Berard-Chenu, L., François, H., George, E., and Morin, S. Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2018, *The Cryosphere Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/tc-2021-270>, en révision, 2021
- Article 3: Berard-Chenu, L., François, H., Morin, S. and George, E. Path dependence and lock-in effects in the ski tourism industry: a case study for snowmaking in the French Alps. *Current Issues in Tourism*, (en révision)
- Article 4: Berard-Chenu, L., François, H., Morin, S. et George, E. « Equipements pour la production de neige dans les stations de sports d’hiver : entre politiques de soutien régionales et déclinaisons territoriales » *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, (en révision)

Chapitre II

L'EVOLUTION DES CONDITIONS D'ENNEIGEMENT A-T-ELLE UN IMPACT SUR LES INVESTISSEMENTS EN MATIERE D'ENNEIGEMENT DANS LES STATIONS DE SKI DES ALPES FRANÇAISES ?

La section 1 « Résumé long en français » de ce chapitre II propose un résumé en français pour le lecteur francophone d'un article publié en langue anglaise dans la revue *International Journal of Biometeorology*. La section 2 (p.36) propose la version originale telle que publiée dans la revue.

Section 1 from Chapter II offers a French summary for non-English readers while English readers can directly refer to section 2 (p.36). This second section provides the original article as published in the International Journal of Biometeorology.

Ce chapitre nous permet de dresser un état des lieux des investissements dans l'industrie des sports d'hiver et d'apporter la preuve que ce secteur se caractérise par une forte intensité capitaliste, c'est-à-dire que ses immobilisations sont importantes au regard de sa masse salariale. L'investissement est donc un déterminant crucial dans le fonctionnement des exploitants de domaines skiables. Une fois ce constat établi, ce chapitre met en avant des régularités ou plutôt des « demi-régularités » (Lawson, 1997, p. 219) dans les dynamiques d'investissements en production de neige. Nous nous sommes appuyés sur des modèles statistiques développés dans le champ de l'économétrie afin d'identifier des liens de corrélation entre une variable explicative (l'enneigement en neige naturelle) et une variable à expliquer (l'investissement en production de neige). Dans ce chapitre, nous mettons en évidence des demi-régularités puisque nous observons un lien significatif et négatif uniquement pour les plus petites stations entre investissements en production de neige et conditions d'enneigement naturel. Cet article confirme l'existence de mécanismes supposés par la littérature scientifique. En effet, nous montrons que l'investissement en production de neige, dont l'essor initial était supposé stimulé par les mauvais hivers connus par les domaines skiables au début des années 1990, continue d'être corrélé aux conditions d'enneigement naturel pour les plus petits domaines skiables.

Ce chapitre est tiré d'un article publié dans la revue *International Journal of Biometeorology* dans le cadre d'un numéro spécial « Climat, Tourisme et Loisir ». Cette publication fait suite à notre participation à la cinquième édition de la conférence internationale sur le climat, le tourisme et les loisirs qui s'est tenue en juin 2018 à l'Université d'Umeå (Suède).

Référence de l'article

Berard-Chenu, L., Cognard, J., François, H., Morin, S. and George, E. Do changes in snow conditions have an impact on snowmaking investments in French Alps ski resorts?. *Int J Biometeorol* 65, 659–675 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01933-w>

I. RÉSUMÉ LONG EN FRANÇAIS

1. Résumé

Cette étude s'intéresse à la relation entre les conditions d'enneigement et les investissements dans la production de neige pour plus de 100 domaines skiables des Alpes françaises. Les tendances en matière d'investissement sont essentielles dans les secteurs à forte intensité capitalistique telle que l'industrie du ski. Notre jeu de données se compose d'indicateurs de fiabilité de l'enneigement et d'investissements en production de neige couvrant la période 1997-2014. Les statistiques descriptives révèlent que la production de neige a été le deuxième poste d'investissement des domaines skiables, indépendamment de leur altitude ou de leur taille. L'étude révèle aussi un lien significatif et négatif entre les investissements en production de neige et les conditions d'enneigement de l'année précédente pour les plus petits domaines skiables. D'autres facteurs sont également susceptibles de jouer un rôle important dans la dynamique des investissements en matière de production de neige.

2. Introduction

L'industrie des sports d'hiver est très sensible aux conditions d'enneigement, marquées par une forte variabilité interannuelle des précipitations sous forme de neige. Les hivers faiblement enneigés ont d'ailleurs un effet direct sur l'industrie des sports d'hiver. Les simulations climatiques passées et futures pour le vingt-et-unième siècle indiquent une réduction continue des quantités de neige, en particulier à basse et moyenne altitude jusqu'à environ 1500 m, s'ajoutant à une variabilité interannuelle persistante (Beniston et al. 2018 ; Verfaillie et al. 2018 ; Spandre et al. 2019a, 2019b). Le développement des systèmes de production de neige est l'un des principaux changements ayant affecté l'industrie des sports d'hiver ces dernières décennies (Spandre et al. 2015). Cependant peu d'études ont analysé les motivations à s'équiper en production de neige. Il existe un large consensus concernant le fait qu'une série de mauvaises saisons d'enneigement à la fin des années 1980 et au début des années 1990 (Durand et al. 2009) a conduit au lancement de l'utilisation de la production de neige dans les Alpes françaises (Gauchon 2009 ; Paccard 2010). Puisque les mauvaises conditions d'enneigement ont déclenché l'essor de l'utilisation de la production de neige, il apparaît intéressant d'évaluer s'il existe une relation entre les conditions d'enneigement et le développement de la production de neige au cours des dernières décennies.

3. Revue de littérature et hypothèses de recherche

Outre les débats sur les enjeux environnementaux, la production de neige a des coûts d'investissement et d'exploitation élevés, par conséquent le développement de la production de neige et ses implications socio-économiques sont devenus une question centrale.

La plupart des études suggèrent que la production de neige est exclusivement considérée comme une mesure d'adaptation permettant d'augmenter la fiabilité de l'enneigement dans un contexte de variabilité des précipitations et de changement climatique. Certaines d'études sur la perception du changement climatique auprès de l'offre touristique, notamment chez les opérateurs de remontées mécaniques (Abegg et al. 2008 ; Luthe 2009 ; Scott et al. 2012 ; Trawöger 2014) indiquent que les investissements en matière de production de neige sont davantage réalisés afin de répondre aux besoins d'enneigement actuels et non pas futurs des exploitants. Peu d'études se sont penchées sur la motivation des exploitants de remontées mécaniques à investir dans la production de neige. Steiger et Mayer (2008) ainsi que Paccard (2010) évoquent le besoin d'assurer un enneigement minimal pour sécuriser le démarrage de la saison hivernale, d'avoir une garantie pour l'organisation de compétitions internationales de ski, la possibilité d'assurer le fonctionnement des remontées mécaniques stratégiques du domaine skiable ou encore d'assurer une garantie d'enneigement dans un marché du ski compétitif. Cependant la façon dont les exploitants de domaines skiables pilotent le développement de leur production de neige reste peu claire, notamment parce qu'ils adoptent eux-mêmes une position ambiguë à ce sujet. Cet article vise premièrement, à comparer les investissements dans la production de neige avec les autres investissements réalisés par les domaines skiables. Deuxièmement, il cherche à caractériser la relation entre investissements dans la production de neige et conditions d'enneigement connues par les exploitants. Nous formulons donc deux hypothèses :

H1 : l'investissement en production de neige est influencé par la taille des domaines skiables.

H2 : La baisse de l'enneigement a une influence positive sur les futurs investissements en production de neige.

4. Matériel et méthode

1. Caractéristiques des domaines skiables à partir de la *BD Stations*

Les caractéristiques géographiques et techniques des domaines skiables proviennent de la *BD Stations* (Marcelpoil et al. 2012; François et al. 2014). Le moment de puissance est utilisé comme caractéristique pour distinguer les stations en quatre groupes de taille différente : les petites (S), moyennes (M), grandes (L) et les très grandes (XL).

2. Données d'investissements

L'investissement est crucial dans l'activité du transport par câble et pour mesurer l'importance du capital dans cette industrie, nous calculons un ratio d'intensité capitalistique. Cet indicateur est calculé en rapportant les immobilisations des opérateurs de domaines skiables par le nombre d'employés (équivalent temps plein).

Les données d'investissement sont issues du magazine professionnel *Montagne Leaders* qui tient une enquête annuelle des investissements réalisés par les opérateurs de domaines skiables. Nous avons séparé nos données en deux jeux, le jeu A contient 131 domaines skiables qui ont au moins investi dans une des cinq catégories d'investissement

que recense le magazine entre 2005 et 2016 et le jeu de données B qui contient 100 domaines skiables qui ont au moins investi dans la production de neige entre 1997-2014.

3. Données sur la fiabilité de l'enneigement

Les conditions d'enneigement pour chaque domaine skiable ont été calculées à l'aide du modèle SAFRAN-Crocus (Durand et al. 2009), spécifiquement appliqué aux domaines skiables sur la base d'enveloppes gravitaires (François et al. 2014, 2016) en utilisant le modèle d'enneigement Crocus-Resort (Spandre et al. 2016b). Dans ce travail nous nous servons d'indices de fiabilité de l'enneigement qui tiennent compte uniquement des conditions naturelles d'enneigement (sans damage ni production de neige).

4. Modèle empirique

Afin d'estimer l'influence de l'indice de fiabilité de l'enneigement de l'année précédente sur l'investissement en production de neige, nous développons le modèle économétrique suivant :

$$I_{i,t} = \alpha_i + \beta_1 \cdot Snow_{i,t-1} + \lambda_t + \epsilon_{i,t}$$

où i et t désignent respectivement le domaine skiable et l'année. La variable de gauche $I_{i,t}$ désigne l'investissement en production de neige, corrigé de l'inflation. $Snow$ est l'indice de fiabilité de l'enneigement naturel. Afin de tester notre hypothèse H2, seules les valeurs passées de fiabilité de l'enneigement ($t-1$) sont considérées. β_1 représente le coefficient à estimer. α_i est l'effet spécifique à chaque domaine skiable, capturant les facteurs invariants dans le temps de chaque individu. λ_t est l'effet spécifique associé au temps et contrôle les facteurs communs à tous les individus, telles que les conditions macroéconomiques. $\epsilon_{i,t}$ correspond à la perturbation idiosyncratique du modèle.

Nous utilisons dans notre modèle quatre estimateurs largement utilisés pour les données de panel linéaires : un estimateur des moindres carrés ordinaires sur des données empilées (Pooled_OLS), des estimateurs à effets fixes avec transformation en différences premières (FE_FD) et transformation within (FE_WITHIN), ainsi qu'un estimateur à effets aléatoires utilisant les moindres carrés généralisés (RE_GLS).

5. Résultats

1. Ratio d'intensité capitalistique

Le transport par câble s'avère être le secteur touristique ayant la plus forte intensité capitalistique avec environ 158k€ d'immobilisations par équivalent temps plein. L'exploitation des remontées mécaniques implique donc des investissements élevés pour maintenir des installations compétitives. Par conséquent, la capacité à investir est cruciale pour les exploitants de remontées mécaniques.

2. Statistiques descriptives

Les investissements dans les nouvelles remontées mécaniques, l'entretien des remontées mécaniques et la production de neige représentent près de 90% des investissements réalisés par les exploitants de domaines skiables. Les nouvelles remontées mécaniques sont, de loin, le principal poste d'investissement des exploitants. La production de neige représente le deuxième poste d'investissement, variant entre 20 et 24% en fonction de la taille du domaine skiable. La part des investissements en production de neige est donc plutôt stable quelle que soit la taille du domaine skiable.

Concernant les investissements en production de neige, on observe un comportement d'investissement plus discontinu chez les plus petits domaines skiables, avec plusieurs années sans investissement. Les grands domaines investissent des montants plus élevés et plus fréquemment que les petits domaines skiables. Ces résultats corroborent le fait que la taille des domaines skiables est un facteur clé qui a une forte influence sur les stratégies d'investissement dans la production de neige. Par ailleurs l'indice de fiabilité de l'enneigement est généralement corrélé à la taille du domaine skiable. En effet les domaines de plus grande taille ont généralement des ratios de fiabilité de l'enneigement naturel plus élevés en raison de leur altitude plus élevée (François et al., 2014).

3. Résultats empiriques

Afin d'évaluer l'influence liée à la taille des domaines skiables et de vérifier notre hypothèse H1, nous avons divisé notre échantillon B en deux groupes : d'un côté, les grands (L) et les très grands (XL) domaines skiables ($n = 972$) et de l'autre les plus petits (M et S) domaines skiables ($n = 828$).

Pour les grands domaines skiables, aucun des estimateurs ne présentent de résultats significatifs. Chez les petits domaines skiables, quel que soit l'estimateur considéré, on note que la fiabilité de l'enneigement a un effet significatif sur les investissements en production de neige l'année suivante, avec un coefficient directeur négatif.

Ces résultats corroborent en partie notre hypothèse H2 soit l'existence d'une relation négative avec un décalage temporel entre la variable météorologique et le comportement économique des domaines skiables. Ainsi de mauvaises conditions d'enneigement entraînent une augmentation des investissements en production de neige l'année suivante, uniquement pour les petits et moyens domaines skiables.

6. Discussion

L'absence de résultats significatifs chez plus grands domaines skiables peut avoir plusieurs explications. D'une part, ils sont généralement situés à une altitude plus élevée que les domaines plus petits et sont donc moins sensibles aux mauvaises conditions d'enneigement (François et al., 2014). D'autre part, leurs capacités à avoir des plans d'investissement, quelles que soient les conditions d'enneigement naturel, peuvent également expliquer l'absence de résultats significatifs. Les grands domaines ont probablement mis en place des stratégies d'investissement allant au-delà d'une simple stratégie de réaction de court terme telle que celle observée chez les petits domaines skiables.

L'utilisation dans notre modèle économétrique d'un décalage d'un an entre variable explicative et variable à expliquer est un moyen simple pour analyser le comportement supposé des opérateurs en réponse aux conditions météorologiques. Les exploitants de remontées mécaniques fondent probablement leurs décisions d'investir dans la production de neige sur la base d'un retour d'expérience pluriannuelle. Ainsi, le décalage temporel d'une année n'est peut-être pas suffisant pour analyser correctement les stratégies d'investissement dans la production de neige. Enfin les investissements déjà réalisés en production de neige peuvent influencer les investissements actuels. Une telle complexité dans le comportement de l'opérateur de remontées mécaniques justifierait l'utilisation d'une modélisation économétrique dynamique.

Puisque les conditions d'enneigement ne sont qu'un des facteurs pouvant expliquer les décisions d'investissement, des éléments plus clairs sur les motivations des exploitants de remontées mécaniques à se doter d'équipements en production de neige sont nécessaires pour aller au-delà de cette analyse quantitative. Une approche qualitative, avec des entretiens approfondis pourrait participer à cette meilleure analyse du comportement des exploitants de remontées mécaniques concernant leurs investissements en production de neige.

II. DO CHANGES IN SNOW CONDITIONS HAVE AN IMPACT ON SNOWMAKING INVESTMENTS IN FRENCH ALPS SKI RESORTS?

Lucas Berard-Chenu^{1,2}, Jonathan Cognard¹, Hugues François¹, Samuel Morin² & Emmanuelle George¹

International Journal of Biometeorology, volume 65, pages 659–675 (2021)
<https://doi.org/10.1007/s00484-020-01933-w>

Received: 1 March 2019 / Revised: 11 February 2020 / Accepted: 27 April 2020 / Published online: 28 May 2020

1 Univ. Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM, 38000, Grenoble, France

2 Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France Grenoble, CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige, 38000, Grenoble, France

1. Abstract

This study investigates the relationship between snow conditions and snowmaking investments for over 100 French Alps ski resorts. Investment trends represent a critical issue in capital-intensive sectors such as the ski industry. The data are based on snow reliability indicators and snowmaking investments covering 1997–2014. Descriptive statistics reveal that snowmaking has been the second investment item for ski resorts regardless of the elevation or ski resort size. The study finds that snowmaking investments are highly negatively correlated to snow conditions of the prior year for small and medium-sized ski resorts. Other factors are also likely to play a significant role in driving snowmaking investment dynamics.

2. Introduction

Winter tourism is an important industry in the European Alps. France ranks within the two top ski tourism destinations in Europe, depending on the year, with annually about 55 million skier visits (DSF, 2017; Vanat, 2019). The French Alps represent more than 80% of total annual French skier visits. In the French Alps, the share of tourism employment is almost 8% and tourism expenditures related to ski resorts amount to about 6.5 billion EUR (Atout France, 2012). In Austria, where the ski industry is also a key sector, winter sports generate almost 7.4 billion EUR in direct value added every year (Arbesser et al., 2010).

The ski tourism industry is highly sensitive to meteorological and snow conditions, in particular their interannual variability. Poor snow seasons have direct impacts on the tourism industry. Snow scarcity affects ski resort operators but also all surrounding stakeholders (e.g. host providers, restaurants, merchants, ski instructors, rental and sale shops of sports equipment, transport operators) connected to the ski industry. In addition to the interannual variability, past and future climate simulations for the twenty-first century indicate an ongoing reduction of snow amounts, especially in low to mid-elevation up to around 1500 m above

sea level, superimposing on persistent interannual variability (Beniston et al., 2018; Spandre et al., 2019a; Spandre et al., 2019b; Verfaillie et al., 2018). Hock et al. (2019) indicate that climate change has a negative impact on the tourism sector in the Alps, especially for the operating conditions in the winter season, with high financial risks for communities that rely on tourism income.

For several decades, the French ski industry has undergone deep changes, such as shifts in demand and consumer preferences, the fact that ski tourism is a mature market with a higher competition between resorts, changing governance contexts, and upgrading of tourism supply offer, in addition to emerging climate change impacts (Cuvelier, 1997; Gerbaux & Marcelpoil, 2006; Tuppen, 2000). One of the key changes that have affected this industry over the past decades is the inception and development of snowmaking (Spandre et al. 2015).

Snowmaking plays a routine role in the ski industry, where it contributes to snow management in advance and during the season. Snowmaking has only recently been fully integrated into scientific assessments of ski resort exposure and vulnerability under climate change (Abegg et al., 2020; Hoegh-Guldberg et al., 2019; Steiger et al., 2019). Although snowmaking is increasingly taken into account in climate change impact studies (Spandre et al. 2019b; Spandre 2016), far less studies have analyzed the motivation and the development strategy for snowmaking equipment, which are still poorly understood, with implications for the assessment of the impact of snowmaking on the operating and business model of the ski tourism industry.

There is a broad consensus on the fact that a series of poor snow seasons at the end of the 1980s and at the beginning of the 1990s (Durand et al., 2009) led to the inception of snowmaking use in the French Alps (Gauchon, 2009; Paccard, 2010). Since snow conditions have triggered the onset of use of snowmaking, it is appropriate to assess whether there is a relationship between snow conditions and snowmaking development over the past decades. Several previous studies show the increasing trend for the use of snowmaking in France (Paccard 2010; Badré et al. 2009; Spandre et al. 2015). The purpose of the present study is to assess to what extent changes and fluctuations in snow conditions can explain variations in the general trend for snowmaking investments in French Alps ski resorts. The study is also an opportunity to contribute to a better situational analysis of snowmaking investments, complementing the study of Falk and Vanat (2016) who found that investment in snowmaking is widespread and cumulated past investment has a positive impact on the number of skier visits. To do so, we provide a situational analysis of snowmaking activities in the French Alps, with a focus on overall investments in ski resorts. In order to reach its goal, our study is based on econometric analysis of snowmaking investment and snow reliability panel data sets.

The paper is structured as follows. “Conceptual background and development of assumptions” provides an overview of the existing literature in the field of the links between ski tourism and snowmaking. “Materials and methods” introduces the data and the methodology. “Results” provides results, in the form of descriptive statistics and the empirical results drawn from our modeling. “Discussion” discusses the results and the empirical model and gives concluding remarks.

3. Conceptual background and development of assumptions

Knowledge about snowmaking is mainly found in the climate change and ski tourism vulnerability literature. In the 2000s, climate change studies about ski tourism started to take snowmaking into account. Reference studies (Bürki et al., 2005; Elsasser & Messerli, 2001) and an OECD report (Abegg et al. 2007) presented what has become a general agreement: snowmaking is “the most widespread adaptation strategy used by ski area operators” (Abegg et al. 2007). Several studies highlighted the key role of snowmaking systems in shaping the snow reliability of mountain ski resorts (Gonseth, 2008; Pons et al., 2015; Scott et al., 2003; Scott & McBoyle, 2006; Steiger & Mayer, 2008). Henceforth a major issue was to realistically account for snowmaking in ski resort vulnerability assessment studies. Gradually, snow reliability models as well as ski tourism vulnerability assessments take into account snowmaking (Abegg et al., 2020; Dawson & Scott, 2013; Pons et al., 2015; Pons-Pons et al., 2012; Scott et al., 2003; Spandre et al., 2019a, 2019b; Steiger, 2010; Steiger et al., 2019; Steiger & Stötter, 2013). Whether snowmaking remains a relevant adaptation strategy under future climate change has become a growing concern in the literature and triggers intense public debate in mountainous regions: technical feasibility under a warmer climate, concerns about water and energy resource requirements and their financial implications have increasingly been discussed (Steiger et al. 2019). In addition to environmental debates, because the use of snowmaking requires high investment and operating costs, snowmaking development and its socio-economic implications have become a central question. Gonseth (2008) showed that the positive impact of snowmaking on the Swiss ski resorts’ EBITDA (earnings before interest, tax, depreciation, and amortization) decreases as the level of snowmaking investments increases. When a threshold of 30 km of ski slopes covered with snowmaking systems is exceeded, additional snowmaking has a negative impact on the ski resort’s EBITDA. Analyzing a snowmaking investment dataset, Falk and Vanat (2016) estimated that above 6.5 million EUR invested, cumulated snowmaking investment does not lead to higher skier visits in French ski resorts. Damm et al. (2014) performed a cost revenue analysis and predicted a future price increase in ski lift tickets in a ski area in Austria due to expected rising snowmaking operating costs. In an econometric study of corporate adaptation to climate change, Hoffmann et al. (2009) indicated that snowmaking extension is one adaptation measure among many for ski lift operators. In a vulnerability assessment of ski tourism in Germany and Turkey, Demiroglu et al. (2016) stated that snowmaking adaptation strategy can lead resorts on a path dependency, with challenging fixed and operational expenses. The way snowmaking is considered in most of the studies suggests that snowmaking is exclusively an adaptation measure to increase the snow reliability under climate variability and climate change, with some adaptation costs to assess.

However, among the growing amount of climate change perception studies on the tourism supply side (Abegg et al., 2008; Luthe, 2009; Scott et al., 2012; Trawöger, 2014), several factors about ski lift operators behavior indicate that snowmaking is not only implemented to face snow variability and climate change. Trawöger (2014) has conducted interviews with ski tourism stakeholders in the Austrian Alps and her results showed that ski lift operators were convinced that changing climatic conditions will affect the ski industry in

the mid- and long-term. These observations are compatible with findings about climate change vulnerability perception from other business sectors. For instance, Arnell and Delaney (2006) showed that water supply companies in England consider climate change impacts as one threat among others. Scott et al. (2012) stated that a difference exists between business and climate change timelines and highlighted that short-term planning horizon prevails among ski industry stakeholder decisions. Because of their relatively short (a few decades) depreciation period, capital investment decisions require only a mid-term planning. In view of this dissonant timelines, snowmaking investments are therefore probably carried out to meet current rather than future needs of ski lift operators.

To the best of our knowledge, only a few studies have addressed ski lift operator motivation to invest in snowmaking. Steiger and Mayer (2008) and Spandre et al. (2016a) have pointed out that some ski resorts invest in snowmaking even in high elevation areas. Although the highest ski resorts might have a snow-depth minimum threshold higher than the 30 cm generally considered, these authors' findings illustrate that the decline of snow conditions, regardless of the climate change scenarios, is not a sufficient reason to explain the rise of snowmaking at high elevation. In addition to climate change, Steiger and Mayer (2008) identified four conditions that raise snowmaking use: variability of precipitation in pre and early winter, competitive economic pressure, global trend in tourism, and specific trends in ski tourism. Based on a document from the professional association of the French cable car operators (Syndicat National des Téléphériques de France, 2002), Paccard (2010) also reported that in France, snowmaking results from different motivations. Though the specification lightly differs, snowmaking motivations mentioned by Paccard (2010) are congruent with those laid out by Steiger and Mayer (2008): to provide a base layer snowmaking to secure the scheduled openings of the ski resort, to guarantee the staging of international ski competitions, or to ensure the operation of the most strategic ski lifts. It remains unclear how snowmaking development is managed by ski lift operators, perhaps because even themselves take an ambiguous position on snowmaking. Wilson et al. (2018) indicated that snowmaking technical use has evolved: ski resorts have increased their capacities to produce a larger amount of snow within a shorter period. Campos Rodrigues et al. (2018) mentioned technical progress from snowmaking system suppliers, now snowmaking systems can produce snow until -1.5°C compare to figure of -4°C in the 1990s. Based on current knowledge, snowmaking development meets various purposes: counteracting the declining snow reliability in low-elevation areas, providing a snow guarantee for customers, assuring the best snow conditions on the ski slope, and preserving competitiveness within a mature European ski tourism market (Spandre et al. 2016a). Snowmaking can thus be considered as a coverage that makes possible the ski area exploitation for ski lift operators, more sustainable than financial hedges (Tang and Jang 2011) and that can be complemented with snow farming process, i.e., storage of snow from one season to the next (Grünwald et al., 2018). Several articles have described the past development of snowmaking in the French Alps in a descriptive manner (e.g., Spandre et al. 2015; Spandre 2016), but without analyzing the decision process leading to investments. The current study addresses specifically the relationships between ski resort snowmaking investment and snow reliability indicators. Firstly, it contrasts snowmaking investments with

other ski resort investment trends. Secondly, it characterizes the relationship between snowmaking investment figures and snow conditions.

To address our research issue, the following assumptions are made to set a framework. Firstly, we analyze the influence of ski resort size on investments. We assume that snowmaking investment response could be different depending on the ski resort size. Large ski resorts are more often higher than small ski resorts, with a higher number of snow reliable days. They operate high-performance ski lifts, faster and more comfortable than in smaller ski resorts. They attract more visitors, thus generate a bigger business volume. Because of their high turnover, the largest ski resorts are able to have steady investment programs. The largest ski resorts invest large amounts in snowmaking facilities (Falk and Vanat, 2016) and they might also invest more frequently than smaller resorts.

Secondly, we test the time lag relevance between snow reliability indicators and snowmaking investments. Apart from a widely held opinion that snowmaking use soared in the alpine region after a number of poor snow seasons at the end of the 1980s and the beginning of the 1990s, there is no literature on such relationships. It is unlikely that a direct relationship could exist between a meteorological variable and its economic potential consequences for ski lift operators' investments. A time lag likely exists, because a ski lift operator cannot react to a poor snow season by new snowmaking facilities within the same year. This assumption is consistent with Falk and Steiger (2018), who assumed that warm seasons could lead to increased investments into snowmaking facilities in subsequent years. Thus, if a relationship exists between these two variables, it is likely that there is a time lag between the two with a negative correlation, i.e., *a reduction in snow reliability would increase upcoming snowmaking investments*.

4. Materials and methods

1. Ski resorts characteristics from the BD Stations database

We characterized the main geographical and technical features of each considered ski resort using the *BD Stations* (George-Marcelpoil et al., 2012; François et al., 2014). *BD Stations* is a comprehensive database of French Alps ski resorts. It includes information on ski resorts' ski lift power, which is defined as the sum of the ski lift power of all ski lifts in a given ski resort. The ski lift power of a ski lift is defined and computed as the product of the elevation difference between the top and bottom of a ski lift and its capacity, i.e., the number of persons that can be carried per hour. It is a better indicator to distinguish ski resort diversity than the number of ski lifts or the total number of slopes and is widely used in various studies about French ski resorts (François et al., 2014; Goncalves, 2013; Spandre et al., 2015, 2016a, 2019a, 2019b). It was used to split our initial sample between four categories (see Table 3).

Table 3. Ski resort categories by ski lift power

Resort category*	Small resort (S)	Medium resorts (M)	Large resorts (L)	Very large resorts (XL)
Ski lift power (SLP) unit: km.pers./h	SLP < 2500	2500 < SLP < 5000	5000 < SLP < 15,000	15,000 < SLP

*Domaines Skiables de France (DSF formerly known as SNTF, the professional association of the French cable car operators)

Investment figures provide valuable information on the behavior of ski lift operators. Few other indicators can be assessed to understand ski tourism from the supply side. Ski ticket price (Wolff, 2014), investments and turnover, or, best of all, benefits (Gonseth, 2008) are useful proxies to assess the strategic economic behavior of a ski resort. Falk (2009) and Falk and Tveteraas (2019) showed that ski lift operators act as a high capital-intensive industry as cable car equipment purchase requires substantial investments. The ski tourism industry is also a capital-intensive business for public local communities. Uhaldeborde (2007) assessed that a ski tourism-oriented economy doubles the equipment investment rate of local authorities. French mountainous areas reach 55% of national tourism investment, although they represent only 15% of the turnover (Atout France, 2012). Several methods exist to estimate the capital intensity ratio. We measure it as the product of total fixed assets (k€) divided by full-time equivalent employee (FTE). Employment data are provided by the French Central Agency for Social Security organizations (L'Agence centrale des organismes de sécurité sociale [ACOSS], website: <https://www.acoss.fr/home/observatoire-economique/donnees-statistiques/bases-de-donnees.html>) while total fixed assets have been extracted from private companies' balance sheets provided by the Diane database (Source: Bureau van Dijk, website: <https://www.bvdinfo.com/en-gb/our-products/data/national/diane>).

Investment data used in this article originate from an analysis of the reporting of investments by the professional journal *Montagne Leaders*.⁴ This journal sends every year a survey to each French ski resort. Ski resorts fill the survey in a declarative manner. To be ranked as one of the “Top 100 French ski resorts” published by *Montagne Leaders* is also an evidence of renown for ski lift operators. The total amount of investment is distributed in different parts: snowmaking investments, investments in new ski lifts, or ski lift maintenance investments. Because the questionnaire has changed several times in 1994, 1996, 1999, 2000, and 2005, we focused our first analysis on the 2005–2016 period and selected five types of investment, which have always been considered. Although collected by a non-scientific and unofficial organization, these data hold significant value. The journal team has strengthened its methodology over time with expertise provided by *Atout France*, which is the national organization responsible for promoting France as a tourism destination.⁵ In its own publications about ski tourism, *Atout France* widely uses the *Montagne Leaders* investment

⁴*Montagne Leaders* is very well known in the ski tourism industry and it is a key stakeholder that contributes to the organization of the national trade fair for mountain areas (*Mountain Planet*, formerly *Salon d'Aménagement de la Montagne*)

⁵ Discussion with Mickael Frottier (Editor-in-chief of *Montagne Leaders*).

data set (Atout France, 2013, 2015, 2016, 2018). Initially, the methodology was not described, but since the beginnings of the 2000s, a quick summary explains the methodology and data panel. Since 2014, the questionnaire used for the survey is also available on the website of the journal. Falk and Vanat (2016) have already used this dataset and noticed missing values before 2005.

We have considered two time periods and corresponding sets of ski resorts. Collection A spans 131 ski resorts, for which data is available for the 5 types of investment (new ski lift, ski lift maintenance, snowmaking, ticketing, and ski slope remodeling) and cover the period from 2005 to 2016. Collection A contains ski resorts, which have at least invested in one of the five categories over this time period.

Collection B spans 100 ski resorts, and focuses on snowmaking investments only, from 1997 to 2014, and only contains ski resorts, which have invested at least once in snowmaking over this entire period of time. A thorough analysis of the archives of the journal was necessary to develop this unique dataset. In general, the average answer rate over the 1997–2014 period relating to the snowmaking survey is quite low: 44% (± 8). A more precise overview shed an additional light: the smaller the ski resort is, the lower its probability to answer the survey (See Table 4). The declining answer rate depending on resort size can have several explanations: the smallest resorts do not invest each year in snowmaking facilities because they have a discrete investment strategy. They might have difficulties to set an annual investment strategy. Investment information can also be harder to get by the smallest ski resorts: small staff, no dedicated person for investment controlling, etc.

Table 4. Average answer rate to Montagne Leaders snowmaking survey for ski resorts in the French Alps (1997–2014)

Ski resort size	S	M	L	XL	Total
Number of ski resorts in the BD Stations database	65	20	39	15	139
Answer rate (%)	17	47	73	90	44
	(± 7)	(± 17)	(± 10)	(± 10)	(± 8)

The datasets A and B include missing values. However, since the survey results are provided only for ski resorts with investment, we have assigned 0€ value to missing values.

2. Snow reliability conditions

Snow conditions in each ski resort were computed using the SAFRAN-Crocus model chain (Durand et al., 2009), applied specifically for ski resorts, based on spatial and technical characteristics of ski resorts named gravitational envelopes (François et al., 2014, 2016) through the use of the Crocus-Resort snowpack model (Spandre et al., 2016b). This model chain was used to assess past and future changes in snow reliability in French Alps ski resorts (Spandre et al. 2019a; Spandre et al. 2019b). The snow reliability index (%) is defined as the fraction of the surface area of the gravitational envelope with a minimum quantity of snow for skiing. A surface is declared snow reliable when the snow mass exceeded 100 kg m^{-2} , i.e., 20 cm of snow with a density of 500 kg m^{-3} (Spandre 2016;

Spandre et al. 2019b). The modeling system provides indicators of the annual scale snow conditions, focusing on the Christmas and winter holiday periods, which are of critical importance for ski resorts economics (Spandre 2016; Spandre et al. 2019b). In this article, we assess snow conditions for each ski resort using simulations of natural snow conditions only (i.e., without grooming and snowmaking) and the corresponding reliability index.

3. Empirical model

This study seeks to assess and qualify the relationship between snowmaking investments and snow reliability conditions. This is tested through an econometric analysis. To estimate the impact of the snow reliability index in the prior year on snowmaking investment trends in ski areas, we present an empirical model of the snowmaking investment function. In tourism literature, snowmaking investments are mostly considered an explanatory variable from the tourism demand function (Falk and Vanat, 2016) rather than the dependent variable. Since no literature exists on snowmaking investment determinants, we set an empirical model as a function where output is snowmaking investments mainly determined by past natural snow reliability.

The linear model to be estimated is:

$$I_{i,t} = \alpha_i + \beta_1 \cdot Snow_{i,t-1} + \lambda_t + \epsilon_{i,t}$$

where i and t denote the ski area and the year. The left-hand variable $I_{i,t}$ denotes the snowmaking investment, deflated by the GPD deflator. $Snow$ is the natural snow reliability index. Only past snow reliability values ($t-1$) are considered. β_1 represents the respective coefficient. In line with our second assumption that we test, a negative sign is expected for β_1 . α_i is the ski resort specific effects, it captures all the time-invariant factors of each ski resort (e.g., ski resort governance model, be a part of a large company or the availability of water supply). λ_t is the time-specific effect; it captures factors that are common for all ski resorts, e.g., macroeconomic conditions. $\epsilon_{i,t}$ corresponds to the idiosyncratic disturbance.

We employ 4 widely used estimators for linear panel data: a pooled estimator computed using ordinary least squares (Pooled_OLS), fixed-effects estimators with first differences-transformation (FE_FD), and a within-transformation (FE_WITHIN), and also a random effect estimator using generalized least squares (RE_GLS). The pooled estimator assumes that $\alpha_i = \alpha \forall i$, i.e., α_i is constant for all ski resorts. In our case, this estimator is probably not the most efficient, because of the intrinsic characteristics of ski resorts that influence the snowmaking investments. The central distinction between fixed and random effects is whether the unobserved individual effect α_i incorporates elements that are correlated with the regressors in the model. There is little justification in economics for treating the individual effects as uncorrelated with the regressors (Greene, 2019, p. 414). As the random effects specification requires a strong assumption, a fixed-effects estimator is generally preferred (Wooldridge, 2016). In our case, it seems reasonable to consider that the natural snow reliability index is strictly exogenous. We assess our model with the four estimators presented. We use the Hausman specification test (Hausman, 1978) to determine the preferred specification between within-transformation (FE_WITHIN) and the random effect estimator (RE_GLS). If the null hypothesis (H_0) of no correlation is not violated, fixed-

effects and random effects estimators are consistent, but fixed-effects specification is less efficient than the random effect. Under the alternative hypothesis (H_1), a random effects estimator is inconsistent and biased, and fixed effects is preferred. We also check if the pooled estimator (Pooled_OLS) is not more appropriate than a random effects estimator with the Breusch-Pagan Lagrange Multiplier test (Breusch & Pagan, 1980). For the estimations, we use R's plm package (Croissant & Millo, 2008). The within-transformation (FE_WITHIN) and the random effects specification (RE_GLS) control time-specific effects.

5. Results

1. Capital intensity ratio

The capital intensity ratio calculation highlights the key role played by investments in the ski tourism industry. We estimate the capital intensity ratio for 6 main sectors of the tourism industry, based on industry groups of the French industry standard classification system (APE code). Table 5 shows the mean capital intensity ratio by the tourism industry sector in France over the 2009–2016 period.

Table 5. *Capital intensity ratio by the tourism industry sector in France (2009–2016)*

	Tourist accommodation	Traditional catering	Casinos and gambling	Theme parks	Balneology and body care	Cable car transportation
Number of companies in the Diane database	18,995	36,281	280	418	1235	99
capital intensity ratio (k€/FTE employee)	63 ± 4	9 ± 1	40 ± 6	89 ± 24	28 ± 2	158 ± 20

Unsurprisingly, catering is not a capital intensive sector while cable car transportation is the most capital intensive sector (158 k€/FTE). Such a high level can be explained by the low number of full-time equivalent employee in this industry (around 9500) related to the seasonal activity in ski resorts. Ski lift operations involve high investments to maintain competitive facilities such as cable cars and gondolas. Hence, the ability to invest is a crucial issue for ski lift operators.

2. Descriptive statistics

We provide descriptive statistics based on our 2 samples. Collection A (2005–2016) is only used for a descriptive and comparative purpose while collection B (1997–2014) is used in our econometric modeling.

Collection A (2005–2016) contains 131 ski resorts. It highlights the wide variety of French Alps ski resorts with few very large ski resorts and many smaller resorts. All M, L, and XL ski resorts from the BD Stations are included in the sample with only 8, out of 65, S (small) ski resorts missing.

Table 6 displays several descriptive statistics based on Collection A. The ski resort size is linked to elevation; the larger resorts are generally located at higher elevation. Small

ski resorts represent more than 40% of our sample while there are 11% very large ski resorts. However, very large resorts represent the major amount of investment: 44% while smaller resorts only account for about 5%. This snowmaking investment distribution is consistent with the ski lift power distribution, whereby very large and large ski resorts represent respectively 42% and 45% of the total ski lift power in the French Alps, while medium and small ski resorts count for 9% and 5%, respectively.

Table 6. *Descriptive statistics about investments 2005–2016 (12 years) as a function of ski resort size*

	S	M	L	XL	Total
Number of ski resorts in the collection/(number of ski resorts in the BD Stations database)	57/(65)	20/(20)	39/(39)	15/(15)	131/(139)
Ski lift mean elevation (masl) weighted by SLP	1471	1683	1830	2088	1682
Cumulated investment in new ski lift (k€)	67,793	141,406	666,617	657,246	1,533,062
Cumulated investment in ski lift maintenance (k€)	14,457	28,829	127,747	190,401	361,434
Cumulated investment in snowmaking (k€)	28,872	46,841	232,351	234,516	542,580
Cumulated investment in ticketing (k€)	2641	4529	27,472	20,002	54,644
Cumulated investment in slopes tracks (k€)	6400	13,909	66,547	78,329	165,185
Total investment (k€)	120,163	235,514	1,120,734	1,180,494	2,656,905

All investments are in current prices, i.e., we ignore adjustment for inflation

Figure 2 shows the distribution of investments of ski resort operators over the period 2005–2016. Figure 2(a) shows that new ski lifts, ski lift maintenance, and snowmaking together account for almost 90% of the ski lift operators' investments. New ski lifts are, by far, the major investment item for ski lift operators. Snowmaking represents the second item of investment, which varies between 20 and 24% depending on the ski resort size. The share of snowmaking investments is rather stable regardless of the ski resort size.

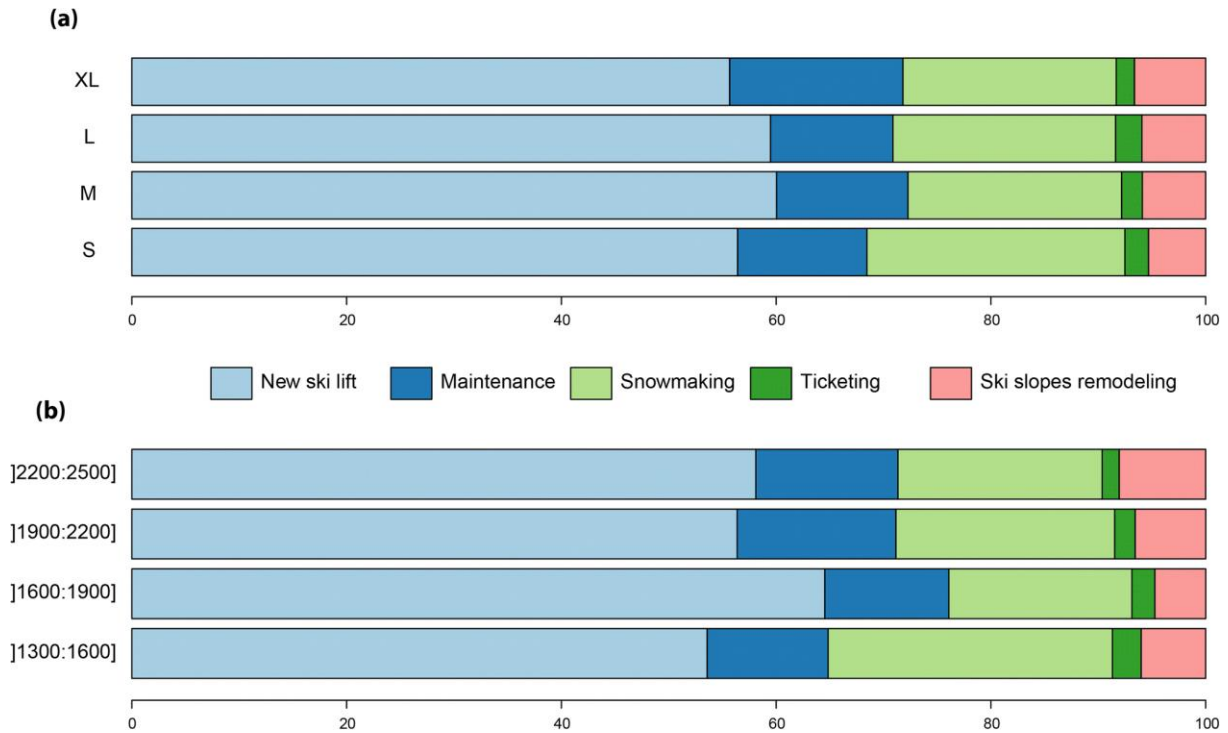


Figure 2. Distribution of investments over the 2005–2016 period, for the 5 main types of investment: new ski lift, ski lift maintenance, snowmaking, ticketing, and ski slope remodeling. Results are provided as a function of (a) ski resort size and (b) the mean elevation of the ski resort (by steps of 300 m)

According to Figure 2(b), the investment distribution as a function of mean elevation follows almost the same pattern as Figure 2(a). New ski lift investment remains the main cost item. However, some distinctions appear. Over the period studied, lower elevation ski resorts, with a mean elevation between 1300 and 1600 m, dedicated 26% of investments for snowmaking while the highest ski resorts allocated 19% of their investment to snowmaking. Ski resorts with a mean elevation between 1600 and 1900 have the lowest snowmaking investment rate (17%), preferring investments in new ski lifts. The lowest resorts have a higher allocation ratio for snowmaking. However, a decrease in snowmaking investment ratio according to the elevation does not clearly appear. The ski resorts at higher elevation are also concerned with snowmaking investment, consistent with Steiger and Mayer (2008).

We now turn to a longer time series collection B (1997–2014), specifically focusing on snowmaking investments and used in our modeling. Table 16 in the Appendix exhibits the list of ski resorts used in collection B.

Figure 3 provides the evolutions of investments in snowmaking by ski resort size over the 1997–2014 period. The overall snowmaking investment trend reached its peak in 2007. The 15 ski resorts from the XL group have invested as much as the 39 ski resorts from the L group.

Figure 4 captures the within-year relative standard deviations of snowmaking investments, for various ski resort size categories. The overall snowmaking investments dataset is highly heterogeneous, the relative standard deviation ranges from 1.6 to 3.1. Due to the spread of the distribution, snowmaking investment mean values are quite irrelevant.

Figure 4 shows highest investment dispersion for small and medium ski resorts. The data indicate a more discontinuous investment behavior among these ski resorts, with several years without snowmaking investment. These first findings corroborate that the ski resort size is a key driver that has a strong influence on the snowmaking investment strategies.

Table 7 displays descriptive statistics of natural snow reliability index and snowmaking investments regarding ski resort size group while Figure 5 stresses overall interquartile ranges of both variables. Table 8 and Figure 5 indicate a different snowmaking investment frequency regarding the ski resort size. Larger ski resorts invest higher amount and more frequently than smaller resorts. The snow reliability index is generally correlated to the ski resort size, which is due to the fact that larger resorts have mostly higher natural snow reliability ratios because of their higher elevation (François et al., 2014).

Figure 6 displays interquartile ranges of snowmaking investments and snow reliability index according to ski resorts size. It shows that investment boxplots feature a notable snowmaking investments increase in 2007 for small ski resorts (S) and to a lesser degree, for large resorts (L). The 2007 increase is less pronounced for medium ski resorts while it seems to happen in 2005 and 2006 for very large ski resorts (XL). Natural snow reliability index boxplots highlight the interannual variability of snow conditions. Table 16 in the Appendix shows within-ski resort deviations of natural snow reliability index and snowmaking investments (collection B). The relative standard deviation indicates a high dispersion of snowmaking investments.

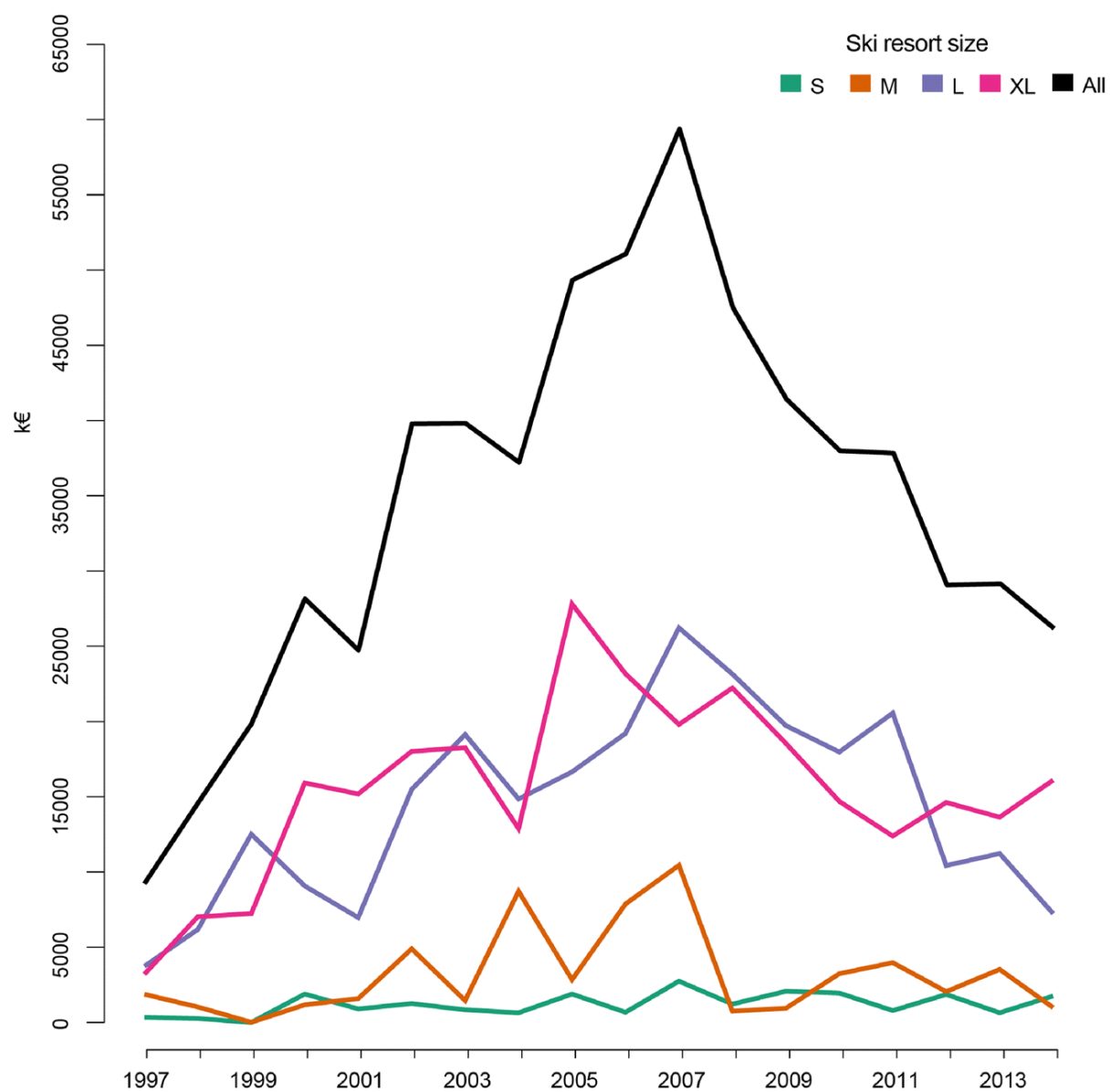


Figure 3. Evolutions of annual investments in snowmaking by ski resort size groups over the 1997–2014 period

Table 7. Descriptive statistics of snowmaking investments and natural snow reliability index regarding ski resort size

Ski resort size	Variables	n	Mean	SD	RSD	Min.	25%	Median	75%	Max.
All	Index (%)	1800	65.3	30.0	0.45	0	42.8	71.6	93.0	100
	Inv (k€)	1800	350.341	775.035	2.21	0	0	39.618	341.838	8572.824
XL	Index (%)	270	77.7	22.1	0.28	9.6	65.9	83.8	97.3	100
	Inv (k€)	270	1051.95	1359.90	1.29	0	154.031	558.784	1508.13	8572.82
L	Index (%)	702	68.936	27.71	0.40	0.731	50.18	74.635	94.469	100
	Inv (k€)	702	375.35	663.91	1.77	0	0	107.947	431.11	4790.21
M	Index (%)	360	61.25	30.06	0.49	0.05	38.47	63.70	89.40	100
	Inv (k€)	360	165.15	464.75	2.81	0	0	0	134.37	5508
S	Index (%)	468	55.62	33.37	0.60	0	24.29	56.81	87.98	100
	Inv (k€)	468	50.51	137.79	2.73	0	0	0	24.28	1209

Snowmaking investments (*Inv*) are in constant price from 2014. *n* denotes the number of observation

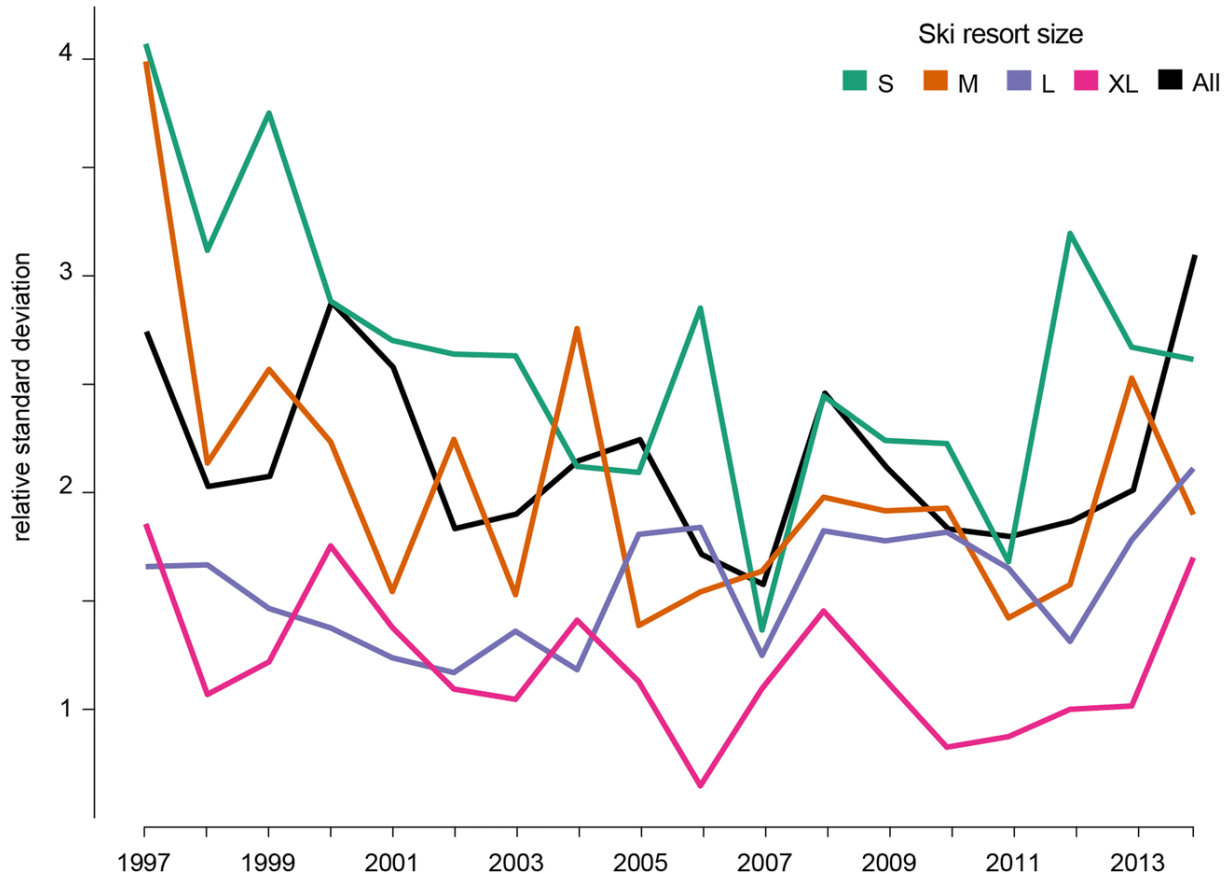


Figure 4. Within-year relative standard deviations of snowmaking investments, for various ski resort size categories (1997–2014)

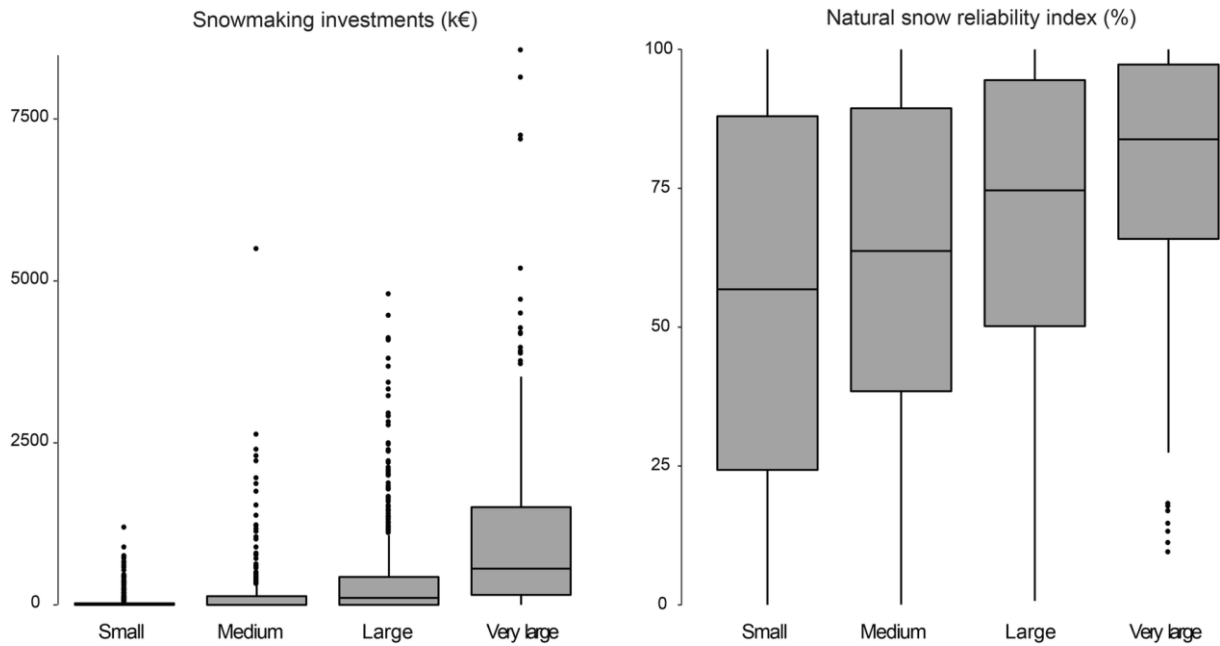


Figure 5. Overall interquartile ranges of snowmaking investments and natural snow reliability index regarding ski resort size

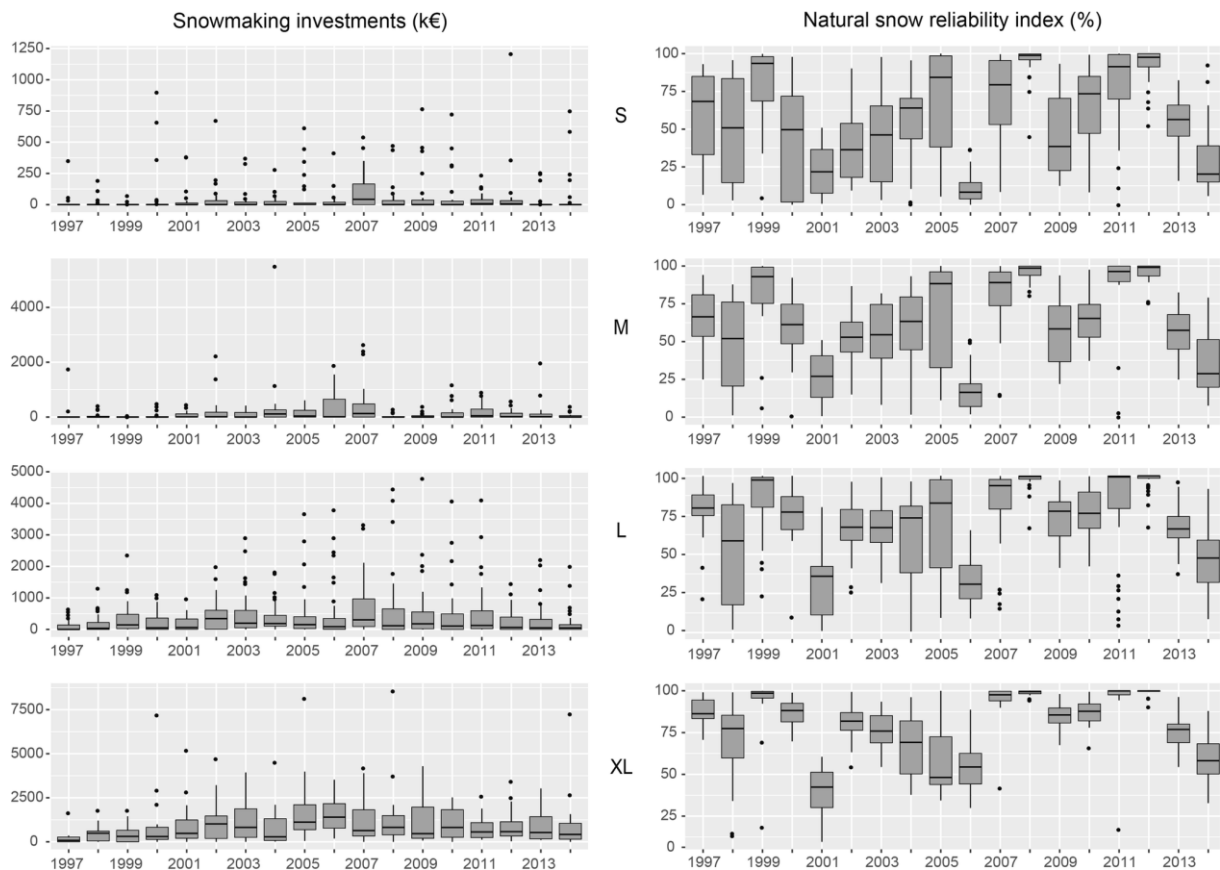


Figure 6. Interquartile ranges of snowmaking investments and snow reliability index according to ski resort size (1997–2014)

To assess the potential size-related ski lift operator behavior and test our first assumption, we split our sample in two groups: on one side, large (L) and very large (XL) ski resorts constitute the larger ski resort sample ($n = 972$) while the second sample contains smaller (M and S) ski resorts ($n = 828$). Using more than 2 groups—i.e., one for each ski resort size group—would reduce the number of observations and decrease the robustness of the analysis.

3. Empirical results

Table 8 and Table 9 provide results of the 4 estimators used in our econometric analysis for larger (L and XL) and smaller (M and S) ski resorts.

Table 8. Impacts of prior year snow reliability on snowmaking investments on the larger ski resorts sample (L and XL)

Variable	Pooled_OLS	FE_FD	FE_WITHIN	RE_GLS
Snow reliability ($t - 1$)	– 0.368 (1.224)	– 0.913 (1.181)	– 1.465 (1.832)	– 1.217 (1.423)
Constant	615.338 *** (94.586)	11.047 (41.333)		677.005*** (123.664)
Number of observations	918	864	918	918
Number of ski resorts	54	54	54	54

* $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. Estimations are based on clustered adjusted standard errors

Table 9. Impacts of prior year snow reliability on snowmaking investment on the smaller ski resorts sample (S and M)

Variable	Pooled_OLS	FE_FD	FE_WITHIN	RE_GLS
Snow reliability ($t - 1$)	– 1.148*** (0.369)	– 1.552*** (0.416)	– 1.240** (0.619)	– 1.300*** (0.384)
Constant	171.525*** (24.965)	1.513 (16.528)		180.597*** (29.966)
Number of observations	782	736	782	782
Number of ski resorts	46	46	46	46

* $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. Estimations are based on clustered adjusted standard errors

The comparison between the 2 tables indicates here significant results for small and medium ski resorts sample (Table 9) rather than larger ski resorts sample (Table 8).

Concerning the larger ski resorts sample (XL and L) from Table 8, the relationship between the lagged snow reliability index and the snowmaking investments is not significant. None of the estimators shows significant results. Thus, we do not discuss further the results for larger ski resorts.

Table 9 shows that, regardless of the estimator for smaller ski resorts group, the snow reliability the year before has a significant impact on snowmaking investment. The coefficient sign is negative for all the estimators. The similarity of the estimated coefficients suggests that our estimations are not suffering from effects of unobserved heterogeneity.

We do not reject the null hypothesis (H_0) with the Hausman test (p value = 0.9642). This indicates that both estimators are consistent but the random effects estimator (RE_GLS) is a more efficient option rather than within-transformation (FE_WITHIN). The Breusch-Pagan LM test is significant (p value < 0.01); it confirms that the pooled estimator is less appropriate because of the presence of panel effects (Greene, 2019).

These results partially corroborate that a negative relationship with a time lag exist between a meteorological variable and the economic conduct of ski resorts. Poor snow conditions lead to an increasing snowmaking investment in the next year only for small and medium ski resorts. Such a significant relationship does not exist regarding large and very large ski resorts.

6. Discussion

The aim of this study was to identify whether snowmaking investments in the French Alps resorts are affected by the ski resort size and the prior year natural snow conditions. We have used 4 estimators using a panel data set with 100 ski resorts in the French Alps, spanning several sizes and geographical settings. According to the results of our study, a snowmaking investment pattern seems to exist. Regardless of the resort size, over the past decades, ski lift operators dedicated around 20% of their investments for snowmaking. Snowmaking is an essential investment in this capital-intensive sector, for all ski resort sizes. The mean resort elevation does not seem to hold explanatory power in explaining changes in snowmaking investments apart from the lowest ski resorts. The snowmaking investment proportion is higher for the lowest resorts. Largest ski resorts invest higher amounts in snowmaking facilities. However, the frequency of occurrence of snowmaking investments differs substantially between larger and smaller ski resorts. Our results partly confirm the relevance of ski resort size to analyze snowmaking investments. This study also clearly shows that a negative short-term relationship exists between snowmaking investments and the prior year snow conditions for the small and medium ski resorts. There is no evidence that the same relationship exists for large and very large ski resorts.

We can interpret in different ways the absence of significant results for largest ski resorts sample. On the one hand, larger ski resorts are generally located at a higher elevation than smaller and thus are less sensitive to poor snow conditions (François et al., 2014). On the other hand, their ability to have snowmaking investment plans regardless of natural snow conditions can also explain the lack of significant results. Larger ski resorts can likely set up snowmaking investment strategies that go further than short-term reaction strategies as observed with smaller ski resorts. Snowmaking investment is an integral component of ski resort's investment plans and steady snowmaking investments for many years may have also reduced the natural snow conditions sensitivity of larger ski resorts. This conduct has led larger ski resorts to be one the most equipped with snowmaking facilities.

Larger ski resorts might have motivations for snowmaking investments that are independent on the snow reliability of the previous year. Larger ski resorts find an advantage by setting a reinvestment strategy. Investments are necessary to remain efficient in a mature

and competitive ski market. From an accounting perspective, investments give rise to depreciation and amortization which reduce company taxable income. However, the main finding that a relationship governs snowmaking investments based on prior-year snow conditions for small and medium ski resorts should be tempered. If a poor snow season can boost a snowmaking investment decision the year after, a succession of many extreme warm winters can lead ski lift operators to a critical financial position. Such a situation can also be damaging for the ski resort image with the risk of a permanent shift in demand to other ski resorts.

Our study suffers from both model and data used limitations. The natural snow reliability index is the only explanatory variable in our model; thus, it has not considered several factors (e.g., financial ratio, management model, risk perception of ski resort operators) that might influence investment ability and decision. Introducing other panel data would be appropriate to reinforce the specification of our model. Although the evolution of the ski lift power within a ski resort shows generally small changes over the time period considered, its evolution over the years for each ski resort could be better to analyze the ski resort size effect rather than the use of size groups.

A comparison between estimations based on different short-term periods could lead to assess whether snow conditions effects are stationary in time. In addition, the more ski resorts have invested, the less their sensitivity to natural snow conditions should be pronounced because snowmaking inherently reduces snow reliability hazard. This effect is not captured in our analysis, given that our snow reliability index is only based on natural snow conditions. Accounting for variations of snowmaking fractional coverage for individual ski resort is currently not possible in lack of sufficient data on snowmaking equipment rate. Our analysis of snowmaking investment amount could help fill in this gap in the future. The coefficient of the relationship may change over time. It can decrease if the ski resort operators reach a threshold for snowmaking facilities or face a decreasing accessibility to water supply. Changes in legal rules and public support can also have a noticeable influence. Overall, the gradual decrease over time of the intensity of the relationship could be investigated in further studies.

The use of a 1-year time lag in our model is a basic attempt to analyze operator behavior in response to meteorological conditions. Our econometric modeling only aims at assessing the past year's influence on snowmaking investment. This simplification does not claim to convey all the complexity of the ski lift operator investment strategy. Ski lift operators probably also establish their snowmaking investment decisions on their feedback experience. Thus, the yearly time scale is possibly not sufficient to properly analyze snowmaking investment strategies. Depending on the financial capacities of ski resorts, these investments can be considered on a pluriannual term and some of them are mid-term planned. While some years are characterized with a high amount invested in structural facilities (e.g., water retention dams or snow production systems) they are followed by years with smaller investments such as extension of snowmaking facilities or machine replacement. The threshold effect might also exist in snowmaking development. For instance, a new dam or artificial lake has to be planned if an existing snowmaking system is not provided with enough water supplies. Snowmaking facility authorization processes take time and can also

call for a multi-year planning strategy. Our modeling could be improved to capture a broader understanding of the snowmaking investment phenomenon. Past snowmaking investments as well as past snow events' memories and shocks can influence current investments. Such a ski lift operator complex behavior can justify the use of a dynamic econometric modeling. To do so, the difference GMM or the system GMM (generalized method-of-moments) estimators as proposed by Arellano & Bond (1991) and Blundell and Bond (1998) could be employed. These estimators would fit with our panel data with few time periods ($t = 18$) and many individuals ($n = 100$). Although difference and system GMM are very popular including tourism industry studies (Falk & Tveteraas, 2019; Garín-Muñoz & Montero-Martín, 2007; Töglhofer et al., 2011), they remain complex to implement and can easily generate invalid estimates (Roodman, 2009). We also must pay attention to the covered period (1997–2014) analyzed in our article. Although the relationship between poor snow seasons and the onset of use of snowmaking at the end of the 1980s and at the beginning of the 1990s is widely accepted, our panel data series do not cover this pioneer period. This era was a trial and error period for snowmaking development where technical and physical issues were the main concerns (Martin et al., 1990; SEATM, 1989) rather than a precise economic assessment. It took several years before a systematic economic survey emerged with reliable data. Due to the lack of investment data, a quantitative approach seems hardly possible on that earlier period.

We underline the influence of meteorological conditions for small and medium ski resorts but although they are significant, they are not sufficient to explain ski resort use of snowmaking. We focus our study on a specific data, investments which are hardly available for other European ski resorts. To our knowledge, the analysis of snowmaking investment motivations has seldom been addressed because of the lack of data. There is no equivalent study about European ski resorts with the exception of Gonseth's thesis (2008) using a sample of 87 Swiss ski resorts. The high specificity and the time span of our dataset make it nearly unique. Investment time series can be exploited in many different ways for vulnerability assessment, economic assessment as Falk and Vanat did (2016) or to understand economic dynamics of ski resorts (Falk and Tveteraas, 2019). However, potential results would be hardly comparable to other European ski resorts. Beyond the intrinsic limitations of our study, several elements indicate that snow reliability conditions are only one aspect to be considered in order to analyze ski resort investment strategies. The interest in public supports for the ski industry is often overlooked, although it is a widespread feature and has an influence on snowmaking investments. As a key socio-economic sector for mountainous regions, French ski resorts profit from public support (George-Marcelpoil and François, 2012). The support from local authorities is not specific to France. For Switzerland, Gonseth (2008) provided a detailed explanation of both the different public stakeholders and public aids that can help ski resorts. He highlighted that public sector is deeply engaged in snowmaking investment support and he described a complex multi-scale system, with federal, cantonal, and local stakeholders. He also provided an overview of a specific law dedicated to support investments in mountainous areas. He laid down that the average share of public funds to supported snowmaking projects represented around 34% (Gonseth, p.40). Falk and Steiger (2018) also mentioned government support and public ownership in Austria. The question of public support to ski lift operator is often controversial in France. National

authorities have stopped any direct support to ski resort development including snowmaking (George-Marcelpoil and François, 2012). However, regional and local authorities are more inclined to support ski resorts. The French Alps encompass two administrative regions (NUTS 2): *Auvergne-Rhône-Alpes* (AuRA) and *Provence Alpes et Côte d'Azur* (Région Sud) *régions*. Both regions have set granting investment subsidies for ski resorts since 2014. *Département*, which is an administrative subdivision of regions (NUTS 3-level) with intrinsic political power, can also directly support snowmaking investments together with *régions*. Beside regional involvements, local authorities play a key role with financial as well as logistical support, even in the case where they do not directly own or manage a ski resort. Public management for ski resorts is not unusual, especially for small ones: according to the BD Stations, in the French Alps, 63 out of 139 ski resorts are publicly managed (45%), they only correspond to 15% of the total ski lift power. Out of 65 small ski resorts, 51 are managed publicly and the other 14 are mainly managed by non-profit organizations or publicly owned companies. Regarding publicly owned ski resorts, they likely fulfill other requirements than their profitability. Hence, two concerns appear: on one side an impact assessment of public support plans for ski resorts and snowmaking, on the other side a better understanding of local authorities as a key stakeholder in ski resort snowmaking investment strategy. The first is temporary while the second is organizational and both elements are not mutually exclusive. Beyond this political support of ski tourism through snowmaking investments, the socio-economic context in which snowmaking development occurred should not be overlooked. Snowmaking business as well as legal frameworks, ecological concerns (Paccard, 2010), technical improvements (Campos Rodrigues et al., 2018) and ski tourism market evolution (Steiger and Mayer, 2008), are all factors that have influenced the snowmaking development. As investments decision rests on multiple factors and snow conditions are only one of them, clearer indications about ski lift operator motivations to snowmaking are necessary to go beyond this quantitative analysis. A qualitative approach, with in-depth interviews and questionnaire-based surveys, could lead to a better analysis of ski lift operator behavior with respect to snowmaking investments and will form the basis of future studies.

7. Acknowledgements

We thank the two anonymous reviewers who provided helpful and constructive comments that helped to improve the manuscript.

Chapitre III

ÉVOLUTION PASSEE DE LA FIABILITE DE L'ENNEIGEMENT NATUREL ET GERE DES STATIONS DE SKI DES ALPES FRANÇAISES DE 1961 A 2018

La section 1 « Résumé long en français » de ce chapitre III propose un résumé en français pour le lecteur francophone d'un article soumis en langue anglaise dans la revue *The Cryosphere*. La section 2 (p.63) propose la version originale telle que soumise dans la revue *The Cryosphere*.

Section 1 from Chapter III offers a French summary for non-English readers while English readers can directly refer to section 2 (p.63). This second section provides the original article as submitted in The Cryosphere.

Ce chapitre met en avant, comme le précédent, des demi-régularités dans les dynamiques d'investissements en production de neige. En effet, la modélisation utilisée repose sur l'identification de régularités observées sur 16 domaines skiables de la Savoie. Nous parlons là aussi de demi-régularité car la hausse systématique de la surface équipée en production de neige liée à des investissements en production de neige n'est observée que sur une partie des domaines skiables savoyards. Les résultats de cet article viennent confirmer l'existence de mécanismes supposés dans la littérature scientifique. En effet, ce chapitre met en évidence des gains de fiabilisation de l'enneigement sur les ailes de saison. Alors que Steiger et Scott ont démontré l'importance de la production de neige comme technique d'adaptation afin de réduire les risques climatiques futurs (Steiger & Scott, 2020), nous montrons que cette pratique a déjà permis, sur la période passée et sous certaines conditions, d'accroître la fiabilité de l'enneigement.

Ce chapitre est tiré d'un article soumis en août 2021 et en cours de discussion dans la revue *The Cryosphere*.

Référence de l'article

Berard-Chenu, L., François, H., George, E., and Morin, S.: Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2018, *The Cryosphere Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/tc-2021-270>, en discussion, 2021.

I. RESUME LONG EN FRANÇAIS

1. Résumé

La fiabilité de l'enneigement est un facteur clé d'impact climatique pour l'industrie des sports d'hiver, pour laquelle il existe davantage de littérature concernant les projections futures que les impacts observés dans le passé. Cette étude fournit une évaluation des changements passés de la fiabilité du manteau en neige naturelle et neige gérée de 1961 à 2018 dans les Alpes françaises. Nous avons plus spécifiquement utilisé les montants d'investissement en production de neige pour en déduire l'évolution du taux de couverture en production de neige à l'échelle individuelle de 16 domaines skiables des Alpes françaises. En raison de l'hétérogénéité des trajectoires de déploiement de la production de neige dans les domaines skiables, nous mettons en évidence différents gains dans la réduction de la variabilité et de la diminution à long terme de la fiabilité de la couverture neigeuse. La fréquence des conditions difficiles pour l'exploitation des domaines skiables sur la période 1991-2018 a augmenté en novembre et de février à avril par rapport à la période de référence 1961-1990. En général, la production de neige a eu un impact positif sur la fiabilité de l'enneigement, en particulier de décembre à janvier. Si, pour les domaines skiables les plus élevés, la production de neige a amélioré la fiabilité de l'enneigement au cœur de la saison hivernale, elle n'a cependant pas contrebalancé la tendance à la baisse de la fiabilité de l'enneigement au printemps, ainsi que pour les domaines skiables de plus faible altitude.

2. Introduction

Les évaluations explicites de l'impact du changement climatique sur l'exploitation des domaines skiables, basées sur les observations passées, sont limitées. La popularisation dans les médias au cours des dernières décennies de plusieurs études traitant des risques futurs du changement climatique pour le tourisme des sports d'hiver, ainsi que la récurrence des hivers peu enneigés ont conduit à considérer que le changement climatique a effectivement déjà eu un fort impact sur l'exploitation passée et actuelle des domaines skiables. Les preuves les plus solides des impacts du changement climatique sur le tourisme des sports d'hiver ont donc principalement été déduites des projections de changements climatiques futures, ensuite utilisées pour interpréter les situations passées et présentes, notamment à cause de l'absence d'études solides basées sur des observations passées. Parallèlement à ce manque de connaissances, l'efficacité de la production de neige sur la base d'observations passées a rarement été évaluée quantitativement : cela nécessite une analyse approfondie des conditions d'exploitation des domaines skiables pour les saisons passées ainsi que d'une manière qui permette d'identifier la contribution de la production de neige aux conditions d'enneigement actuelles.

Des études antérieures ont conduit au développement d'un système de modélisation permettant de simuler les conditions d'enneigement dans les domaines skiables français sur la période passée et future, en prenant explicitement en compte le damage et la production de neige. Cependant, dans ces études et en l'absence de données au niveau des domaines

skiabiles décrivant l'évolution de leur taux de couverture en production de neige, l'évolution temporelle de la production de neige a été appliquée uniformément à tous les domaines skiabiles. Une évaluation de l'impact de la variabilité interannuelle et du changement climatique à long terme sur les conditions d'exploitation des domaines skiabiles nécessitent de prendre en compte deux facteurs. D'un côté les conditions météorologiques observées qui déterminent des variations temporelles des conditions d'enneigement des domaines skiabiles. De l'autre l'évolution temporelle des capacités individuelles en production de neige de chaque domaine skiable. Dans les Alpes françaises, tous les domaines skiabiles n'ont pas suivi la même voie de développement en termes de production de neige, on s'attend donc à ce que différentes trajectoires d'équipement en production de neige dans différents domaines skiabiles conduisent à différents effets.

3. Matériel et méthode

En l'absence de données consolidées sur l'évolution du taux de couverture en production de neige dans chaque domaine skiable, cette étude utilise les montants d'investissement dans la production de neige comme variable de substitution pour déduire l'évolution de l'équipement en production de neige à l'échelle individuelle de chaque domaine skiable des Alpes françaises. Ces estimations sont utilisées pour produire des simulations d'enneigement à l'aide de la chaîne de modèles SAFRAN-Crocus, avec et sans production de neige. Cette modélisation couvre la période de 1961 à 2018 et nous permet de quantifier les changements passés de la fiabilité de l'enneigement à l'échelle des domaines skiabiles, en tenant compte explicitement des dynamiques d'équipement en production de neige à l'échelle individuelle des domaines skiabiles

1. Données sur les investissements dans la production de neige et relation entre investissements et taux de couverture en production de neige

Concernant les données sur les investissements en production de neige issues du magazine *Montagne Leaders*, nous considérons seulement celles qui se rapportent aux « équipements et concepts ». Afin d'établir un modèle basé sur les investissements et faute de données nationales, nous nous appuyons sur des données d'observation produites par la Direction départementales des Territoires de la Savoie (DDT 73). L'enquête de la DDT 73 compile l'évolution des surfaces équipées en installations de production de neige pour les années 2010, 2011, et de 2015 à 2018 pour un échantillon de 29 domaines skiabiles savoyards. Parmi différentes possibilités de modélisation, nous avons retenu un modèle reliant de manière linéaire la couverture de la surface équipée en production de neige et les investissements.

Le modèle linéaire à estimer est le suivant :

$$SMA_t = SMA_{t-1} + \alpha \cdot (I_t - I_{t-1}) + \epsilon$$

La variable de gauche SMA désigne le domaine skiable équipé en production de neige et I l'investissement cumulé en production de neige. La surface équipée en production de neige est estimée à partir de la surface équipée de l'année précédente ainsi que de l'investissement réalisé cette même année en production de neige. Parmi les 29 domaines

skiabiles équipés en installations de production de neige, 13 n'ont montré aucune augmentation de leur taux de couverture en production de neige bien qu'ils aient réalisé des investissements au cours de la période d'étude. Nous avons donc retiré ces 13 domaines skiabiles de notre échantillon. Ainsi, notre échantillon final de l'évolution individualisée de la production de neige concerne 16 domaines skiabiles.

2. Chaîne de modèles SAFRAN-Crocus, modélisation géospatiale des domaines skiabiles et indicateur de fiabilité de l'enneigement

Nous avons utilisé la chaîne de modèles SAFRAN-Crocus pour simuler les caractéristiques du manteau neigeux de 1961 à 2018. Dans sa version Resort, le modèle Crocus est également doté d'options dédiées permettant la représentation du damage et de la production de neige, à la fois en termes de caractéristiques physiques mais aussi de calendrier des opérations, de gestion et de taux de couverture en production de neige. Cette méthode fournit des indicateurs de fiabilité de l'enneigement au niveau des domaines skiabiles, à une échelle mensuelle de décembre à avril ainsi qu'un indicateur pour la période de Noël et un indicateur combiné (Noël et Vacances d'hiver) couvrant une période allant de la saison 1961-1962 à la saison 2018-2019.

3. Analyse statistique des indicateurs de fiabilité de l'enneigement

La fréquence à laquelle les domaines skiabiles rencontrent des conditions d'exploitation difficiles importe davantage que leur fiabilité moyenne pluriannuelle. Nous nous concentrons donc sur les saisons hivernales difficiles, et sur l'évolution de leur fréquence dans le temps. Nous prenons comme référence la valeur du 20ème quantile des indicateurs de fiabilité de l'enneigement pour la période de référence 1961-1990 (appelée Q20). Ce Q20 correspond aux conditions d'enneigement difficiles typiques d'une année sur cinq. Cette valeur est fonction de chaque domaine skiable, de sa couverture en production de neige et de la période de l'année. Nous analysons ensuite, pour la période 1991-2018, la fréquence des saisons d'hiver pour lesquelles les valeurs de fiabilité de l'enneigement sont inférieures à cette valeur Q20 de référence.

4. Résultats

1. Relation entre les investissements dans la production de neige et taux de couverture

La modélisation linéaire de reconstitution du taux d'équipement en production de neige estimée pour 16 domaines skiabiles de Savoie met en évidence l'hétérogénéité des trajectoires de déploiement de la production de neige. Les choix d'investissement affectent directement l'augmentation du taux de couverture en production de neige.

2. Évolution des indicateurs mensuels de fiabilité de l'enneigement

Si l'on se concentre sur l'indice de fiabilité combiné (périodes de Noël et vacances de février), le déficit d'enneigement naturel peut être presque entièrement compensé par la production de neige, sauf dans les cas où ce déficit est trop important (tel que l'hiver 1963-

1964). Lorsque l'on considère les indicateurs de fiabilité mensuels, on observe clairement des différences de fiabilité de l'enneigement entre les mois et entre les domaines skiables. On voit aussi comment la production de neige peut (ou non) compenser les déficits d'enneigement naturel, en fonction des conditions météorologiques mais aussi du taux d'équipement en production de neige propre à chaque domaine skiable.

3. Evolution de la fréquence des conditions d'enneigement difficiles pour les 16 domaines skiables de Savoie

En considérant uniquement la neige naturelle damée, les mois les plus touchés par un changement de fiabilité de l'enneigement sur la période 1991-2018 par rapport à la période de référence 1961-1990 sont novembre ainsi que les mois de février à avril. Les domaines skiables les plus élevés connaissent un dépassement de leurs Q20 respectifs principalement en novembre et avril. A mesure que la part des domaines skiables située sous les 2000 mètres augmente, le dépassement de ce Q20 s'observe sur davantage de mois de la saison.

En tenant compte de la production de neige et en appliquant pour chaque domaine skiable son taux de couverture tel que nous l'estimons pour 2018, on observe des valeurs de Q20 plus élevées. On remarque une tendance similaire avec la situation en neige naturelle seule, soit une raréfaction de l'enneigement en fonction de l'altitude.

En tenant cette fois compte de l'évolution historique du taux de couverture de chaque domaine skiable telle que nous l'avons reconstituée, on observe que la production de neige a eu un effet positif sur la fiabilité de l'enneigement dans les domaines skiables, en particulier en décembre et janvier et sur l'ensemble de la saison hivernale pour les domaines skiables les plus élevés.

5. Discussion

1. Limites des méthodes employées

La réanalyse météorologique SAFRAN utilisée est affectée par les changements de densité du réseau d'observation et des changements dans les modèles de prévision numérique. Ces changements peuvent potentiellement nuire à une utilisation pour des analyses sur des tendances historiques. Le modèle linéaire de croissance du taux de couverture que nous proposons exclu 13 domaines skiables qui n'ont pas connu d'augmentation de leur taux de couverture en production de neige malgré des investissements réalisés. Notre modélisation sur un nombre restreint de domaines skiables indique que les choix d'investissement en matière d'enneigement sont probablement plus complexes que ceux pris en compte par notre modélisation linéaire.

2. Quantification de l'impact du changement climatique sur la fiabilité de l'enneigement, avec et sans production de neige

Notre étude indique que non seulement la fiabilité de l'enneigement naturel ainsi que ses variations, mais aussi les effets de la production de neige en termes de fiabilité de l'enneigement, varient considérablement entre domaines skiables. Au cœur de la saison d'hiver, le déploiement de la production de neige a compensé la diminution de la fiabilité de l'enneigement naturel pour les domaines skiables à basse altitude, et dans la plupart des cas a augmenté la fiabilité de l'enneigement. Cependant en début et en fin de saison, le développement de la production de neige n'a pas contrebalancé la tendance à la diminution de l'enneigement. Ce travail renforce la nécessité de faire preuve de prudence quant à l'application à des échelles locales de déclarations générales quant à l'évolution des conditions d'exploitation des domaines skiables.

3. Peut-on calculer un facteur de réduction du risque lié au changement climatique suite à la mise en place de systèmes de production de neige ?

Les hivers avec les plus faibles enneigements restent difficiles, y compris si l'on tient compte des taux d'équipement en production de neige actuels, que ce soit en début (novembre et décembre) et en fin de saison (mars et avril). Par ailleurs les avantages de la fiabilisation de l'enneigement par la production de neige sont fortement hétérogènes entre les domaines skiables.

4. Les performances passées ne sont pas une garantie de résultats futurs.

Le succès partiel de la production de neige afin d'améliorer les conditions d'enneigement des hivers les mois bien enneigés peut fausser la perception du risques chez les exploitants de remontées mécaniques à l'égard des impacts futurs du changement climatique. Ils peuvent être amenés à se baser sur les performances passées de la production de neige pour planifier ses effets futurs comme technique d'adaptation aux impacts du changement climatique.

6. Conclusions et perspectives

Les résultats contrastés du déploiement de la production de neige mettent en évidence les différents degrés de vulnérabilité des domaines skiables en raison de leur situation géographique et de leur modèle économique. Ces différences ont affecté leur trajectoire d'équipement en production de neige. Une telle hétérogénéité d'équipement dans l'industrie du ski plaide pour que l'évaluation des risques liés au changement climatique soit effectuée, dans la mesure du possible, à l'échelle individuelle de chaque domaine skiable.

II. PAST CHANGES IN NATURAL AND MANAGED SNOW RELIABILITY OF FRENCH ALPS SKI RESORTS FROM 1961 TO 2018

Lucas Berard-Chenu^{1,2}, Hugues François¹, Emmanuelle George¹, Samuel Morin²

¹ Univ. Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM, 38000 Grenoble, France

² Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige, 38000 Grenoble, France

1. Abstract.

Snow reliability is a key climatic impact driver for the ski tourism industry, for which there is more literature regarding future projections than past observed impacts. This study provides an assessment of past changes in natural and managed snow cover reliability from 1961 to 2018 in the French Alps. In particular, we used snowmaking investment figures to infer the evolution of snowmaking coverage at the ski resort scale for 16 ski resorts in the French Alps. We find different benefits of snow management to reduce the variability and long term decrease in snow cover reliability because of the heterogeneity of the snowmaking deployment trajectories across ski resorts. The frequency of challenging conditions for ski resort operation over the 1991-2018 period increased in November and February to April compared to the reference period 1961-1990. In general, snowmaking had a positive impact on snow reliability, especially in December to January. While for the highest elevation ski resorts, snowmaking improved snow reliability for the core of the winter season, it did not counterbalance the decreasing trend in snow cover reliability for lower elevation ski resorts and in the spring.

2. Introduction

Ski tourism is a major socio-economic component of mountain areas mostly in developed countries (Vanat, 2020). Due to its reliance on the snow cover, ski tourism has for long been identified to be particularly vulnerable to climate change impacts, such as decreases in snow cover duration at low elevation in mountain regions (Abegg et al., 2007; Beniston et al., 1995; Martin et al., 1994). In order to reduce the impact of natural snow cover variability and its long term decreasing trend due to climate change, snowmaking has emerged and is nowadays routinely used in almost all ski resorts in developed countries (Steiger et al., 2019). Recent progress has been made in the literature to better account for snowmaking in future projections of snow reliability in ski resorts in Europe at the pan-European scale (Morin et al., 2021), in separate European countries (Austria: e.g. Marke et al., 2015; Norway: e.g. Scott, et al., 2020b; North America: e.g. Scott, et al., 2020a and France: e.g. Spandre et al., 2019a). However, while several studies have documented strong reductions in snow cover amount, depth and duration in many mountain regions of the world over the past decades (Hock et al., 2019; Klein et al., 2016; Marty et al., 2017; Matiu et al., 2021; Mote et al., 2018), explicit assessments of the impact of climate change on ski resorts

operations, based on past observations, have remained limited (Beaudin & Huang, 2014; Hamilton et al., 2003). In fact, the emergence in past decades and popularization in major news media of several studies addressing future climate change risks to ski tourism, together with the recurrence of snow-scarce winters in Europe (Durand et al., 2009) and North America (Cooper et al., 2016), have somehow led to the broadly accepted consideration that climate change has indeed already been having a strong impact on ski resorts operations in the past and at present (Knowles & Scott, 2020). Based on interviews with ski resort managers and ski tourists, several studies have documented the fact that many stakeholders from the ski tourism industry have perceived a change in meteorological and snow conditions, which they did not always attribute to climate change (Trawöger, 2014). The strongest evidence on climate change impacts to ski tourism has therefore been inferred primarily from future climate change projections, which is then used to interpret past and present situations, in the absence of solid studies assessing impacts based on past observations. In a way, the link between climate change and snow cover reliability appears to be so direct and obvious (less snow in a warmer world) that it has been somehow neglected in previous studies addressing past changes, with only a few exceptions. Alongside this knowledge gap, the efficiency of snowmaking based on past observations has seldom been assessed quantitatively: this also requires in-depth analysis of ski resorts operating conditions for past seasons, in a way that allows disentangling the contribution of snowmaking to actual snow conditions.

Previous studies have led to the development of a sophisticated modelling system to simulate snow conditions in French ski resorts for the past and future, taking explicitly into account grooming and snowmaking, based on the meteorological reanalysis system SAFRAN, the snow cover model Crocus and accounting for several key features of individual ski resorts (Spandre et al., 2016b, Spandre et al., 2019a). This model chain takes as input, for each ski resort, the fraction of ski slopes covered with snowguns. However, in past studies the time evolution of snowmaking was applied uniformly to all ski resorts (Spandre et al., 2019a), in the absence of resort-level data describing the past time evolution of snowmaking fractional coverage in ski resorts. A proper assessment of the impact of the interannual variability and long term climate change on ski resorts operating conditions requires not only to take into account observed meteorological conditions driving the time variations of snow conditions in ski resorts, but also the time evolution of their individual snowmaking capacity. In the French Alps, snowmaking has emerged in the 1990s, but not all ski resorts have followed the same development pathway in terms of snowmaking, and there is no consolidated database describing this past evolution (Berard-Chenu et al., 2020). For a given change in a climatic impact driver operating at the scale of an entire mountain range, various snowmaking equipment pathways in different ski resorts are thus anticipated to lead to different impacts.

In this study, we quantitatively assessed the changes in operating conditions of ski resorts, with and without snowmaking, taking into account the variability in snowmaking development dynamics across ski resorts. To do so, we analysed snowmaking investments figures by 16 ski resorts in the French Alps from 1997 to 2018 and developed an original

method to infer the time evolution of the snowmaking coverage for each ski resort. This data was used to feed the SAFRAN-Crocus model chain, making it possible to perform simulations with and without snowmaking for the past decades. Indeed, there is no long-term record of snow conditions in ski resorts, which could be used for this purpose, and there is no way to reconstruct what would be the snow cover situation without snowmaking, once it has been implemented in actual ski resorts. Numerical simulations make it possible to compare the state of the snow cover with and without snowmaking, everything else being equal. Section 2 introduces the methodology used for this study, section 3 provides the results, section 4 discusses them while section 5 concludes.

3. Material and methods

In the absence of a consolidated database providing the time evolution of the snowmaking coverage in each ski resort, this study uses investment figures related to snowmaking investment, in order to infer the time evolution of snowmaking coverage in individual ski resorts in the French Alps. To the best of our knowledge, this approach is unprecedented in the scientific community. Such estimates are then used to process snow cover simulations using the SAFRAN-Crocus model chain, with and without snowmaking, spanning the time period from 1961 to 2018, enabling us to quantify past changes in snow reliability at the ski resorts scale, explicitly accounting for snowmaking equipment dynamics in individual ski resorts.

1. Snowmaking investments dataset

Investment figures come from a snowmaking investment data set for 100 French Alps ski resorts from 1997 to 2018 (Berard-Chenu et al., 2020). The data set originates from the professional journal 'Montagne Leaders' who manages a yearly investment survey filled in a declarative manner by ski lift operators. Although collected by a non-scientific and unofficial organization, these data hold significant value. For instance Falk and Vanat (2016) and Berard-Chenu et al. (2020) used this data source for academic research purposes. The investment survey covers 5 types of investment: new ski lift, ski lift maintenance, snowmaking, ticketing, and ski slope remodelling. Each type of investment is broken down into subgroups. Snowmaking investments are decomposed into 6 types: equipment and concepts, water reservoirs, electricity, civil engineering, buildings and other. In our investment dataset we do not consider all snowmaking investments but only those referring to "equipment and concepts". Indeed, the subgroup of "equipment and concepts" is the most relevant proxy to capture the growth rate of the snowmaking coverage of ski resorts as it only accounts for the purchase of snow guns. The other snowmaking investments can refer to an increase of the snowmaking instantaneous production capacity i.e. an electrical power increase or an expansion of the water storage capacity. These investments may increase the snowmaking production efficiency without any growth of the ski slope areas equipped with snowmaking facilities. The investment dataset only contains ski resorts which have invested at least once in snowmaking "equipment and concepts" over the 1997-2018 period. Investments are in constant prices: we derived constant price investments from current price investments with the GDP deflator, a widely used inflation adjustment index.

The literature points to a broad range of figures on cost investment for snowmaking facilities. Table 10 shows several estimates related to snowmaking investment costs per unit ski slope surface area, ranging from 28k€ to 240k€ per hectare. In France, the latest estimate from *Domaines Skiables de France* dates back to 2018, in an internal training document intended for snowmakers, with a unit cost ranging between 130 to 150k€ per hectare.

Table 10. Snowmaking investment cost to equip ski slopes area

Source	Value mentioned	Value in constant price from 2018 (k€ per hectare)
SEATM(1989)	1 million FRF per hectare	240
Vlès (1996)	1 million FRF per hectare	200
CIPRA (2004)	136 k€ per hectare	162
Abegg et al. (2007)	25 to 100 k€ per hectare	28 to 114
Breiling et al. (2008)	150 k€ per hectare	166
Badre et al. (2009)	150 to 200k€ per hectare	165 to 220
DSF (2018)	130 to 150k€ per hectare	130 to 150

2. Snowmaking fractional coverage reference dataset

Atout France, which is the national organization responsible for monitoring the tourism sector, has not published estimations of snowmaking facilities since 2009. These estimates were the only reference for professionals (Badré et al., 2009), until the study of Spandre et al. (2015). The latter assessed that 32% of ski slope areas in the French Alps were equipped with snowmaking facilities in 2014, based on a survey involving ski resorts managers. They also predicted that this proportion was likely to reach 43% by 2020. DSF [*Domaines Skiables de France*], the professional association of the French ski resorts operators, produces a snowmaking coverage average rate based on information collected from its members on an annual basis. In its most recent release in 2020, it indicated that 37% of ski slope areas in France were equipped with snowmaking facilities. The comparison between the DSF snowmaking facilities rate in 2020 and the estimation of Spandre et al. is difficult since the latter only considers the French Alps and it is not fully certain that the mean indicator provided by DSF is representative of the French ski industry.

In contrast to the national situation lacking quantitative estimates of snowmaking coverage for individual ski resorts, such information is available for a subregion of the northern French Alps (*Département de la Savoie*) which corresponds to NUTS 3-level in the European union nomenclature of territorial units. Indeed, the *Direction Départementale des Territoires de la Savoie*, an administration in charge of the water policy, has initiated an observatory of snowmaking. This public body collects each year snowmaking data from ski resorts in Savoie, among which the snowmaking fractional coverage. Among the 32 ski resorts equipped with snowmaking facilities and registered in the *Direction Départementale des Territoires de la Savoie*'s database, we removed 3 ski resorts with missing or

questionable data. We have a sample of 29 ski resorts after data cleaning. For each ski resort, information is available for their total ski slopes area and its area equipped with snow production facilities for the years 2010, 2011, 2015, 2016, 2017 and 2018.

3. Relationship between snowmaking investments and snowmaking fractional coverage

We developed a model analyzing the relationship between the snowmaking surface area coverage with snowmaking investments. Among various possibilities, we retained a model relating them in a linear way (an exponential model was also tested, leading to insignificant differences for ski resorts with sufficiently numerous observation data).

The linear model to be estimated is:

$$SMA_t = SMA_{t-1} + \alpha(I_t - I_{t-1}) + \varepsilon$$

where t denotes the year.

The left-hand variable SMA denotes the ski slope area equipped with snowmaking facilities and I the cumulated snowmaking investment. α represents the snowmaking unit surface area equipment cost and ε is an error-term. We estimated the area equipped with snowmaking facilities based on the area equipped and the snowmaking investment increased both from the previous year. Among the 29 ski resorts equipped with snowmaking equipment, 13 showed no increase in the part of their snowmaking coverage despite the fact they made snowmaking investments over the study period. We removed these 13 ski resorts from our sampling since an increase in the snowmaking coverage rate over the six reference years is required to estimate the α coefficient in our modelling. Thus our final sample for the evolution of the individual snowmaking coverage encompasses 16 ski resorts.

4. SAFRAN-Crocus model chain, ski resorts geospatial modelling and snow reliability indicator

We used the SAFRAN-Crocus model chain to simulate snow cover characteristics from 1961 to 2018. SAFRAN is a meteorological reanalysis system, combining in-situ observations and numerical weather prediction model output to provide an estimate of the meteorological conditions as a function of elevation (by 300 m elevation steps), for “massifs”, i.e. mountain areas assumed to be meteorologically homogenous. This system makes it possible to reconstruct the time evolution of the meteorological conditions in the mountain regions of France since the late 1950s (Durand et al., 2009; Vernay et al., 2019), and has been used as a basis for several previous studies on the snow cover reliability of ski resorts in the French Alps and Pyrenees (e.g. Spandre et al., 2019b, and references therein). The hourly resolution SAFRAN meteorological conditions are used as input to the detailed, multilayer snow cover model Crocus, resolving natural processes occurring in the snow cover and at its interfaces with the underlying ground and upperlying atmosphere (Vionnet et al., 2012). In its Resort version (Spandre et al., 2016b), the Crocus model is also equipped with dedicated options for representing snow grooming and snowmaking, both in terms of their physical characteristics but also typical management operations timing and snowmaking

production rate (Hanzer et al., 2020; Morin et al., 2021; Spandre et al., 2016b). Crocus model runs were carried out for each relevant SAFRAN massif and all elevations, not only on flat terrain but also for 8 main orientations (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) and slope angles of 10, 20, 30 and 40°. Simulation outputs were then aggregated for individual ski resorts at a daily scale used to calculate a reliability index for different periods along the ski season. For each ski resort, a ski resort gravitational envelope is computed based on a Digital Elevation Model (DEM) and the location of ski lifts (François et al., 2014, 2016, Spandre et al., 2019a). Depending on the snowmaking coverage, simulations carried out with and without snowmaking are combined, as described in Spandre et al. (2019a). The location of ski slopes equipped with snowmaking is determined based on their position within the ski resort (elevation, distance to major ski lift, distance to main housing infrastructure), following Spandre et al. (2016b). This entire procedure enables to generate, for a given snowmaking coverage, a resort-level snow cover indicator, quantifying the fraction of the ski resort surface area where the amount of snow exceeds a given threshold (here, 100 kg m⁻² snow water equivalent, which corresponds to 25 cm of snow with a density of 400 kg m⁻³). Daily values of this indicator are averaged for each month from November to April, as well as for the Christmas time period from December 20 to January 5. This approach is comparable to the “snow reliable skiing terrain” approach developed and used by Steiger and Stötter (2013) and Scott et al. (2019). We also computed the combined reliability index, corresponding to the weighted average of the Christmas reliability indicator (15%) and the February reliability indicator (85%), shown by Spandre et al. (2019a) to correlate strongly, at the scale of the entire French Alps, to annual skier visits from 2002 to 2014, when using a fix 30% snowmaking coverage for all ski resorts. This method provides, ultimately, resort-level snow reliability indicators at the monthly scale (plus Christmas time period and combined indicator) spanning the full time period from 1961-1962 season to 2018-2019 season continuously, whose values can be computed depending on the snowmaking fractional coverage value, with a regular 15% step between 0% and 90% where 0% corresponds to grooming only. The time variable snowmaking coverage where considered as a linear interpolation of the values obtained by steps of 15% fractional coverage. In addition, based on the gravitational envelope computed for each ski resort, we compute the fraction of the ski resort above 2000 m elevation. This elevation threshold roughly corresponds to the divide between low-elevation and high-elevation mountain areas, most relevant in the context of elevation-dependent natural snow cover trends (Matiu et al., 2021) in the European Alps. It enables us to compare ski resorts' geographical characteristics, not only in terms of their minimum/maximum or mean elevation, but using a single indicator representative of their elevational coverage.

5. Statistical analysis of snow reliability indicators

The annual values of the annual-scale indicators values were post-processed as follows. Indeed, the study focuses on ski resorts operations and how they have been modified in the past decades, accounting for the role of snowmaking. What matters most for ski resorts is not the mean multi-annual snow reliability, or other metrics characterizing their multi-annual average conditions, but rather how frequently challenging operating conditions are encountered. Indeed, snow scarce winters, primarily related to the interannual variability of meteorological and snow conditions, and influenced by long term climate trends, are a key concern to the ski tourism industry (Abegg et al., 2020, Morin et al., 2021). We therefore focus on the characteristics of challenging winter seasons, and whether their frequency has changed in time. We take as a reference the value of the 20th quantiles of snow reliability indicators for the 1961-1990 reference time period (referred to as Q20 values), which correspond to the one-in-five years typical challenging snow conditions and is relevant for ski resorts operators. This value depends on the ski resort (because of their various elevation and elevation span), on the snowmaking fractional coverage, and on the time period of the year. We then analyze, for the time period 1991-2018, the frequency of winter seasons for which the snow reliability values are below the reference Q20. If the value corresponds to more than 20% of the years (i.e., 6 years in the case of a full 30 years time period), this means that the snow conditions have worsened compared to the reference period, and vice versa. This approach enables fair comparisons across time, for a given ski resort, without comparing, in absolute terms, the mean and low-quantile values characterizing snow conditions in different ski resorts or with different snow management options. The absolute values for mean or Q20 snow reliability values for different ski resorts can be very different, and need to be interpreted separately in assessments at the scale of ski resorts, together with the business model of the tourism destination encompassing each ski resorts, within which the reliability of the snow cover on ski pistes can play a very different role. For example, large high elevation ski resorts are based on high reliability values with low interannual variability, and offer little alternatives to downhill skiing in case of ski resorts closure, while lower elevation ski resorts embedded in a diversified destination are less dependent on a reliable snow cover on ski pistes, which is often lesser guaranteed in such a case (George-Marcelpoil & François, 2016; Luthe et al., 2012). Figure 7 presents a schematic description of the method and the data processing.

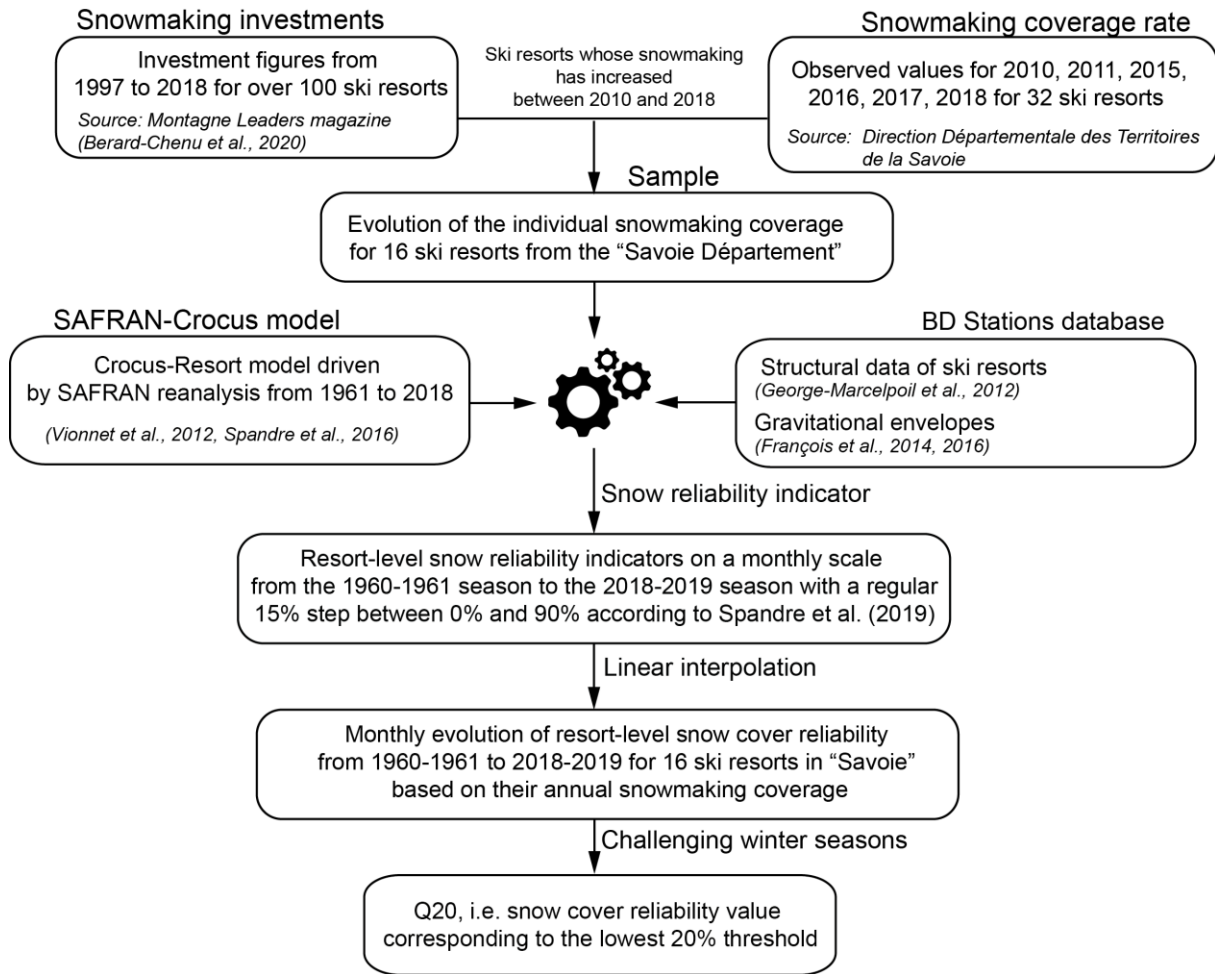


Figure 7. Schematic description of the method

4. Results

1. Relationship between snowmaking investments and fractional coverage

The linear modelling for reconstructing snowmaking coverage, described in section 2.3, was applied to 16 ski resorts in Savoie over the observed period (2010-2018). Figure 8 shows the estimated evolution of the snowmaking coverage rate over 1997-2018 for these 16 ski resorts. Estimates of snowmaking coverage are derived from individual investments of each ski resort. The figure highlights the heterogeneity of the snowmaking deployment trajectories depending on ski resorts. Investment choices directly affect the increase of the snowmaking coverage for each ski resort: the snowmaking coverage rates range from 0 to 37% in 1997 and from 14% to almost 70% in 2018. The average of the evolution of the snowmaking coverage based on the 16 ski resorts (black line) is higher than the national average (dashed line) throughout the period considered. The figure shows that a larger difference is reached for the year 2006 with a difference of almost 10% while in 2018 or 1997 the difference is 2% and 5%, respectively.

The linear modelling estimated a mean alpha coefficient of $8.48 \cdot 10^{-3}$, which corresponds to 118k€ per hectare with $CI_{95\%} = [87, 180]$. A bootstrap method ($n = 1000$ re-sampling of coefficient values) was applied to provide the 95% confidence interval for the coefficient estimate.

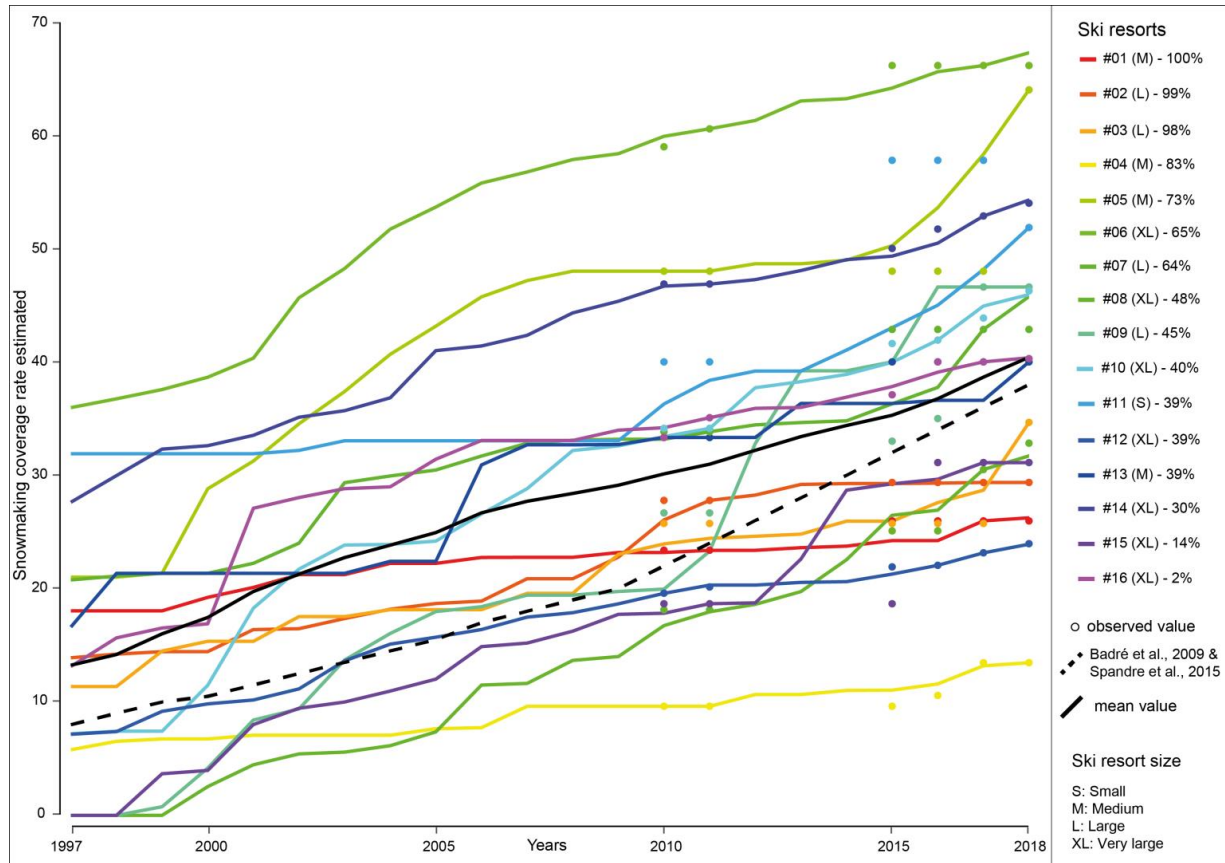


Figure 8. Evolution of the snowmaking coverage rate over 1997-2018 for the 16 ski resorts in Savoie with the linear model. Colours represent individual ski resorts, anonymized and ordered as a function of decreasing fraction of the domain below 2000 m.

2. Time evolution of combined (Christmas and February) snow reliability and relationship to snowmaking coverage

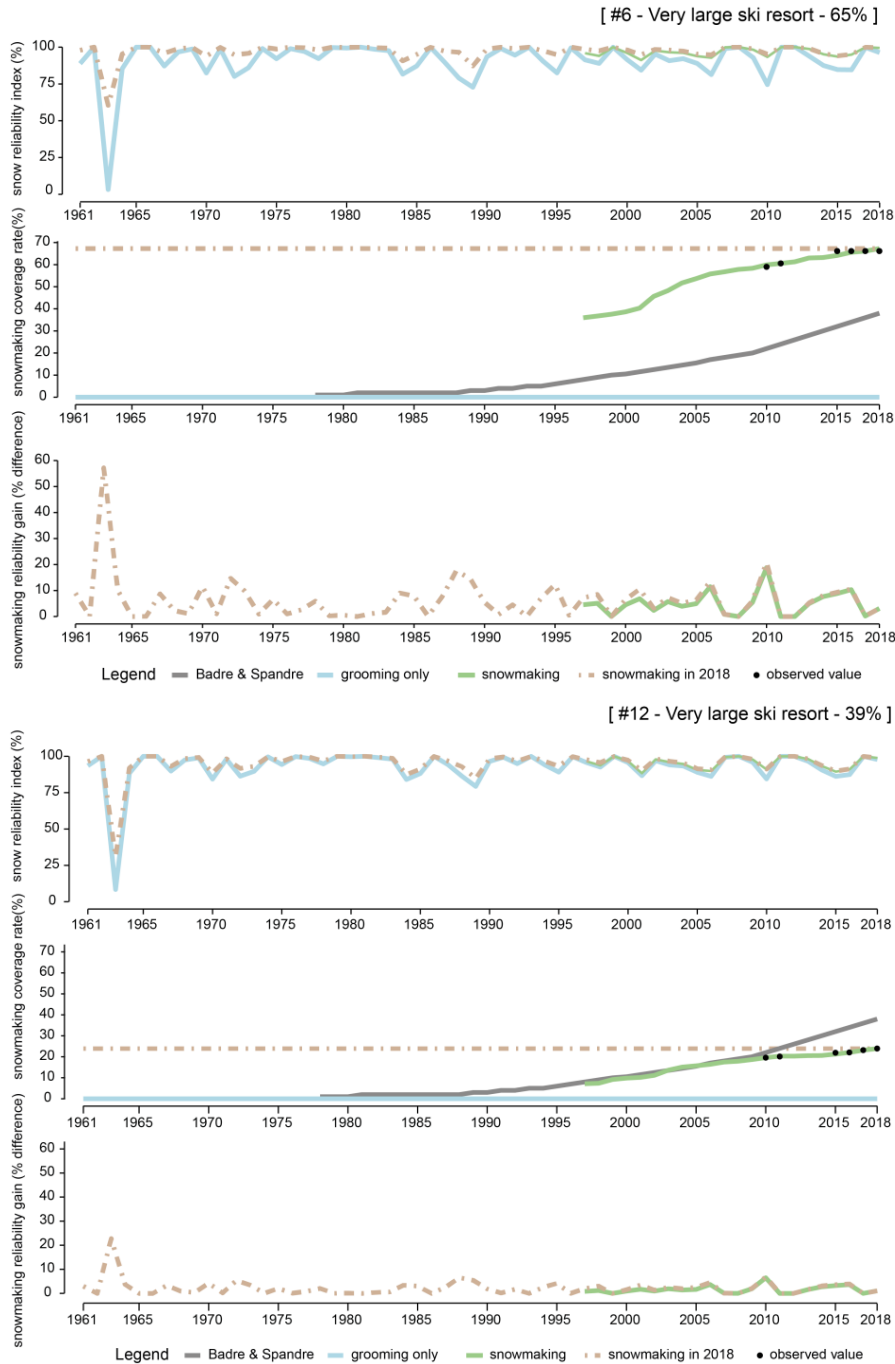


Figure 9. Time evolution of the combined snow reliability indicator and snowmaking fractional coverage for two contrasting very large ski resorts (ski resort #6 has 65% of its ski area below 2000m, 39% for ski resort #12) in Savoie from 1961 to 2018. The top row represents the time variations of the indicator for several snow management options (grooming only, snowmaking coverage corresponding to Badré et al., 2009 - mean value for all French ski resorts, individual evolution of the snowmaking coverage based on investment figures, and situation corresponding to using the snowmaking coverage in 2018 for the whole time period). The bottom row indicates the corresponding snowmaking fraction coverage. The last row represents the increase in snow cover reliability compared to the grooming only situation. The ski resort #6 shows a higher-than-average snowmaking equipment, while the ski resort #12 shows a lower-than-average snowmaking equipment.

Figure 9 displays the time evolution of the combined snow reliability indicator and snowmaking fractional coverage for two contrasting very large ski resorts in the Savoie from 1961 to 2018, with a snowmaking coverage below (reaching ca 24% in 2018) and above (ca 67% in 2018) the national average (estimated of the order of 38% in 2018), respectively. While some inter-annual variability is observed and both ski resorts display contrasting geographical characteristics regarding the share of their ski area below 2000m, in general the snow reliability values have remained rather high throughout the entire time period, except for the peculiar winter 1963-1964. Compared to a situation without snowmaking, the various snowmaking dynamics lead to very similar snow reliability values, with either no increase in reliability (when the reliability with groomed snow only is already very high and close to 100%) or an increase on the order of 5 to 10%. In this example, the ski resort #6 with the larger snowmaking coverage fraction shows lower interannual variability, when snowmaking is taken into account, than the ski resort #12 with lower snowmaking fractional coverage.

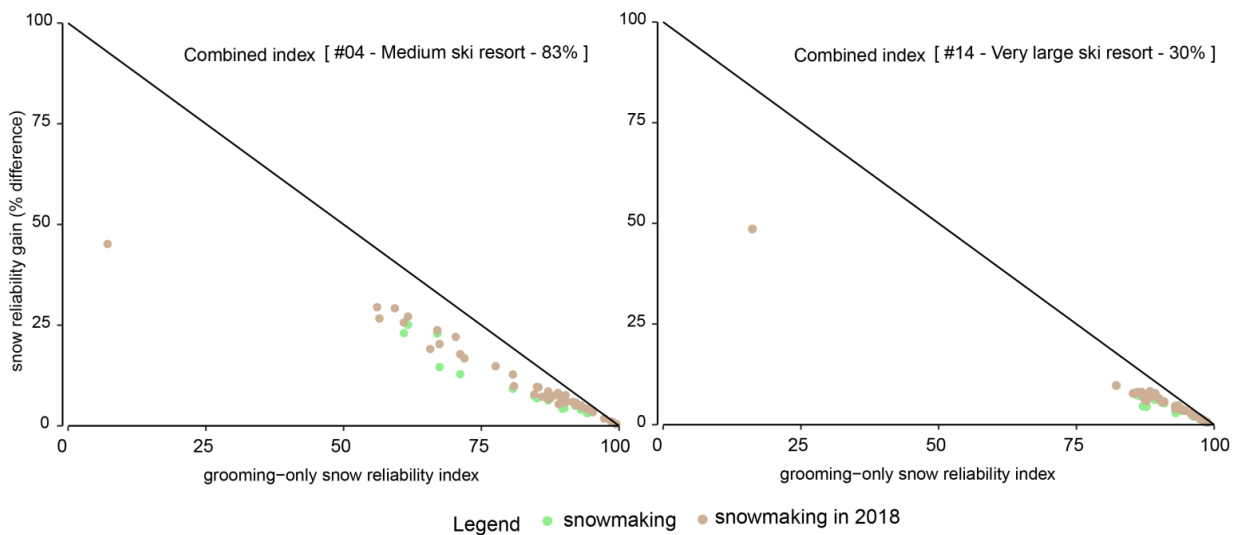


Figure 10. Relationship between the combined snow cover reliability difference (y-axis) between configurations with snowmaking and the snow cover reliability with grooming only (no snowmaking, x-axis), for two contrasting ski resorts.

Figure 10 shows the relationship between the annual snow cover reliability difference between configurations with snowmaking and the snow cover reliability without grooming (no snowmaking, x-axis), for two contrasting ski resorts (lower than average snowmaking coverage with 83% of the ski area below 2000 m on the left and higher than average snowmaking coverage on the right and with 30% of the ski area below 2000 m). It shows that, in these cases, the natural snow cover deficit can almost be fully compensated, for this indicator focusing on the Christmas and February time periods with high snowmaking coverage, except in the cases where the deficit is too large (in particular, the winter 1963-1964).

3. Time evolution of monthly snow reliability indicators

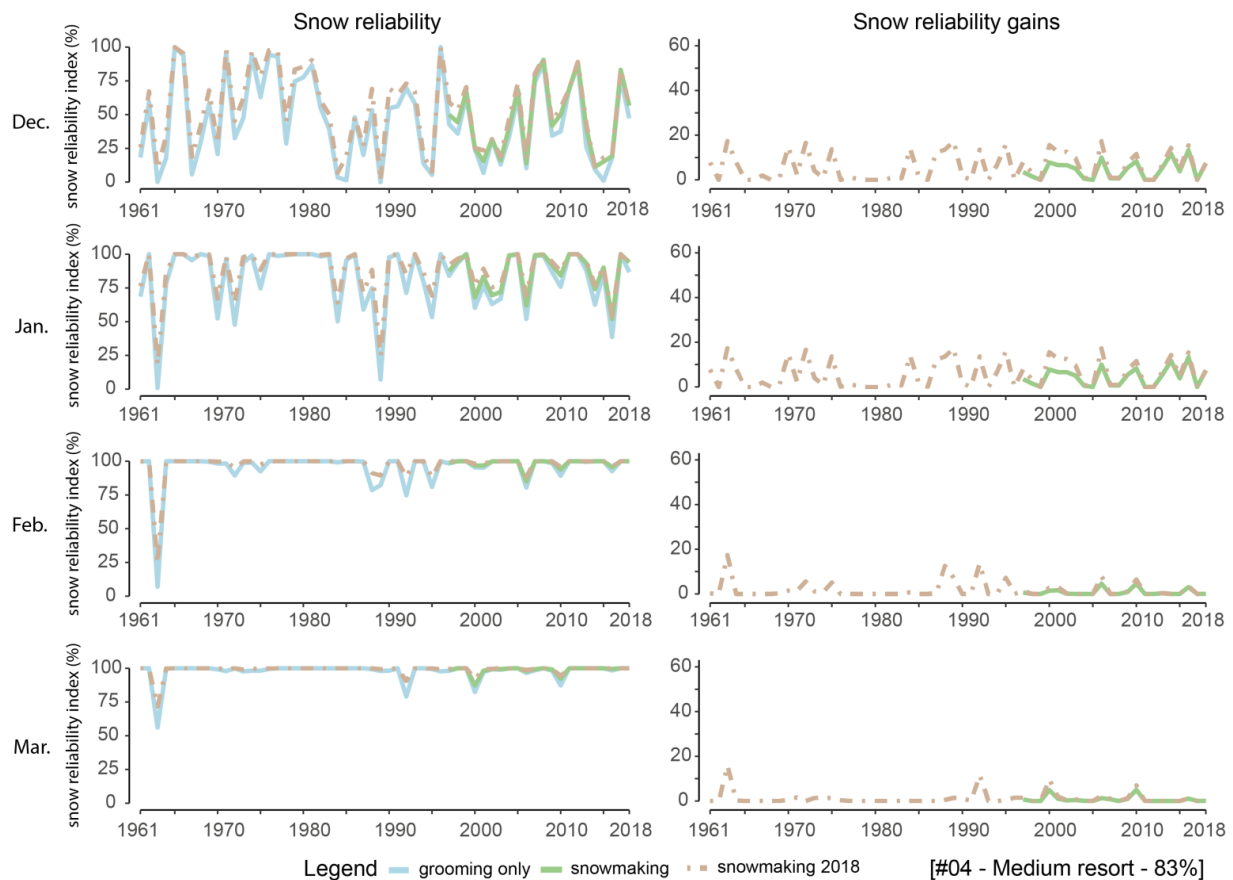


Figure 11. Time evolution of the combined snow reliability indicator and snowmaking fractional coverage for ski resort #04 (medium size, 83% of its surface area below 2000 m elevation) from 1961 to 2018. The left column represents the time variations of the indicator for several snow management options (grooming only, individual evolution of the snowmaking coverage based on investment figures, and the situation corresponding to using the snowmaking coverage in 2018 for the whole time period). The right column represents the increase in snow cover reliability compared to the grooming only situation (taking into account the evolution in snowmaking coverage since 1997 or using the fractional coverage for 2018 throughout the entire record). Each row corresponds to a monthly snow reliability indicator: December to March.

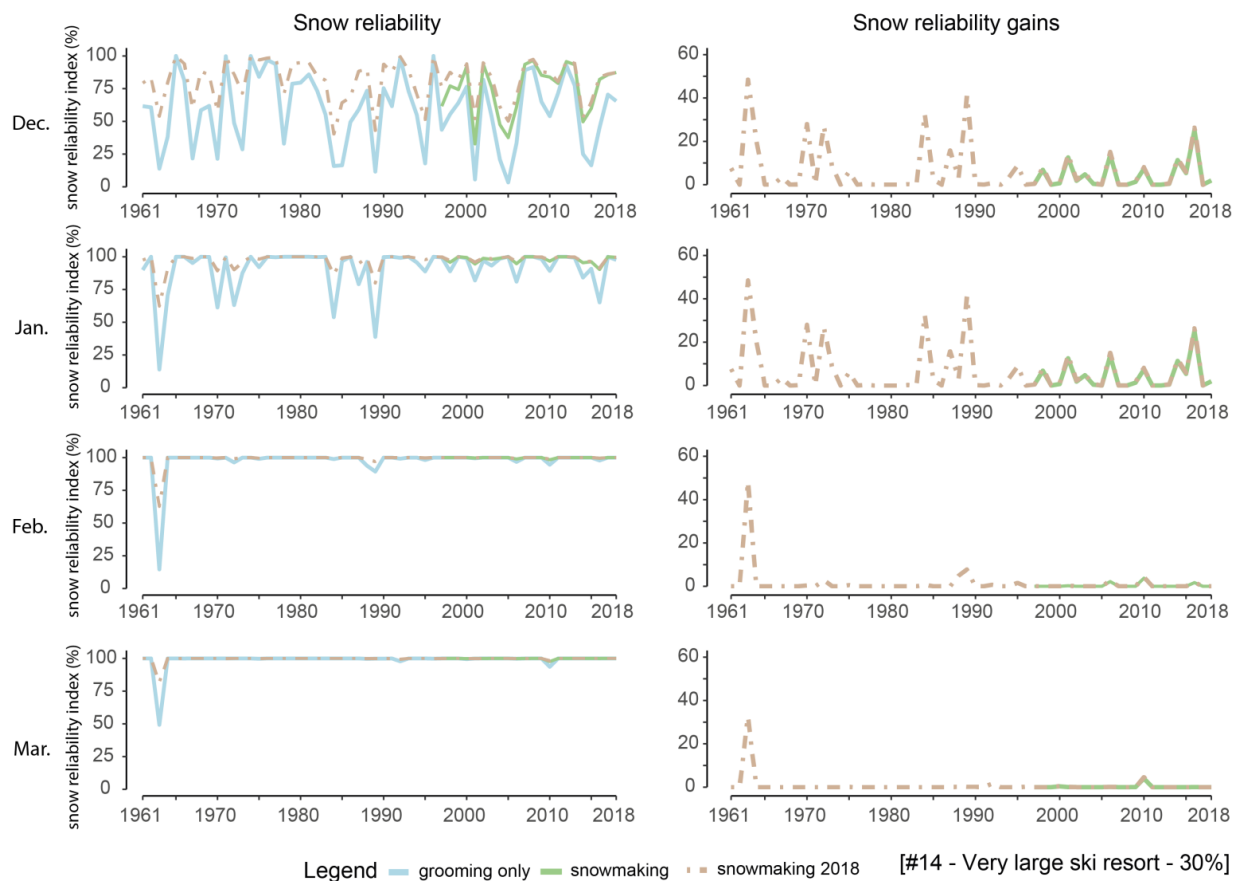


Figure 12. Similar to Figure 11 but for ski resort #14 (very large ski resorts, 30% of the surface area below 2000 m elevation)

Figure 11 and Figure 12 show the time evolution of the monthly snow reliability indicators for the two contrasting ski resorts introduced above, showing the large differences between reliability indicator values across the different months, in particular the lower values at the beginning and end of the winter season, and peak values, on average, in January and February.

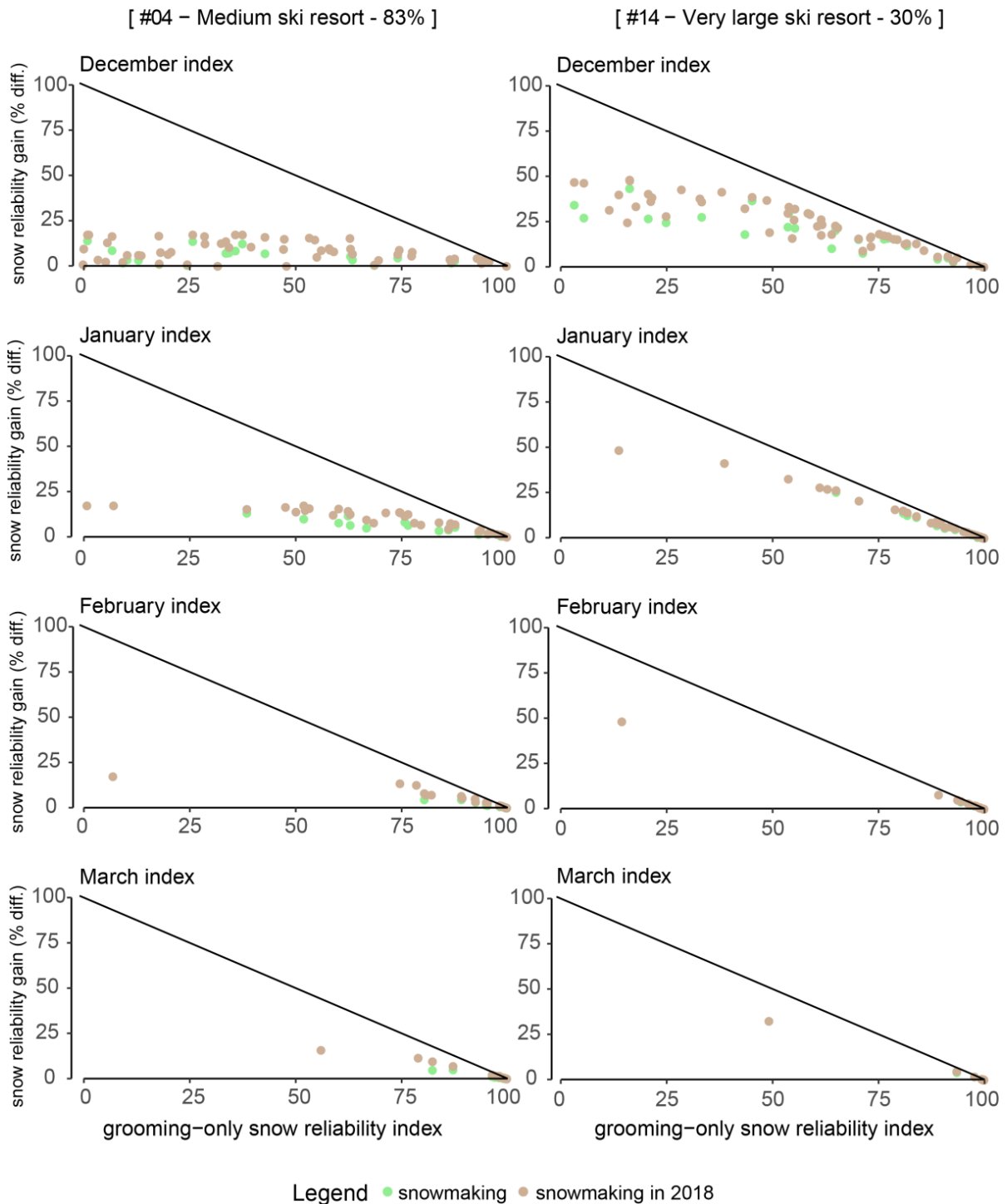


Figure 13. Relationship between the monthly (December, January, February and March), from top to bottom) snow cover reliability difference (y-axis) between configurations with snowmaking and the snow cover reliability with grooming only (no snowmaking, x-axis), for two contrasting very large ski resorts and for the time period from 1961 to 2018, on the left with below average snowmaking coverage, and on the right with above-average snowmaking coverage.

Figure 13 shows the relationships between the monthly indicator values in December to March, for the same contrasting ski resorts in terms of their snowmaking coverage. It clearly outlines the differences in snow reliability between months and between ski resorts, and how snowmaking can (or cannot) compensate for the natural snow cover deficit,

depending on the meteorological conditions but also on the snowmaking fractional coverage of individual ski resorts, which depend on individual strategic choices (and the means to implement them). The gap between snow reliability gains for the two contrasting ski resorts are larger, regardless of the snowmaking configuration, in the beginning (December and January) rather than the peak (February and March) of the winter season. For the December index, there is a maximum gain below 25% for the ski resort #4 (with lower than average snowmaking coverage and 83% of its ski area below 2000 m) while the ski resort #14 (higher than average snowmaking coverage and 30% of its ski area below 2000 m) can benefit from up to 50% snow reliability gains. With a snow coverage rate corresponding to 54% in 2018 (brown dots), ski resort #14 would have increased its snow reliability with snowmaking almost always up to 25% when its grooming-only snow reliability went down below 50%.

4. Change in the frequency of challenging snow conditions for the 16 ski resorts in Savoie

In this section we analyze the change in the frequency of occurrence of challenging snow conditions from 1961 to 2018, by splitting the entire time period in two periods of approximately 30 years (1961-1990 and 1991-2018) and analyzing how frequently, in the second time period, the snow conditions were better or worse than the Q20 threshold of the reference period 1961-1990. We provide the results for the 16 ski resorts in Savoie for which a dedicated analysis of the snowmaking coverage evolution was carried out.

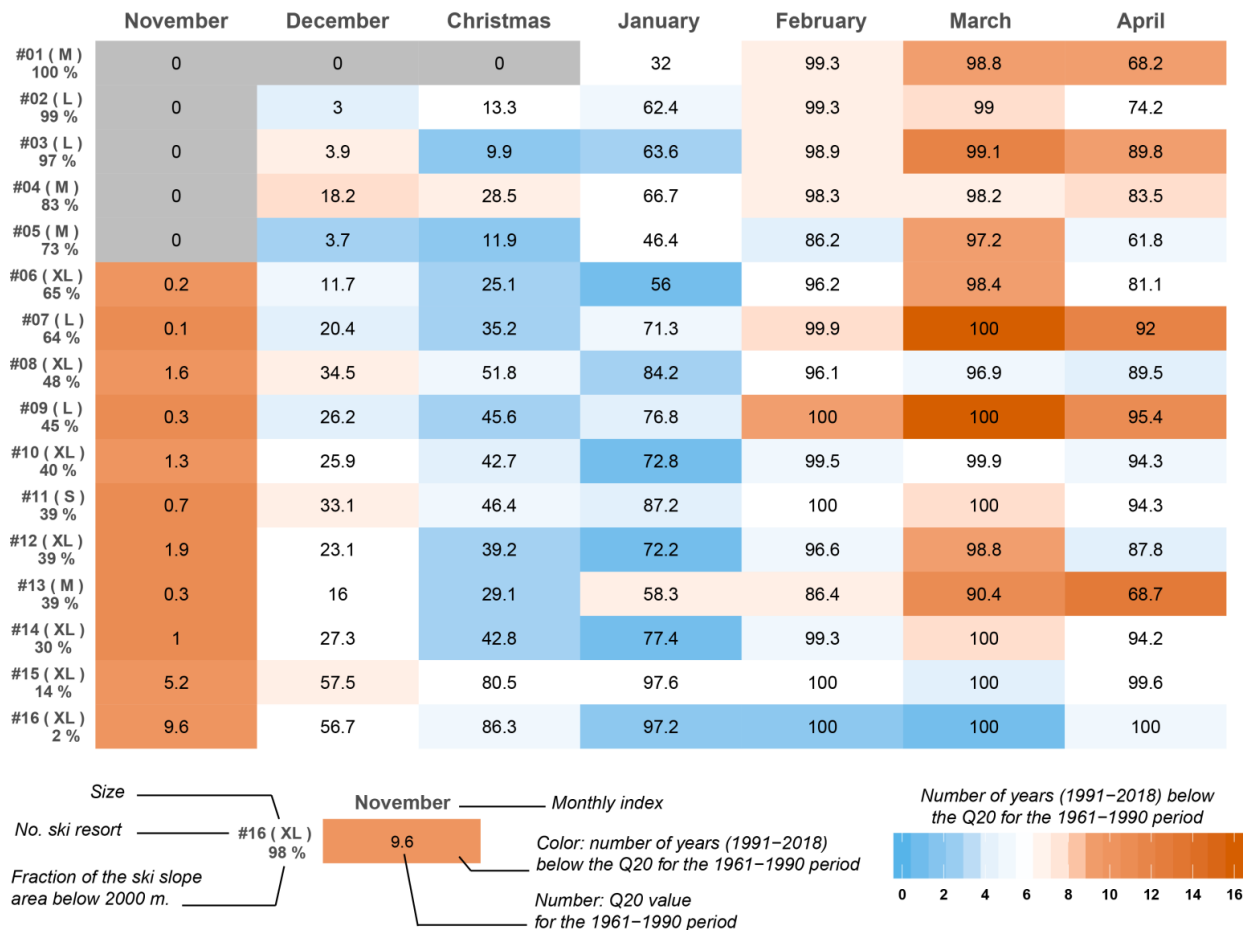


Figure 14. Frequency of occurrence of monthly snow reliability challenging conditions, between 1991 and 2018, below the reference Q20 value for the time period 1961–1990, without snowmaking throughout the entire time period. Each row corresponds to a ski resort (ranked as a function of decreasing fraction of the domain below 2000 m). Each column corresponds to a monthly reliability indicator. The values in the matrix correspond to the Q20 reference snow reliability indicator. Red cells correspond to larger frequencies during 1991–2018 than during the reference time period (more often challenging conditions), and vice versa in blue.

Figure 14 shows a synthesis, for the 16 ski resorts of our sample, of the monthly reliability values (reference Q20, which characterizes the upper threshold of challenging snow conditions) and the evolution of the frequency of exceedance below this threshold, in a situation without snowmaking. Largest snow reliability values for the reference period are found in February and March, with Q20 values ranging from 86 to 100% in February and from 90 to 100% in March. Snow reliability values in November are low, on the order of 0 (grey cells) to 10% maximum, increasing through December and January to February and March and lower values in April. The Figure shows that the months most affected by a change from 1961–1990 to 1991–2018 are in November (starting from low values), and February to April, with increasing rates of increases in the frequency of challenging conditions progressing with the month (February through April) as a function of ski resorts elevations (largest and highest elevation ski resorts show changes mostly in November and April, with changes in a growing number of months as the elevation range starts from lower elevation). The rate of change for the Christmas time period and January shows rather a decrease in the frequency of snow conditions below the reference value. This result is fully

consistent with the analysis of natural snow cover trends in the European Alps (Matiu et al., 2021), showing contrasting patterns depending on the elevation (represented here through the fraction of the ski resort below 2000 m) and on the month of the year and marked decreases in snow indicators especially at low to intermediate elevations throughout the winter season, and for ski resorts positioned at higher elevation mostly during springtime.

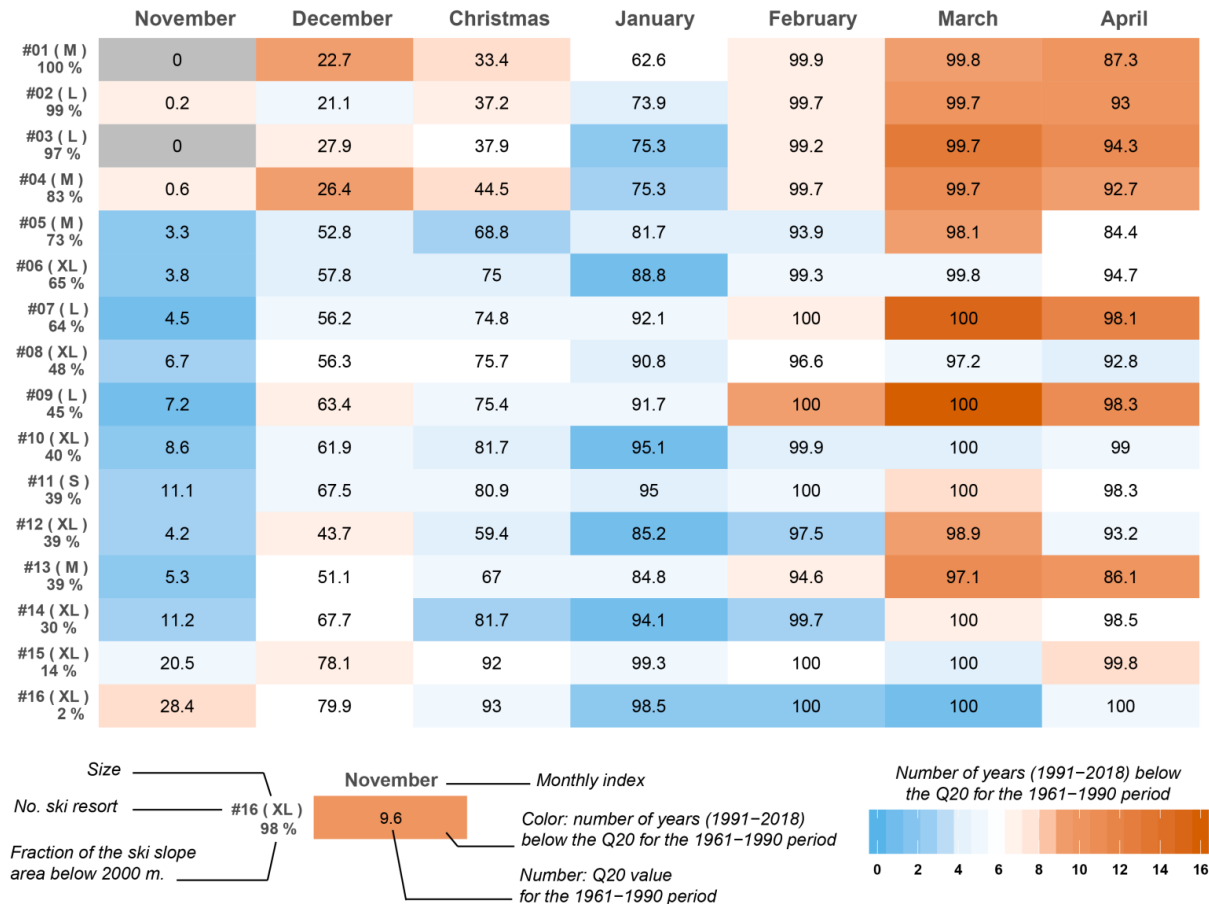


Figure 15. Same as Figure 14 but for the snowmaking coverage of 2018 throughout the entire period from 1961 to 2018 (including for the reference time period 1961-1990).

Figure 15 shows the same results as on Figure 14, but accounting for snowmaking with a fixed snowmaking coverage for each ski resort, corresponding to the value reached in 2018. Compared to the snow reliability values of Figure 14 with grooming only, the reference Q20 value, with snowmaking, is generally higher. However, with the difference of the November situation, the general trend in the frequency of exceedance below the Q20 reference time period shows a very similar pattern than in the natural snow situations, with a shift in snow reliability values but the same temporal pattern. This shows that the trend towards increased snow scarcity is rather similar even with snowmaking, but starting from a higher snow reliability level. Changes are most pronounced for the ski resorts with a larger fraction below 2000 m, and for higher elevation ski resorts only in the beginning and end of the winter season (November and March-April), with lesser negative changes (and even increases) in the core of the winter.

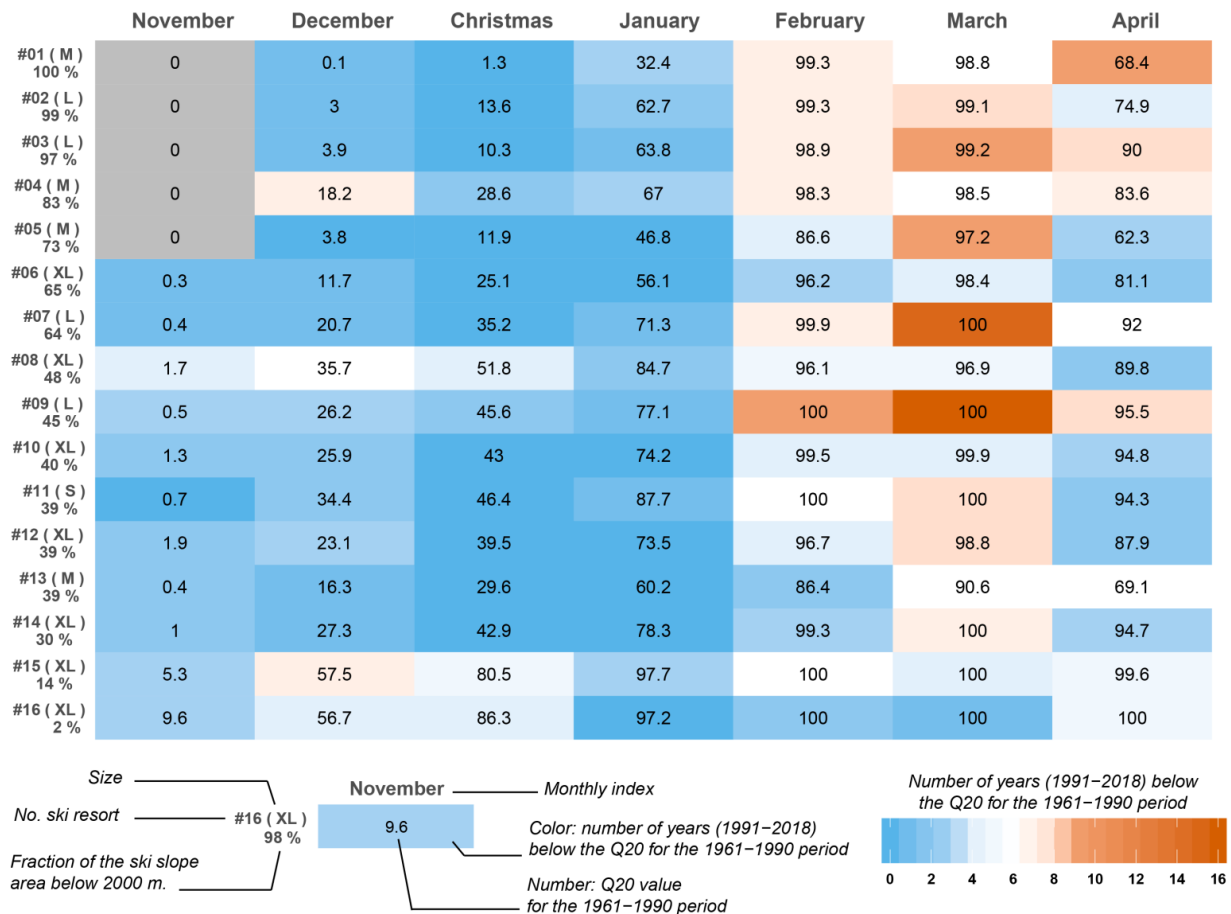


Figure 16. Same as Figure 14 and Figure 15 but with a snowmaking coverage variable in time for each ski resort

Figure 16 shows the results in the same form as Figure 14 and Figure 15, but takes into account the fact that each ski resort had different snowmaking coverage dynamics over the past decades. However, due to the fact that snowmaking generalized in the 1990s, the Q20 reference values for the period 1961-1990 are roughly similar to the figures in Figure 14. In general, the figure shows that snowmaking had a positive impact on snow reliability in the ski resorts of this sample, especially in December to January and for the entire winter season for the highest elevation ski resorts. For smaller and lower elevation ski resorts, snow conditions with snowmaking during the period 1991-2018 are often worse than without snowmaking between 1961 and 1990, which means that in such cases snowmaking did not counterbalance the decreasing trend in snow cover reliability.

5. Discussion

In this study, we have quantified the change in snow reliability in several ski resorts of the French Alps from 1961 to 2018, during a time when natural snow cover evolution has shown very strong changes especially at low to intermediate elevations, mostly attributed to the effect of atmospheric warming due to climate change (Matiu et al., 2021). Our study based on a long time period makes it possible to analyze the changes in terms of the frequency of occurrence of challenging snow conditions, defined during the reference period

1961-1990 as the value separating the 20% worst seasons (lower snow cover indicator values) from the full record. Based on snowmaking investment figures for 16 ski resorts in Savoie (Northern French Alps) we reconstructed their snowmaking coverage trajectory since 1997, enabling us to quantify the impact of snowmaking on the changes in snow reliability over the entire time period. This study fills several gaps in the scientific literature, but comes with limitations which deserve some discussion.

1. Limitations to the methods employed

The SAFRAN meteorological reanalysis (Vernay et al., 2019) used for this research is affected by changes in observation network density from 1961 to 2018 and changes to the numerical weather prediction models used as a guess for producing the reanalysis. This can potentially impair its ability to be used for trend analysis, as noted in Spandre et al. (2015) and Ménégot et al. (2020). In particular, Vernay et al., (2021, under review) indicate that the magnitude of the wintertime temperature trend is probably underestimated in the SAFRAN dataset, owing to temporal heterogeneities in the input data to SAFRAN and stronger temperature deviations to reference observations at the beginning of the time period. The magnitude of the trend on snow cover (strongly influenced by air temperature trends especially at lower elevation), is therefore potentially underestimated. However, we note that our analysis here is not based on direct trend analysis but rather on how frequently snow conditions, computed at the monthly scale, fall above or below a given threshold, which depends on the meteorological conditions throughout the entire winter seasons. We also note that several key features (snow scarce winter 1963-1963, low snow conditions in the late 1980s and early 1990s, challenging snow conditions in 2001-2002, 2006-2007 and further recent years etc.) are aptly reproduced by the model chain hence providing confidence in its ability to characterize the main features of the meteorological conditions of the winters of the past. While further analysis of the time heterogeneity in the SAFRAN reanalysis remains needed and is currently investigated, we consider that, due to the fact that SAFRAN uses all available observations in a robust assimilation framework, it is a usable data source for this work.

Another limitation of this work, on the snow cover modelling part, is the fact that the Crocus snow cover model not only uses the same snow management configuration for all ski resorts, but also it uses the same one throughout the entire time period. Yet, snowmaking technology and management strategies and tactics have evolved over the past decades (Morrison & Pickering, 2013; Wilson et al., 2018). However, taking into account other sources of uncertainty, and the fact that the time evolution of the snowmaking coverage in ski resorts is itself largely unknown, accounting for changes in snowmaking practices and on the technological characteristics of snowmaking units appears out of reach and may be approached in future studies, requiring that further data is made available (or reconstructed from technical historical sources from ski resorts internal documentation, which does not always exist). We however consider that our study, which accounts for grooming and snowmaking and brings together a large amount of original information into a consistent analysis framework, is a relevant addition to the sparse literature on observed changes in ski resorts operating conditions, and provides relevant and valuable results. Another limitation related to changes in time for some of the characteristics of the systems studied is the fact

that we used a fixed number of ski resorts across time (even if some opened after 1961), with constant ski lifts equipment, corresponding to the end of the time period. This could cause some heterogeneities due to the fact that ski slopes are related, in our work, to the location of ski lifts, and if major changes in ski lifts had occurred since the early 2000s when snowmaking developed the most, inconsistencies would occur. However, we believe that our approach is relevant because the modelling framework makes it possible to simplify this complex problem, to some extent, by setting some of its dimensions to a given value (here: the geometry of ski resorts), and because the main features of ski resorts have in fact little evolved since the early 2000s, so that changes in operating conditions are more influenced by the inception and increase in snowmaking, than by changes in ski resorts spatial organization, e.g. related to the opening of a new subdomain owing to the installation of a new ski lift.

The modelling approach employed to estimate the evolution of the snowmaking coverage rate has also some limitations. In our study, the increase of the snow reliability is only possible through a growth of the part of the ski area covered with snowmaking. However, snowmaking investments considered in our study may correspond to other strategies of ski lift operators. Our model assumes that the entire snowmaking investments always resulted in an increase of the ski slope area covered by snowmaking. Therefore we removed 13 ski resorts without any snowmaking coverage growth despite investments on purpose. This indicates that snowmaking investment choices are more complex than those taken into account in our linear modelling. For instance, our approach does not represent investments made to optimize existing systems – e.g. the replacement of obsolete snowguns - or to increase the density of snow guns on slopes already equipped. Moreover, based on discussions with snowmakers, we know the ski industry has experienced an ongoing harmonisation of the calculation method of the snowmaking coverage rate for many years, including through the development of tools dedicated to the snowmaking management. We can speculate that the more extended snowmaking systems are, the more they require investments for their maintenance. Considering our model, the constant relationship between investments and area equipped let us think that the increase of snowmaking coverage may be overestimated. Our modelling also provides estimations considering the technology as remaining constant. As indicated above on the snow cover modelling side, we did not implement the potential effects of technological progress, particularly for recent snowmaking systems, that could lead to yield increases. Similarly, we did not consider variations of investment costs in snowmaking over time, especially the potential decrease of investment costs to cover ski slopes as snowmaking systems become increasingly popular or the influence of the snowmaking industry consolidation and its consequences on the prices.

Altogether, and despite its limitations, we believe that our study provides original and relevant information on observed changes in ski resorts operating conditions over climate time scales, contributing to filling a critical gap in the literature. We also note that many of these limitations can only be waived by an increasing availability of data relevant to snow management in ski resorts, making it easier, if not even possible, to quantify the impact of climate change on their operating conditions, and, as a result, better understand their sensitivity to changing climate conditions and contributing to climate change adaptation in

this domain (Spandre et al., 2019a, Gerbaux et al., 2020, Berard-Chenu et al., 2020, Morin et al., 2021).

2. Quantification of the impact of climate change on snow reliability, with and without snowmaking

This study provides an original appraisal of the time evolution of snow cover reliability, based on a detailed modelling framework enabling the computation of a resort-level snow reliability indicator, spanning the time period from 1961 to 2018 for multiple ski resorts. Our results indicate that, over the past 60 years in 16 ski resorts in Savoie, the climate conditions have become increasingly challenging for natural snow cover of ski resorts, especially for ski resorts with a significant fraction of their surface area below approx. 2000 m. This is particularly the case in early (November, December) and late (March, April) season, with contrasting patterns depending on the fraction of the ski resort above 2000 m elevation. The results also indicate that not only natural snow cover reliability and its changes, but also the benefits of snowmaking in terms of snow reliability, significantly vary between ski resorts. While at the core of the winter season the snowmaking deployment trajectory has counterbalanced the decrease in natural snow cover reliability for ski resorts with a low elevation domain, and in most cases increased snow cover reliability, in early season and late season snowmaking development has not counterbalanced the snow cover declining trend. In this respect, our results fully corroborate, in the case of the Northern French Alps, the findings highlighted in the IPCC SROCC Summary for Policymakers (IPCC,2019, in press) that while “[i]n nearly all high mountain areas, the depth, extent and duration of snow cover have declined over recent decades, especially at lower elevation (high confidence)” and that “[t]ourism and recreation, including ski [...] tourism [...] have [...] been negatively impacted in many mountain regions (medium confidence)”, and “[i]n some places, artificial snowmaking has reduced negative impacts on ski tourism (medium confidence)”. Past impacts of climate change on natural snow cover reliability in ski resorts depends more on the indicator chosen to quantify the impacts and on resorts characteristics than on their mountain area they belong to. Indeed the added-value of snow management and snowmaking to reduce these impacts is also heterogeneous across ski resorts within a given mountain area. In this sense, while aggregation of results at the scale of an entire mountain range (e.g. Spandre et al., 2019a for the French Alps) makes it possible to provide a compact and general picture of the impact of climate change, past or future, on the supply side of the ski tourism industry and raises awareness at the sectoral scale on climate change impacts and risks, it provides a lumped message, which is not applicable at the scale of individual ski resorts, although this is most often the most relevant governance level for mountain tourism development. Previous studies addressing large geographical domains have generally recognized that studies at the individual scale would be most appropriate to inform deliberation and decision at the local scale, prompting for more detailed study at the scale of individual ski resorts (e.g. Gerbaux et al., 2020; Steiger et al., 2019). The present study reinforces this position, and reinforces the need to exercise extreme caution when attempting to derive general statements, at the local or regional levels, about the evolution of ski resorts operating conditions. Furthermore, our results indicate that the trends in natural or managed snow cover reliability strongly depend on the period of the year (at the monthly

scale), which supports the need to carefully choose relevant indicators depending on the ski resort considered (Abegg et al., 2020) : depending on their business model, size, elevation range and climate settings, key periods for ski tourism can be different depending on the ski resort under consideration, and the search for a single, universally applicable snow reliability indicator applicable to ski resorts of all sizes and settings, is probably elusive.

3. Can the climate change risk reduction factor due to snowmaking implementation be calculated?

Besides our analysis of the trends in natural and managed snow cover reliability in ski resorts in the Northern French Alps, which we show varies across ski resorts due to differences in geographical settings (in particular the elevation distribution) and pace of snowmaking equipment investments over the past decades, our analysis provides some of the information required to assess whether snowmaking has indeed decreased the overall climate risk faced by ski resorts, due to climate variability leading to the occasional occurrence of particularly unfavourable meteorological and snow conditions at the scale of one year. In a context where both the climate and the extent to which snowmaking is implemented have changed, it is virtually impossible to assess the partitioning of the climate change risk to its different factors. Still, *Domaines Skiables de France*, the national organization bringing together French ski resorts, and the National Association of Mayors of Mountain tourism villages (ANMSM) have stated that, thanks to snow management (grooming and snowmaking) and slope preparation, the risk induced by a given level of climate hazard has been divided by a factor three over the past 25 years (DSF & ANMSM, 2015). The modelling approach taken in the present study allowed us to assess how the current level of snowmaking coverage would have behaved against the situation which prevailed, for example, during the notoriously challenging winter seasons in the late 1980s and early 1990s, or even the winter 1963-1964 which is, for our study domain, the most challenging winter season, in terms of snow conditions, of the entire record from 1961 to 2018. Figure 9, Figure 11 and Figure 12 show, for example, absolute values and differences to a no-snowmaking situation, in terms of annual and monthly snow cover reliability, including these challenging winters. Figure 10 and Figure 13 show the relationship between reliability indicators accounting for a fixed, 2018-level snowmaking coverage, and the snow cover reliability values obtained without snowmaking. These figures show that challenging winters without snowmaking remain challenging when accounting for snowmaking at current snowmaking equipment levels, although in many cases the snow conditions are improved, but never, especially in early (November and December) and late (March, April) season, to the extent when snowmaking fully compensates for challenging natural snow conditions. In addition, the evidence provided in this study shows that the snow reliability benefits of snowmaking for challenging winter seasons, i.e. its capacity to compensate for challenging meteorological and natural snow conditions, is strongly heterogeneous across ski resorts due to their differences in geographical settings (in particular their elevation range), but also the key periods during the winter season which are most impactful on their economic results. Providing a single factor for the climate risk reduction due to snowmaking across the entire ski industry in a given region would require that a single indicator can be applied to all ski resorts uniformly, and furthermore that this indicator would be directly related with their

economic performance in order to apply a risk approach meaningfully and compute the risk reduction factor related to a given snowmaking equipment level. While our modelling framework makes it possible to enable further quantifications in the future along these lines, our results suggest that the climate change risk reduction factor for the past period from 1961 to 2018 will undoubtedly be different for each ski resort, so that seeking a single climate change risk reduction factor for the entire ski tourism industry is most probably elusive and would mask out the strong heterogeneity in the climate change impact drivers (hazards), exposure and vulnerability of the individual elements (ski resorts) forming the backbone of the industry as a whole.

4. Past performance is not a guarantee of future results.

The past increases in snow reliability due to snowmaking identified for some ski resorts in our study are consistent with the faith in snowmaking technology emphasized by some ski industry stakeholder risk perceptions studies. Trawöger (2014) mentioned a “technosalvation” belief among Austrian CEOs of cable car companies and in a similar way Bicknell & Mcmanus (2006) showed an “overwhelming cornucopian belief” regarding snowmaking technology among Australian CEOs of ski lift companies. Steiger et al. (2019) stated that this belief is a widely consensus in the ski industry whereby “with constantly improving snowmaking techniques and continued investment, [ski lift operators] are well prepared for climate challenges that lie ahead”. The partial success of snowmaking in counteracting challenging natural snow conditions may skew ski lift operators’ risk perception and lead them to consider past performance to plan future returns of snowmaking in reducing the impacts due to climate change. Yet, future success of snowmaking as an adaptive measure is not a guarantee in increasingly challenging climate conditions and ski lift operators should not assume that snowmaking investments will continue to do well in the future simply because they performed satisfyingly over past decades. This is especially the case considering that the snow production demand will worsen in a warming climate (Hock et al., in press).

6. Conclusions and perspectives

Our contribution introduces several innovative elements in the assessment of past changes in natural and managed snow reliability in the ski industry since it is based on past changes and not indirectly derived from future climate change projections. We also explicitly take into account the changing snowmaking coverage at the resort level. In order to achieve this, we inferred the individual snowmaking dynamic of each ski resort based on their respective snowmaking investments. We then quantified snow reliability changes at the monthly time scale and focused on challenging winter seasons. We showed that the frequency of challenging conditions for ski resort operation over the 1991-2018 period increased in November and February to April compared to the reference period 1961-1990. In general, snowmaking had a positive impact on snow reliability, especially in December to January. If for the highest ski resorts, snowmaking improved snow reliability for the entire winter season, it did not counterbalance the decreasing trend in snow cover reliability for lower elevation ski resorts. Contrasting outcomes of snowmaking highlight the various

degrees of vulnerability across ski resorts due to their geographical settings and their business model which affected their snowmaking deployment trajectory. Such a high heterogeneity in the ski industry advocates for climate change risk assessment carried out, whenever possible, at the scale of individual ski resorts. Despite limitations both on snow cover modelling and the modelling of the snowmaking dynamics, our study is an additional element in providing more precise assessments about past changes in ski resort operating conditions. However, further progress in taking into account operating condition pathways (for a larger number of ski resorts, or with refinements in accounting for changes in technology), including snowmaking equipment, will depend on the increased availability of reliable resort-level information in various ski tourism markets.

Chapitre IV

DEPENDANCE AU SENTIER ET EFFETS DE VERROUILLAGE DANS L'INDUSTRIE DES SPORTS D'HIVER: ETUDE DE CAS DE LA PRODUCTION DE NEIGE DANS LES ALPES FRANÇAISES

La section 1 « Résumé long en français » de ce chapitre IV propose un résumé en français pour le lecteur francophone d'un article soumis en langue anglaise dans la revue *Current Issues in Tourism*. La section 2 (p.94) propose la version originale telle que soumise dans la revue *Current Issues in Tourism*.

Section 1 from Chapter IV offers a French summary for non-English readers while English readers can directly refer to section 2 (p.94). This second section provides the original article as submitted in Current Issues in Tourism

La mise en évidence dans les deux précédents chapitres de demi-régularités, valides sous certaines conditions et pour certains domaines skiables, nous a conduit à mener des investigations plus poussées. Les choix d'investissements dans la production de neige ne sont pas uniquement liés aux conditions d'enneigement et n'entraînent pas systématiquement une hausse des superficies équipées en production de neige, il existe donc d'autres raisons pour expliquer l'investissement dans la production de neige. Afin de comprendre les mécanismes qui déterminent les choix d'investissement et les structures dans lesquelles ces mécanismes prennent forme dans l'industrie des sports d'hiver, nous avons réalisé des travaux intensifs sur un échantillon de grands domaines skiables savoyards.

Ce chapitre présente une démarche de recherche et des résultats issus de travaux intensifs et s'intéresse aux grands domaines skiables pour lesquels aucun lien significatif entre investissements en production de neige et conditions d'enneigement naturel n'avait été identifié (Chapitre II). Ce chapitre met en évidence l'existence d'un processus de dépendance au sentier à l'échelle de toute l'industrie des sports d'hiver française à l'égard de la production de neige. D'une production d'appoint uniquement motivée par les besoins des opérateurs de domaines skiables, cette pratique s'est finalement auto-renforcée avec le temps. Nous montrons comment une dépendance technologique s'est constituée avec le développement d'un capital spécialisé dont l'intérêt est uniquement motivé par la poursuite de l'exploitation du domaine skiable. Ce chapitre met en évidence, sur la base d'un cadre d'analyse théorique puisé dans la géographie économique évolutionniste, l'existence d'un processus de dépendance au sentier. Nous décrivons des processus de renforcement et de verrouillage technologique dans la production de neige en pointant le rôle joué par des agents jusqu'ici ignorés dans l'offre touristique comme les tour-opérateurs ou les promoteurs immobiliers.

Ce chapitre est tiré d'un article en attente d'une nouvelle soumission après demandes de révisions reçues en 08.2021 dans la revue *Current Issues in Tourism*.

Référence de l'article

Berard-Chenu, L., François, H., Morin, S. and George, E. Path dependence and lock-in effects in the ski tourism industry: a case study for snowmaking in the French Alps. *Current Issues in Tourism* (en révision)

I. RÉSUMÉ LONG EN FRANÇAIS

1. Résumé

De nombreuses régions montagneuses d'Europe présentent un degré élevé de spécialisation économique, notamment dans le secteur du tourisme. L'activité des stations de sports d'hiver fait partie de longue date de la réussite économique des Alpes françaises. La production de neige est devenue au fil des ans un élément clé du tourisme des sports d'hiver, mais les impacts du changement climatique diminueront son efficacité en tant que solution d'adaptation. Cependant, l'industrie des sports d'hiver ne semble pas prête à cesser ses investissements dans la production de neige et cette situation pose la question de sa dépendance à cette technologie. Nous utilisons le concept de dépendance au sentier issu du cadre théorique de la géographie économique évolutionniste pour mettre en évidence l'effet d'auto-renforcement du développement de la production de neige dans l'industrie française du ski. Nous avons analysé 38 entretiens semi-directifs, des données financières ainsi que des observations de terrain issus de l'industrie française du ski. Nous montrons que les progrès techniques ont déclenché une rétroaction positive qui a stimulé la diffusion de la production de neige avec un effet rebond. Outre la dépendance des exploitants vis-à-vis de leurs fournisseurs, nous avons également constaté que les investissements et les processus spécifiques à la gestion de la neige ont induit un verrouillage à la fois structurel et cognitif. Enfin, nous soulignons aussi que l'ensemble de l'offre de l'industrie de sports d'hiver contribue à un mécanisme d'auto-renforcement de la production de neige.

2. Introduction

L'attrait irrésistible des domaines skiables pour le développement de la production de neige pose la question de leur dépendance à cette technologie. Nous avons utilisé le concept de dépendance au sentier pour analyser l'utilisation systématique de la production de neige dans l'industrie des sports d'hiver. La dépendance au sentier a reçu une attention croissante pour analyser l'évolution des destinations touristiques (Brouder et al., 2016) et constitue l'un des champs prometteurs des futures recherches dans le tourisme des sports d'hiver (Steiger et al., 2019).

3. Revue de littérature

1. La dépendance au sentier dans les études sur le tourisme

La dépendance au sentier est l'un des piliers théoriques fondamentaux de la géographie économique évolutionniste (GEE). David (1985) a développé la dépendance au sentier en tant que "verrouillage" technologique - soit, la tendance de certains domaines technologiques à s'enfermer dans une trajectoire, même si des technologies alternatives plus efficaces sont disponibles. Arthur (1994) définit la dépendance au sentier en tant que processus de rendements croissants dans lequel des mécanismes d'externalité et d'apprentissage produisent des effets de rétroaction positifs, renforçant le développement

existant. La dépendance au sentier est fréquemment associée aux effets de verrouillage que Grabher (1993) a identifiés au nombre de trois: fonctionnel, cognitif et politique. Martin & Sunley (2006) font valoir que les effets de verrouillage peuvent être tantôt positifs lorsqu'ils renforcent le dynamisme économique local, tantôt négatifs lorsqu'ils augmentent la rigidité et réduisent la capacité d'adaptation d'une région. Populaire en géographie économique où elle a donné lieu à une littérature théorique florissante, la dépendance au sentier a été récemment mobilisée dans les études sur le tourisme. Le domaine du tourisme constitue par ailleurs un champ d'application opportun pour mobiliser la dépendance au sentier. En effet, ce concept permet de renouveler les cadres conceptuels s'intéressant à l'évolution des destinations touristiques.

2. La production de neige et l'industrie des sports d'hiver

Très peu d'études ont analysé les conséquences économiques et organisationnelles de la diffusion de la production de neige dans l'industrie du ski depuis qu'elle est devenue « une partie intégrante de l'activité [des stations de ski] depuis 20 ans » (Steiger et al. 2019, p.23). Certains travaux ont mentionné les progrès techniques réalisés par les fournisseurs de système de production de neige sans pour autant souligner les conséquences associées à ces progrès. Une évaluation des effets de verrouillage liés à la production de neige apparaît pertinente car cette technologie augmente la productivité et l'efficacité mais restructure également les facteurs de production des exploitants de remontées mécaniques (Hjalager, 2015). Par conséquent, la neige de culture n'a pas seulement influencé la fiabilité de l'enneigement mais a également eu des impacts sous-jacents sur l'ensemble de l'industrie des sports d'hiver. Dans cette étude, nous avons évalué comment la diffusion de la production de neige a conduit à l'ensemble de l'industrie des sports d'hiver dans une situation de dépendance au sentier.

4. Méthode et données utilisées

1. Territoire d'étude

Le tourisme hivernal est prédominant en Savoie puisqu'il compte pour plus de 75% des nuitées passées dans la région (Savoie-Mont Blanc, 2020). Les entreprises privées de remontées mécaniques de la Savoie représentent 54% du chiffre d'affaires total réalisé par les entreprises privées de remontées mécaniques dans les Alpes françaises (Bureau van Dijk, 2019). Les plus grands domaines skiables, avec leurs contributions à la prospérité du territoire savoyard, offrent une étude de cas significative des effets que peut avoir l'industrie du ski sur les territoires de montagne. En outre, la Savoie, avec la prédominance de son industrie du ski, présente les caractéristiques d'une économie régionale mono-structurelle avec un degré élevé de spécialisation susceptible de conduire à des verrouillages. Concernant les investissements en production de neige en Savoie, ils représentent 35% des investissements réalisés par territoire étudié possède de grands domaines skiables où la technologie de la production de neige est solidement implantée avec des investissements lourds et récurrents.

2. Méthode de recherche

Nous avons adopté une méthode mixte combinant données quantitatives et qualitatives. Les données comprennent des entretiens semi-structurés avec des acteurs de l'industrie du ski, des données financières, notamment des investissements en production, de neige et des observations réalisées lors de déplacement sur terrain. Nous avons interrogé 38 acteurs de l'industrie du ski d'octobre 2019 à novembre 2020. Pour concevoir l'échantillon de notre étude, nous avons d'abord constitué un échantillon d'exploitants de domaines skiables (n=30) complété par un échantillon d'élus locaux, de promoteurs, tour-opérateurs et fabricants d'enneigeurs (n=8). Chaque entretien abordait trois thématiques principales, conformément à notre guide d'entretien : (i) une description des usages et des techniques de gestion de la production de neige, (ii) une discussion sur le rôle qu'occupe la production de neige dans l'industrie du ski ; (iii) une description de l'évolution au fil du temps de l'utilisation de la production de neige et des causes associées. Les entretiens retranscrits ont été analysés à l'aide du logiciel d'analyse de données qualitatives *Nvivo*, selon un triple encodage : codage ouvert, axial et sélectif (Charmaz, 2006 ; Merriam & Tisdell, 2016)

5. Résultats

1. Caractéristiques de l'échantillon des exploitants de domaines skiables (n=30)

Les profils techniques et d'ingénieurs représentent plus de trois quarts des personnes interrogées. Si les profils de technicien ou d'ingénieur pour exploiter des systèmes d'enneigement (n=8) ou pour l'exploitation des remontées mécaniques (n=6) étaient attendus, de manière plus surprenante, nous observons également une dominance de ces profils techniques parmi les PDG (n=13). Une majorité d'entre eux avait un diplôme d'ingénieur et ceux ayant une formation en gestion et administration étaient très peu nombreux.

2. Le progrès technique comme moteur de la diffusion de la production de neige dans l'industrie du ski

Les progrès techniques de la fin des années 1980 au début des années 2000 ont largement favorisé la diffusion de la technologie de la production de neige. Les systèmes automatisés ont été la condition préalable à l'essor du marché de l'enneigement en Europe, permettant à la fois de profiter des créneaux de froid plus aléatoires que ceux des climats nord-américains et de réduire les coûts de main-d'œuvre. Les progrès techniques réalisés par les fabricants ont simultanément réduit les coûts de production de l'enneigement et stimulé son développement. Les exploitants de remontées mécaniques ont par exemple augmenté leur couverture en production de neige sans devoir changer leurs usines à neige existantes.

3. Effets d'apprentissage et choix d'investissement : la normalisation et définition de processus dans la production de neige

La constitution de connaissances hautement spécialisées et l'augmentation des investissements liés à l'enneigement sont deux évolutions majeures qui reflètent l'ancrage croissant de l'industrie du ski dans une dépendance technologique. Les connaissances spécialisées liées à la production de neige ont impliqué la mise en place de processus de production, d'outils avancés de gestion ainsi que l'apparition de travailleurs spécialisés.

Les exigences d'une approche de plus en plus standardisée dans la gestion de la neige a conduit à la mise en œuvre d'une stratégie pluriannuelle d'enneigement intégrée aux autres investissements, notamment ceux en remontées mécaniques nouvelles. La production de neige a fini par induire son propre régime d'investissement, avec le développement d'équipements spécifiques (usines à neige ou retenues d'altitude) où les équipements les plus anciens nécessitent des investissements de maintenance. L'ensemble de ces investissements contribuent à une augmentation des immobilisations spécifiques associées à la production de neige.

4. Une diffusion de la production de neige au-delà des opérateurs de domaine skiable

Les exploitants de remontées mécaniques mettent en avant la part de leurs pistes de ski couverte par des systèmes de production de neige comme un avantage commercial, notamment dans leurs relations commerciales avec des tour-operators. La production de neige est également développée de façon conjointe avec des projets immobiliers afin d'assurer des hébergements « skis aux pieds » des grandes stations de ski

6. Discussion et conclusion

L'amélioration des performances des technologies de production de neige ont produit un retour positif chez les exploitants. Elle a aussi favorisé l'extension des réseaux d'enneigement. Ces résultats confirment la situation dite du « paradoxe de Jevons » avec un effet de rebond : la baisse de la quantité d'énergie nécessaire pour la production de neige a réduit son coût de production. En retour, cette réduction des coûts a eu pour effet de stimuler la croissance de l'usage de la production de neige.

Nous suggérons que les effets des progrès technologiques dont ont bénéficié les opérateurs par le passé est à même de façonner un verrouillage cognitif. Ce verrouillage explique le sentiment de « techno-optimisme » qui prévaut dans la profession. Par ailleurs, la forte prévalence de profils de techniciens et d'ingénieurs peut également expliquer la forte conviction que le développement de la production de neige était un équipement essentiel.

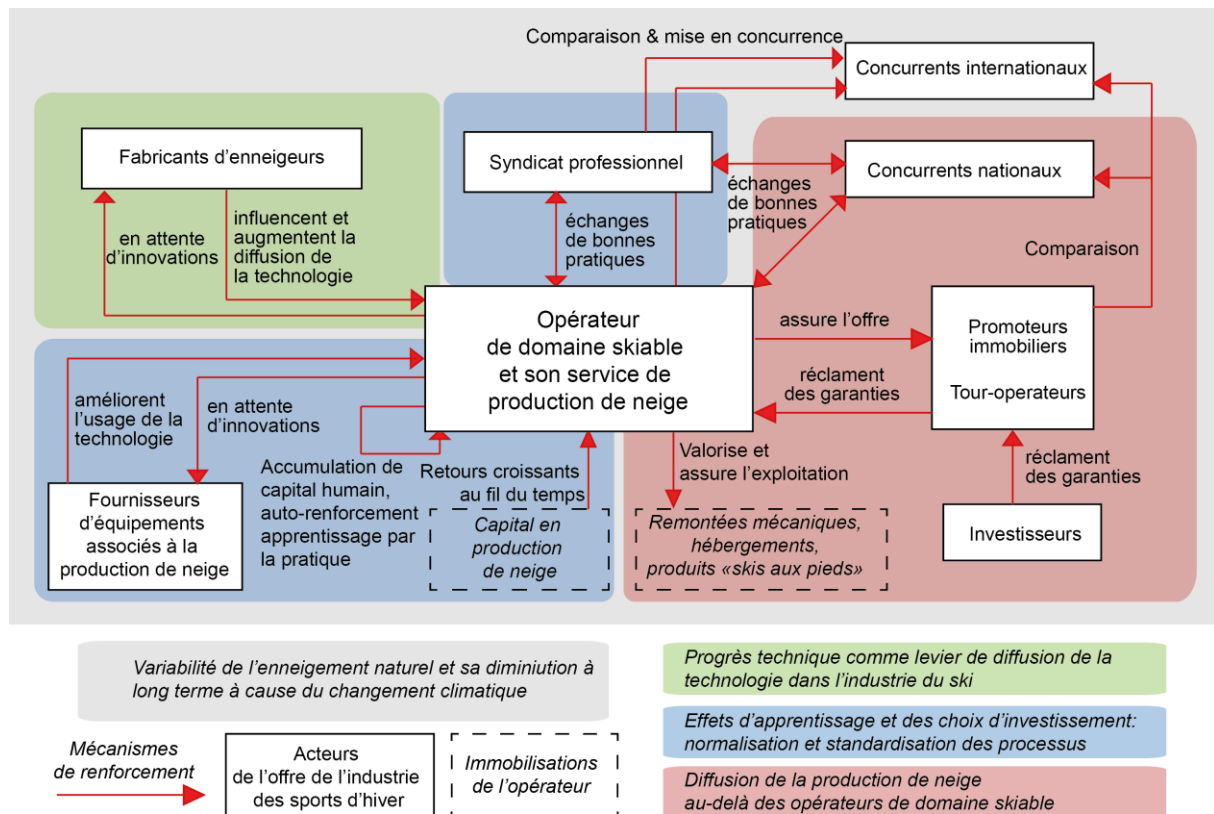


Figure 17. Schéma des effets de dépendance au sentier et de verrouillage liés à la production de neige sur l'offre de l'industrie des sports d'hiver

Nous avons aussi montré que le mécanisme d'auto-renforcement du développement de la production de neige reposait sur plusieurs acteurs de l'offre touristique de l'industrie du ski. La Figure 17 résume les différents effets de dépendance au sentier et de verrouillage liés à la production de neige sur l'offre de l'industrie des sports d'hiver. Cependant, les acteurs institutionnels et le rôle qu'ils peuvent jouer dans le développement de la production de neige n'a pas été abordé

II. PATH DEPENDENCE AND LOCK-IN EFFECTS IN THE SKI TOURISM INDUSTRY: A CASE STUDY FOR SNOWMAKING IN THE FRENCH ALPS

Lucas Berard-Chenu^{1,2}, Hugues François¹, Emmanuelle George¹, Samuel Morin²

¹ Univ. Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM, 38000 Grenoble, France

² Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige, 38000 Grenoble, France

1. Abstract

Many mountainous regions in Europe show a high degree of economic specialisation, including the tourism sector. The ski tourism industry is a part of the long-standing economic success of the French Alps. Snowmaking became over the years a key feature in ski tourism but future impacts of climate change will decrease its effectiveness as an adaptive solution. However, the ski industry does not seem ready to stop its investment in snowmaking and raise the question of its dependence on that technology. In this study we employ the concept of path dependence derived from the theoretical evolutionary economic geography framework to highlight the self-reinforcing effect of snowmaking development in the French ski industry. We analysed 38 in-depth semi-directive interviews, financial figures and field observation from the French alpine ski tourism industry. We show that technical progress launched a positive feedback that spurred the dissemination of snowmaking with a rebound effect. Aside from the dependence of ski lift operators on their suppliers, we also found that the specific investments and processes in snowmaking management have induced both a structural and a cognitive lock-in. Finally we also stressed that the entire supply side of the ski industry contributes to the self-reinforcement mechanism for snowmaking.

Keywords: path dependence, ski tourism industry, snowmaking, lock-ins, technical progress

2. Introduction

Snowmaking is a key technical component of the operation of modern downhill ski resorts, which is increasingly studied. Ski tourism, as a snow-dependent economic sector, is vulnerable to climate variability. Through snowmaking, ski lift operators have reduced their reliance on the natural snow cover (Falk & Lin, 2018). Snowmaking is also the most popular technical adaptation to reduce the decreasing trend of natural snow cover due to climate change (Abegg et al., 2007). Despite several studies expressing cautionary statements on the ability of snowmaking to reduce future climate change impacts and risks (Hock et al., 2019) but also to increase skier visits because of diminishing returns to scale (Falk & Vanat, 2016), ski lift operators have so far not stopped investing in snowmaking (Abegg et al., 2017; Trawöger, 2014). Ski resorts operated with partial knowledge when they chose snowmaking as a technical adaptation. Today, the irresistible attraction to invest in snowmaking, to the point that the ski industry could be in the medium-term in a sub-optimal situation with

economic shortcomings, raises the question of the dependence on snowmaking in the ski industry. To address this question we employed the concept of path dependence to analyse the systematic use of snowmaking in the ski industry. The notion of path dependence has received a growing attention to analyse the evolution of tourism destinations (Brouder, Clavé, Gill, Ioannides, et al., 2016) and is one of the promising important fields of future research in ski tourism (Steiger et al., 2019). To the best of our knowledge, no studies have so far analysed the role of snowmaking technology in reinforcing the path-dependent trajectory of the ski industry. The aim of the study is to highlight how the dissemination of snowmaking in the ski tourism industry has induced lock-in effects through the path dependence concept derived from an evolutionary economic geography (EEG) framework. This study is an opportunity to show poorly known mechanisms and self-reinforcement dynamics due to snowmaking. In order to reach its goals, our study is based on a mixed method crossing analysis of in-depth semi-directive interviews of ski tourism stakeholders, financial figures from ski lift companies and field observation.

The paper is structured as follows. Section 3 provides an overview of the existing literature of snowmaking technology and path dependence in tourism studies. It shows the opportunity to use path dependence to analyse the dissemination of snowmaking in ski tourism. Section 4 introduces the study area, offers an overview of the data collected and presents the methodology. Section 5 provides results drawn from the analysis of interviews and financial figures. Section 6 discusses the results and provides concluding remarks.

3. Conceptual background

1. Path dependence in tourism studies

Path dependence is one of the three core theoretical elements of Evolutionary Economic Geography (EEG), along with generalized Darwinism and the theory of complex adaptive systems (Boschma & Frenken, 2006). In this study, we focus our attention on path dependence which is generally applied to systems whose outcomes evolve as a consequence of their own history (Martin and Sunley, 2006). Path dependence originally came from pioneer studies from Arthur (1988, 1989) and David (1985) before becoming an established area of research, including in economic geography. David (1985) developed path dependence as technological 'lock-in' – e.g. the tendency for particular technological fields, to become locked onto a trajectory, even though alternative (and possibly more efficient) technologies are available - while Arthur (1994) emphasis path dependence as dynamic increasing returns: a process where various externalities and learning mechanisms operate to produce positive feedback effects, thereby reinforcing existing development paths. Path dependence is frequently associated with lock-in effects. Lock-in is defined as 'a property of dynamic systems that arises when sequential patterns of activity form a "groove" from which it subsequently becomes difficult for a system to deviate.' (Setterfield, 1997, p. 36-37). He identified two drivers of lock-in in behaviour of the economic players: past events and behaviour of other agents. Grabher (1993) identified three different types of lock-in: 'functional' (close and stable linkages between core firms and the supplier sector), 'cognitive' (consisting of common practices and accepted norms) and 'political' (a thick and dense

institutional structure that hampers restructuring) while Martin & Sunley (2006) argued that lock-ins should not always be seen in a negative sense. They offered a more nuanced view where lock-in effects may sometimes be positive when they reinforce local economic dynamism with positive externalities and also negative when they increase the rigidity and undermine the adaptability of a region. Path dependence approaches analysing lock-ins have focused primarily on manufacturing, transportation (Arthur, 1994; David, 1985; Liebowitz & Margolis, 1995), and energy (Cowan, 1990) before having some success in many field research such as agricultural studies (Magrini et al., 2016; Vanloqueren & Baret, 2009) or policy processes (Foxon & Pearson, 2008). Path dependence has also been increasingly popular since past years in economic geography where it has led to a flourishing theoretical literature (Boschma & Frenken, 2006; Boschma & Martin, 2007; R. Martin & Sunley, 2006, 2015; Simmie & Martin, 2010) applied in various case studies, such as the emergence of new industries (Njøs et al., 2020; Zhu et al., 2017), the diffusion of innovation (Boschma, 2005; Boschma et al., 2015) or the decline in old industrial areas (Boschma & Lambooy, 1999; Hassink, 2010).

Tourism studies are a fruitful scope to the evolutionary economic geography approach (Williams, 2014) and to path dependence (Brouder et al., 2016). Since the tourism area life cycle (TALC) drawn up by Butler (1980) was the most popular framework in tourism geography, the EEG approach emerged as a promising framework to analyse the evolution of tourism destinations. Path dependence can be used to deal with criticisms and limitations of the TALC model (Ma & Hassink, 2013). Then over the past decade the popularity of path dependence and EEG have spilled over into tourism geographies (e.g. Brouder & Eriksson, 2013; Papatheodorou, 2004; Sanz-Ibáñez & Clavé, 2014). For instance, Halkier et al. (2019) assessed the tourism development in Western Siberia and concluded that tourism path development is highly dependent on state intervention and success in other sectors. Despite the vitality of the EEG framework and path dependence in tourism studies, very few studies have employed these concepts with the ski industry. Gill & Williams (2014, 2016) used an EEG approach to highlight catalysts and inhibitors of change to Whistler's ski resort governance. Authors highlighted why governance systems did not change at Whistler even if it did not represent the optimal situation. Path-dependent forces constrained Whistler's stakeholders from making changes because of the benefits embedded in the increasing returns that result from lock-ins. Müller (2019) analyzed how an entertainment company purchased alpine facilities in the Tärna district in Sweden, sought to increase returns on investments from alpine lift infrastructure to finally stay locked-in in alpine ski tourism, clashing with local stakeholders and tourism market conditions. Whether it be the study on Whistler or that of the Tärna district, the authors only mobilized path dependence in single ski resort-case studies. François (2007) referred to the notions of endogenous development and human capital accumulation (Lucas, 1988) to show how middle-altitude ski resorts could rely on local knowledge and local resources to reduce their dependence on ski tourism. So far, path dependence contributions in ski tourism have been mainly focused on destination marketing organization issues, likewise for the vast majority of tourism studies. Although Abegg et al. (2017) mentioned the risk of an increasing dependency on a specific development path – i.e. ski tourism economy – they did not use path dependence to assess the implications of snowmaking investments in orienting the ski industry trajectory.

2. Snowmaking and ski tourism industry

Very few studies have analysed the economic and organisational consequences of the spread of snowmaking in the ski industry since it became ‘an integral part of the [ski resort] business for 20 years’ (Steiger et al. 2019, p.23). Apart from a widely held opinion that snowmaking use soared in the alpine region after a number of snow-scarce seasons at the end of the 1980s and the beginning of the 1990s (Gonseth, 2008), little is known about drivers of snowmaking evolution in the European ski industry. Climate change issues have partly overshadowed the different roles of snowmaking in the operation of ski resorts. Steiger and Mayer (2008) and Paccard (2010) identified different conditions that raised snowmaking use: climate change, variability of snow precipitation (especially in early winter to ensure the resort opening date), competitive economic pressure and to meet ski tourism demand. Among these factors, the potential of snowmaking to reduce the impacts of snow cover interannual variability and longer term decline due to climate change have given rise to a significant body of academic literature, but in the meantime other motivations especially the evolutions in the ski industry have been remarkably neglected. Based on qualitative interviews with ski area operators, Mayer et al. (2007) described the different snowmaking strategies according to ski areas specificities (e.g. complete snowmaking coverage, snowmaking of low-altitude slopes, in high altitudes or on glaciers etc.). Since this pioneer study from 2007, the role of snowmaking technology in the ski industry has received little attention. More recently Spandre et al. (2016a) stated that vulnerability to snow conditions was a driver among others for the development of snowmaking facilities. Based on a survey of 55 French ski resorts, the authors highlighted that regardless of the ski resort size, snowmaking management mainly relied on three factors: to satisfy the skiers expectations, to provide technical solutions to enable uninterrupted ski lift operations and to promote the resort. While Spandre et al. (2016a) deeply analysed the 2 first factors, they only assumed that promotional aims such as communicating about ‘snow guarantee’ as a sales pitch might influence the development of snowmaking. In addition, few studies adopted an evolutionary perspective on snowmaking technology in ski tourism. Some authors mentioned technical advances from snowmaking suppliers (Bicknell & Mcmanus, 2006; Campos Rodrigues et al., 2018; Morrison & Pickering, 2013; Wilson et al., 2018) but without emphasizing the associated consequences such as the potential self-reinforcement of snowmaking use in the ski industry. An assessment of lock-in effects led by snowmaking is accurate, especially as it is one of the 100 most important innovations in the tourism sector (Hjalager, 2015) as it increases productivity and efficacy but also restructures the input factors of ski lift operators. As a result, snowmaking did not only influence the snow reliability but also had underlying impacts on ski resorts. Mayer (2009) pointed out that the tourism-demand took for granted snow reliability and snowmaking has become a constitutive basic factor and played a more significant role than the innovativeness of the cable car-system in the success of ski tourism. Mayer’s findings might suggest that snowmaking as a guarantee has a positive lock-in effect on the ski industry. Beyond technological improvement, snowmaking may also lock mountainous regions in development paths that will lose dynamism under climate change impacts. Thus snowmaking can be considered as a negative lock-in, financial resources invested might lead to maladaptive outcomes or ‘maladaptation’ (Schipper, 2020) and finally reduce the ability of stakeholders to break-out of path dependence.

In this study, we assessed how the spread of snowmaking technology in the ski tourism industry has led to path dependence. We focus on large ski resorts from the Savoie *département* in the French Alps, fully integrated in the competitive European ski industry. This approach is based on a mixed method combining quantitative and qualitative data. Our study goes beyond the traditional ski lift operators group to provide a comprehensive view of mechanisms leading to path dependence. Based on 38 semi-structured interviews and financial figures we stressed different lock-in effects in the supply-side of the ski tourism industry.

4. Material and method

1. Study area

The study area is situated in the eastern part of France. The Savoie *département* (Savoie hereafter) holds a dominant position in snow-based winter tourism. In 2019, the region had a total of 17 million skier days, which accounted for 40% of all skier days estimated in France. Winter tourism prevails in Savoie as it brings more than 75% of nights spent in the region (Savoie-Mont-Blanc Tourisme, 2020). The Figure 18 shows the mean elevation and the ski-lift power of Savoie's ski resorts and highlights that Savoie has a large cable-car portfolio.

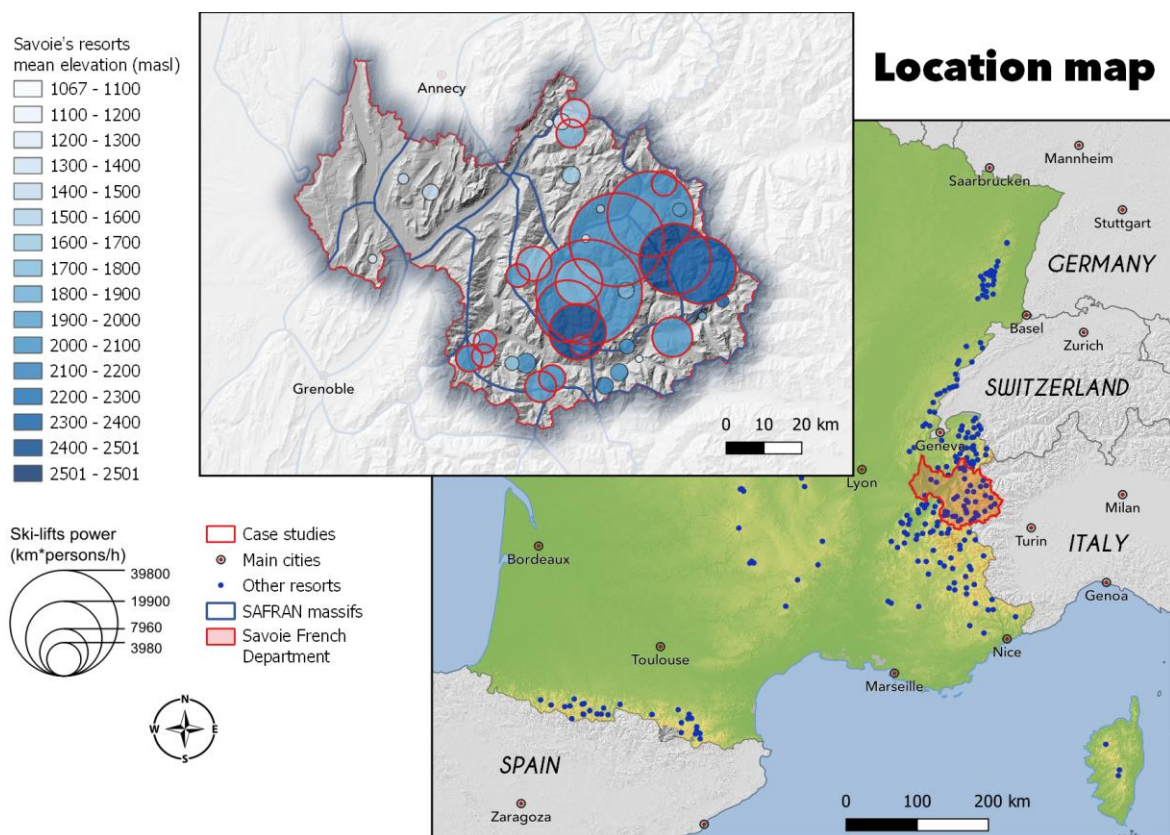


Figure 18. Sketch maps of the study area

According to the 'BD Stations' database (George-Marcelpoil et al., 2012), almost one third of the large and very large ski resorts in France (n=64) are located in Savoie (n=20). Larger ski resorts from Savoie concentrate one third of the total ski lift power of the French ski tourism offer. The Figure 19 presents the affiliation and the investments in snowmaking since 2000 of Savoie's ski resorts and shows that major French ski lift operators are strongly established in Savoie.

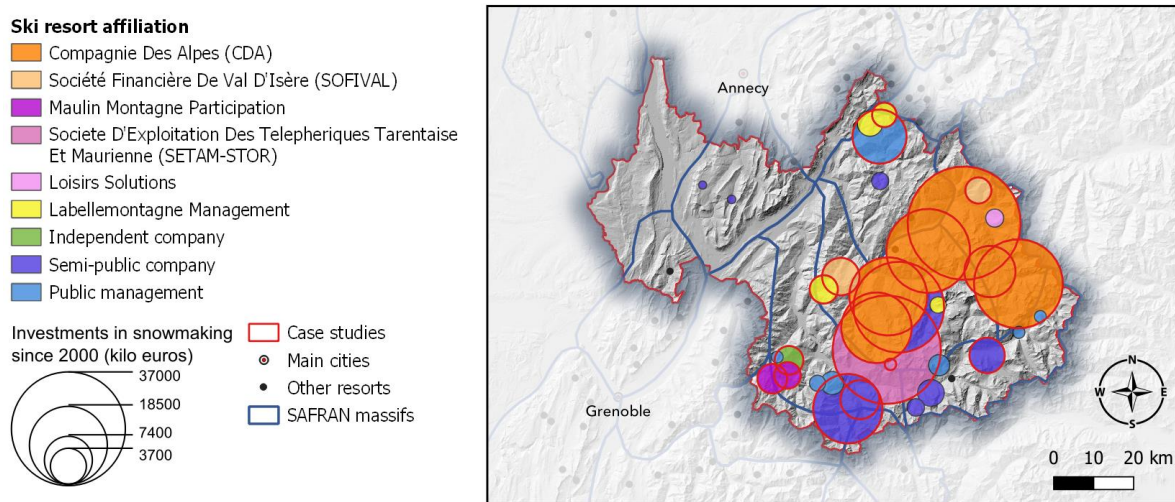


Figure 19. The affiliation and investments in snowmaking since 2000 of Savoie's ski resorts.

Private companies manage more than half of large and very large ski resorts from Savoie. The Compagnie des Alpes - a large group listed on the stock exchange and one of the largest ski lift operators in the world (Falk, 2009) - manages 6 ski resorts in Savoie. From an economic point of view, Savoie concentrates the major part of the ski tourism business in the French Alps. The average turnover of private ski lift companies in the 2004-2019 period was around 19 million EUR. In 2019, we estimated that the turnover of private ski lift companies from Savoie represented 54% of the total turnover of private ski lift companies in the French Alps (Bureau van Dijk, 2019). Largest ski resorts from Savoie with their contribution to the prosperity of mountainous regions offer a significant case study of the ski industry. Moreover, Savoie with the predominance of its ski industry has the characteristics of a mono-structural regional economy with a high degree of specialisation likely prone to lock-ins (Grabher, 1993; Martin and Sunley, 2006; Hassink, 2010).

The first snowmaking system in the French Alps was set at Flaine (Haute-Savoie) in 1973 when the ski industry was still marked by the development of ski resorts. At that time, ski lift operation was much less profitable than real estate development (Knafou, 1978). At the end of the 80's, snowmaking facilities were a sophisticated investment that only a handful of ski resorts could provide and many of them were from Savoy such as Courchevel, Val d'Isère or Val Thorens (Knafou, 1987). In the 90's at the French Alps-level, snowmaking was still considered 'with extreme caution' as 'the last option' (Vlès, 1996, p.62) but at the end of the 1990s, the proportion of ski slopes equipped strongly increased and still experienced a dynamic growth in recent years (Spandre et al., 2015). Generally, two technologies of

snowmaking exist: air–water guns (also called 'lances') and fan guns (Olefs et al., 2010). Both technologies are based on the same principle: pressurized water is pumped through the nozzles of a snow gun and dispersed to the surrounding atmosphere as a spray of tiny water droplets (Hanzer et al., 2014). In French ski resorts, lances predominate (Spandre et al., 2017). Regarding financial figures, snowmaking has been the second investment item for ski resorts in the French Alps from 1997 to 2018 (Berard-Chenu et al., 2020). In addition, snowmaking investments in ski resorts from Savoie represented 35% of the snowmaking investments made in all French ski resorts over the 1997-2018 period. Thus, our study area has large ski resorts where snowmaking technology is firmly established with recurring and heavy investments.

2. Study design and research methods

We adopted a mixed method approach combining quantitative and qualitative data in this study. The data collection includes (i) documented information provided on websites of ski resort company (ii) semi-structured interviews with ski industry stakeholders, (iii) supplementary material transmitted in connection with the interviews (i.e. technical document, maps, marketing brochures, data table), (iv) financial figures including investments dataset provided by *Montagne Leaders* (Berard-Chenu et al., 2020) and (v) direct observations made during visits on site.

We interviewed 38 stakeholders of the ski tourism industry from October 2019 to November 2020. To design the sample of our study, we first targeted a core sample (CS) to interview: ski lift managers (i.e. CEOs, chief operating officers, snowmaking managers; n=30). We secondly broadened the scope of stakeholders interviewed using the 'snowball sampling' (Corbin & Strauss, 2008; Merriam & Tisdell, 2016) – i.e. we met stakeholders mentioned by interviewees from the core sample: local politicians and mayors, ski resort development managers, marketing directors of snowmaking companies etc. This second group of 8 interviewees was our extended sample (ES). Table 11 presents an overview of interviewees from our 2 samples (core and extended samples) distributed according to 4 groups while Table 17 in Appendix presents a more detailed list of the interviewees' attributes.

Table 11. Overview of interviewees from our 2 samples

Category	Nb of interviewees	Sample
Ski lift sector	30	core-sample
Local authority	3	extended sample
Resort development	2	extended sample
Snowmaking companies	3	extended sample

In our extended sample, we met 3 representatives of local authorities who were members of the National Association of Mayors of Mountain tourism villages (ANMSM). The ANMSM is an advocacy group consisting of mayors defending the interest of ski resorts. This association stood up several times to defend the use of snowmaking in the French ski industry. Pre-test interviews were conducted to identify problematic, overly complex or incomprehensible questions. After pre-test interviews, we confirmed a semi-structured interview with a mix of more and less structured interview questions rather than survey-based technique. We mainly collected our data through face-to-face interviews. Around 20% of interviews were online or phone interviews due to the sanitary constraint of the COVID crisis. Each interview, followed the same pattern, accordingly with the interview guide: (i) a description of snowmaking uses and the snowmaking management by the interviewee; (ii) a discussion about the role played by snowmaking in the ski industry (iii) a depiction of the evolution over time of snowmaking uses and their related causes [See Table 18 in Appendix]. To foster the discussion, we provided an overview of the snowmaking investments of the ski resort over the twenty past years for each interviewee from our core sample and invited them to comment on it. Although the interview guide followed the same pattern for each interview, questions asked were adapted between our core and extended sample. Interviews were recorded and transcribed. Audio tracks and written transcriptions were analyzed using Nvivo, a qualitative data analysis software (Bazeley, 2013; Woolf & Silver, 2017). We applied three types of coding - open, axial and selective coding - in the data analysis process. Open coding was used initially to tag any word that might be relevant to the study (Merriam & Tisdell, 2016). Axial coding then was employed to relate similar or related concepts into categories and to explore relationships between subcategories (Corbin & Strauss, 2008; Merriam & Tisdell, 2016). Finally, selective coding was applied as a final step to integrate and refine categories to our theoretical framework (Charmaz, 2006; Merriam & Tisdell, 2016). Direct observations consisted in visiting ski slopes areas, snowmaking facilities and potential network extensions. We made these field observations with or without support from ski resort operators. Pictures collected from direct observations were used to corroborate findings from other data sources, especially interviews.

5. Results

1. Sample characteristics

Figure 20 shows a synthesis of the position held and the type of studies for the 30 interviewees from the core sample.

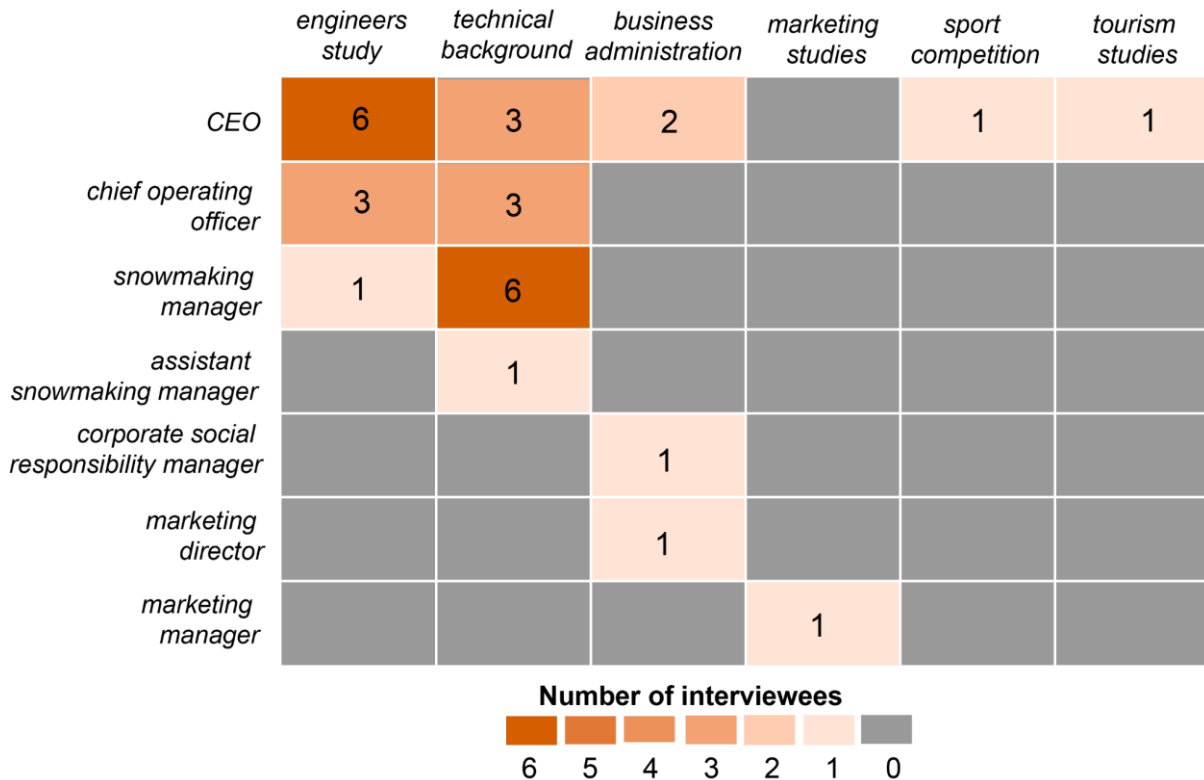


Figure 20. Background and position held by interviewees from the core sample (n=30). Each row corresponds to a position in the ski lift company and each column corresponds to an educational background mentioned by interviewees. The values and colours in the matrix correspond to the number of interviewees [Author's elaboration]

Slightly less than half of the respondents were a CEO of a ski lift company. The number of CEOs of ski lifts companies interviewed (n=13) is similar to a previous study on perceptions of climate change in the Tyrolean ski industry (Trawöger, 2014). Members of snowmaking departments represent the second largest group of interviewees met (n=8). Chief operating officers group represents the third larger group (n=6), we mostly met them when their CEOs were not available for an interview. Technical and engineer profiles represented more than three-quarters of interviewees. Considering job profiles expected to operate snowmaking systems or to oversee ski lifts operations, interviewees with technician or engineer background were expected. More surprisingly we also observe a dominance of technical profiles among CEOs: a majority of them had engineering degrees and those with a business administration background were very few (n=2). This figure shows the dominant fraction of technical profiles up to decision-making positions in ski resorts.

2. Technical progress as a lever on snowmaking technology dissemination in the ski industry

From a historical perspective, interviewees mentioned that two events started the spread of snowmaking in the French Alps: the bid for the Winter Olympic Games in 1992 at Albertville in the Tarentaise valley in Savoie and snow-scarce seasons at the end of the 1980s and the beginning of the 1990s. Despite these two ‘external shocks’ (Brouder & Eriksson, 2013) for the ski industry, snowmaking remained mainly limited to some host ski resorts. Routines as inherited procedures or decision rules (Pentland & Rueter, 1994) were significant sources of inertia and resistance to adopt snowmaking technology. Interviewees mentioned the barriers that early-adopters encountered regarding snowmaking technology: ‘When we said we would set up some snowmaking systems, people answered: “for what purposes?”’ (#11). ‘Snowmaking? No...It is not for us!’ reported interviewee #36 who thought that snowmaking was only useful for middle and low-altitude ski resorts. Ski lift operators from the French Alps during the 80s and the 90s were quite sceptical about snowmaking and had initially a complacent attitude regarding their natural snow reliability.

Technical progress from the end of the 80s to the beginning of the 2000s had greatly favoured the spread of snowmaking technology. Although it was not a ‘shock’ with a beginning and an end well-defined, it nevertheless initiated a substantial change. According to interviewee #37 from the snowmaking sector, automated systems - a technical progress that emerged at the end of the 80s - were the prerequisite for the rise of the snowmaking market in Western Europe. Automated systems offered both advantages that eased snowmaking use on the European market. Automated systems were attractive to take advantage of shorter weather windows. While snowmaking was initially developed in North America under a continental climate influence, snowmakers in Western Europe had to contend with a more tempered climate. Another reason mentioned by interviewees was that automated systems also decreased costs on labour. The economic reason was significant for ski lift operators since having a batch of snowmakers, mainly working at night was not a reliable option because of labour legislation and labour cost:

‘Having employees on snowmobiles, at night, checking on the field that everything was fine? As soon as we could avoid that situation, we did it, especially because of the safety at work rules.’ noted interviewee #28.

Respondents’ statements saying the hourly labour cost in France was higher than their competitors, including at the Western Europe-level, are consistent with our estimations. Based on a compilation of labour statistics over the 2000-2018 periods (Bureau of Labor Statistics, 2020; Eurostat, 2008, 2020), we figured that the average of the American hourly labour costs was 39% lower than in France. Regarding the European level, the Austrian labour cost was 11% lower, 29% lower for Italy, than in France. The labour cost was an element that fostered the development of automated systems and air-water guns (or lances) in France especially because it was cheaper to operate than fan guns, as reported in most of the interviews.

In addition to automated systems, technical progress led to yield increase that made snowmaking more efficient. Interviewees were unanimous about the technical progress

made by snowmaking suppliers in the last 20 years. This result is consistent with the analyses of ski-tourism representative's statements regarding snowmaking technology (Bicknell & Mcmanus, 2006; Morrison & Pickering, 2013), showing the widely held view that snowmaking technology has known many improvements making it more efficient. The snowmaking market in France experienced an historical turning point at the end of the 90s and the beginning of the 2000s. Snow guns providers upgraded the air-water mixture of lances and reduced the amount of compressed air needed. This higher efficiency in the snow production had a singular effect on the snowmaking development. Given that new snow lances had lower compressed air consumption, ski lift operators decided to increase their snowmaking coverage rather than reducing the number of air compressors they already operated: 'We optimized so much that we had 5 air compressors at that time and we stayed with 5 despite the extensions of the snowmaking network' said respondent #6.

'From 1989 to now, the efficiency of snow guns has been multiplied by 15 or 16. That means that with the energy required for one snow gun in 1989, now we can run 15: we made a revolutionary step to increase the production' mentioned respondent #3.

While air compressed capacity used to be the limiting resource, technological innovation overcame this barrier by improving yields. It simultaneously reduced the cost of production and spurred the development of snowmaking facilities. Water supply became an issue equally critical, if not more, than the cost of production for ski lift operators.

'Compressed air used to be limiting. [Snowmaking] required a large amount of energy and was extremely expensive and then as the technology progressed, snow guns consumed less compressed air and inevitably the water flow started to be limiting' explained respondent #27.

The increasing efficiency and cost reduction of snowmaking played a key role in the rising popularity of snowmaking in the ski industry.

3. Learning effects and investment choices: the normalization and process definition of snowmaking

Snowmaking systems have deeply modified the ski areas management whether at the seasonal or the multi-year term. The establishment of highly-specialised knowledge and the increasing snowmaking-related investments were the two major evolutions that reflected the growing imbedding of the ski industry in a technological path dependence.

The specialised knowledge related to snowmaking involved the setting up of processes, more advanced tools and qualified workers. Ski lift operators have increasingly formalized the management of snowmaking systems and developed structured working routines. Many snowmakers interviewed mentioned 3 monitoring indicators to manage snowmaking: (1) the prioritisation of snow production regarding sectors of the ski area, (2) the instantaneous production capacity as a critical factor and (3) the management of the water availability. The implementation of indicators has gone hand in hand with the tremendous use of measuring devices related to snowmaking management: water and

power consumption measurements, snow depth measurements, high-resolution mapping of ski slopes, meteorological and climate prediction and snow management system (e.g. the H2020 project PROSNOW, see Köberl et al., 2021). The mix of decision aid tools dedicated to snowmaking management has improved the efficiency of snowmaking and at the same time promoted its use. Considering snowmaking management moved from an only experience-based toward a more process approach, snowmaking expertise has emerged as a highly specific function in ski lift management. Current snowmakers are made up of skilled technicians while their elders, considered as the ‘first generation’ of snowmakers, learned by doing their jobs. The French National Association of Ski Resorts created in 2018 a snowmaker’s certificate of competence (DSF, 2018) that is a further sign of the process of professionalization of the snowmaker’s work.

Common standards in snowmaking management, regardless of the ski resort, drive the development of the snowmaking network and future investments. As an example, many interviewees mentioned the same snowmaking production time: between 80 to 100 hours for the base-layer snowmaking period prior to the opening of the ski season. Few of them succeed in lowering their production time to that threshold such as a snowmaker explained: ‘If we had more snow guns along ski slopes we may succeed in producing in 90 hours’ (#25). Accordingly, many interviewees also indicated they have invested to increase their instantaneous production capacities, which is one of the three indicators of snowmaking management. The requirements of a standard process approach in the snowmaking management led to the implementation of a multiannual snowmaking strategy. Several interviewees mentioned that snowmaking facilities were planned in multi-year investment plans and were deeply intertwined with other ski lift investments. Respondents mentioned investments in new ski lifts were often planned with investments in snowmaking and ski slopes reshaping: ‘Nowadays, it is quite inconceivable to plan a new ski lift without being able to guarantee the skiing experience attached with that ski lift’ mentioned interviewee #38. ‘We do not only work on ski lifts anymore, we think in terms of ski-area sectors: the ski lift is only the means of transport, we also work on ski slopes and snowmaking.’ claimed respondent #13. Figure 21 provides the evolution of snowmaking-related investments for the 20 larger ski resorts from Savoie that we investigated over the 1997-2018 period. Figure 21 shows a set of investments linked to snowmaking increased over time.

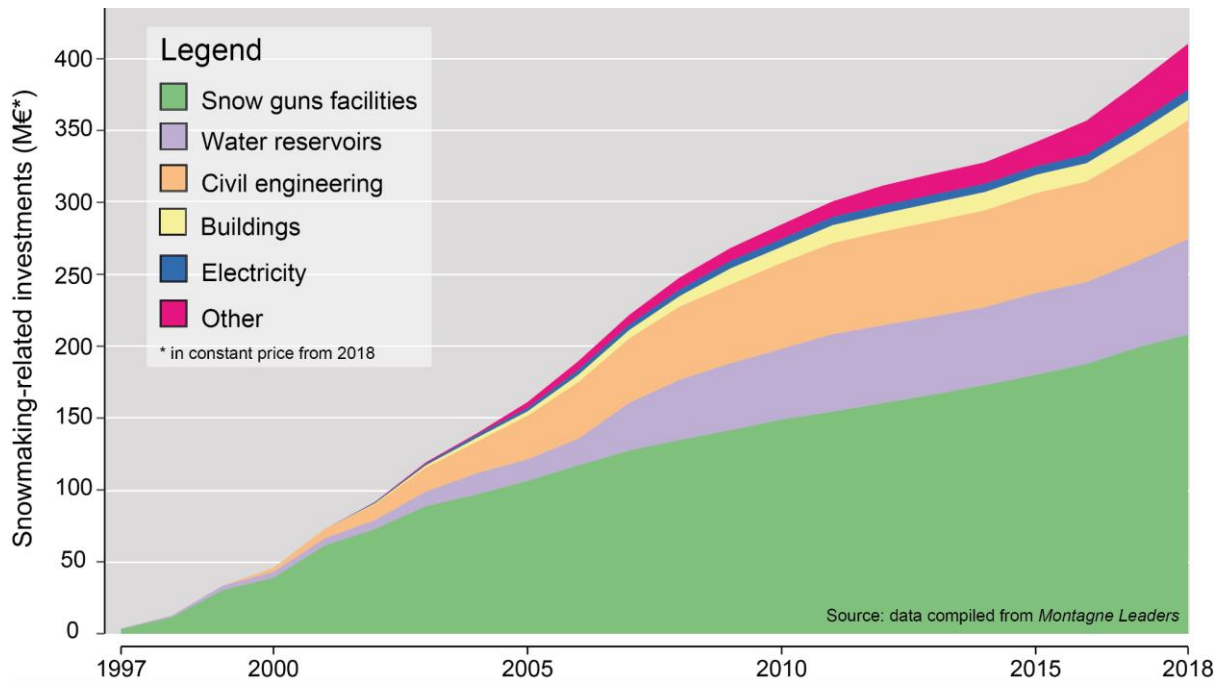


Figure 21. Evolution of snowmaking-related investments for the 20 largest ski resorts in Savoie for the time period 1997-2018.[Author's elaboration]

Since at the beginning of the 2000s, snow gun facilities represented 80% of the investments made by the ski resorts understudied; fifteen years later these investments only accounted for half of all the investments made. Civil engineering to build more powerful engine rooms and water reservoirs to ensure the water supply management absorbed 40% of the total amount of investment. Snowmaking has induced its own investment regime (e.g. civil engineering or water reservoir facilities) where the oldest equipment also requires maintenance investments. These investments increase the snowmaking assets of ski resorts.

4. The dissemination of the snowmaking technology in the ski industry beyond ski lift operators

Many respondents described snowmaking as insurance for the operation of ski lifts. This statement is consistent with previous studies (Steiger and Mayer, 2008; Paccard, 2010; Trawoger, 2014) pointing out the 'snow guarantee' offered by snowmaking. More interestingly we highlighted that snowmaking development was not only driven by ski lift operation purposes. Ski lift operators promoted the part of their ski slopes covered with snowmaking as a marketing advantage in a business-to-business situation where ski resorts sold ski lift tickets to retailers or tour-operators. Snowmaking became an issue in negotiation in the ski tourism industry: 'Tour-operators are sensitive to the snowmaking coverage rate' mentioned respondent #24.

'Snowmaking as a commercial advantage has also been promoted by tour operators too. Since they were present in many different ski resorts at the same time, they were able to compare what ski resort operators could offer' explained respondent #27.

Ski resorts seek to attract tour operators as the latter ensure the purchase of a batch of ski lift tickets several months before the opening of the ski season. Since tour operators ensure, in advance, the skier traffic in ski resorts, snowmaking is a guarantee for both ski lift operators and tour-operators.

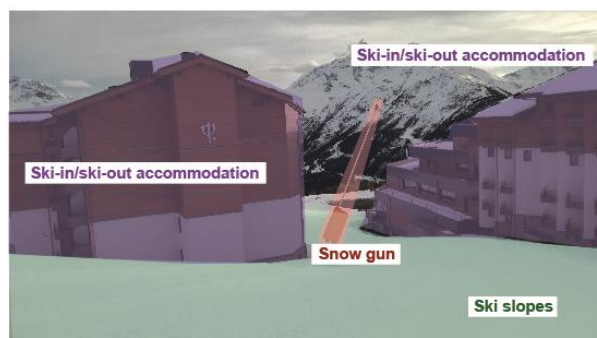
Snowmaking is also well integrated in the real estate development of large ski resorts. Many interviewees, from both core and extended samples, mentioned snowmaking as a key component in the marketing of accommodation offering ski-in/ski-out practices. Considering the altitude was not anymore a sufficient criterion to guarantee ski-in/ski-out practice, tour operators and real estate developers asked for snowmaking facilities to invest in ski resorts. They outlined that snowmaking was a way to reassure their own investors. A major European real estate development company, partly specialised in ski tourism accommodation, mentioned that ‘ski-in/ski-out accommodation are still a sought-after product’ and for any new real estate project, he asked ski lift operators for the part of their ski slopes covered with snowmaking (#4). An international company specialised in all-inclusive holidays also mentioned that that ‘snowmaking facilities on the ski slopes leading to our resort are part of things we discussed [with the ski lift operator and the local community]’ (#5). Figure 22 shows 4 situations of a joint development of snowmaking and accommodation projects in ski resorts from our sample and mentioned by interviewees. We see that every accommodation offering ski-in/ski-out is also equipped with snowmaking facilities.



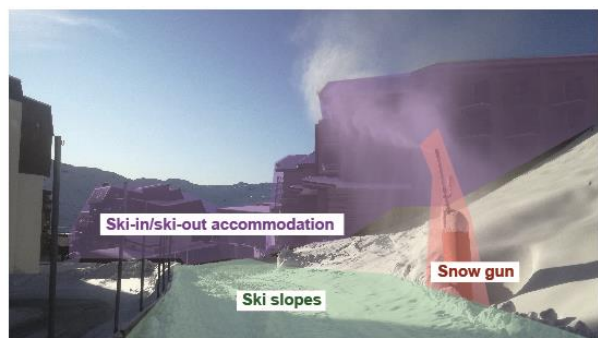
Snowmaking and accommodation jointly developed in 2014 at Valmorel



Snowmaking and accommodation jointly developed in 2018 at Les Arcs



Snowmaking and accommodation jointly developed in 2019 at La Rosière



Snowmaking and accommodation jointly developed in 2014 at Val Thorens

Figure 22. Pictures of the development of snowmaking closely linked with accommodation in ski resorts from Savoie. (Source: author's elaboration)

Snowmaking investments linked to the development of accommodation were often contracted in a three-party agreement signed between the ski lift operator, the local community and the tour operator. A mayor explained that 'Snowmaking is not even a negotiating point. It is obvious that a local community which deals with potential investors shall guarantee ski-in/ski-out access' (#2). Some respondents also mentioned a recent trend in the way ski resort stakeholders considered snowmaking:

'We already have some hotel-keepers that paid to be sure to have some snow in the front of their accommodation, because it gives an added value to their products. They paid for their snowguns.' claimed a CEO (#19).

Since ski lift operators were hitherto mainly alone to make snowmaking investments, he also predicted 'In ten years, ski resort stakeholders will pay a part of the snowmaking development, I'm sure of that' (#19). Some real estate developers have attested that they had contributed to the equipment of ski slopes around their accommodation. Given the increasing numbers of stakeholders that integrated snowmaking in their business, snowmaking systems went far beyond an adjunctive technology only considered by ski lift operators for its operation. This result highlights the diffusion of snowmaking has strongly embarked the entire stakeholders of the ski industry in a path-dependent trajectory.

6. Discussion and conclusion

Building on the analysis of the reinforcement of the use of snowmaking in the ski industry, this study highlights how that technology has emphasised the path dependence of tourism-based economy in mountainous regions. Our study, based on 38 in-depth interviews, financial figures and data collected from field work enabled us to show a broad picture of the self-reinforcement of the snowmaking dynamic. We acknowledge that the spread of snowmaking technology was led by technical progress more than external shocks from the beginning of the 1990s. We identified several lock-in effects in the path dependence of the ski industry. Recurring snowmaking investments have led to a structural lock-in while the highly specific knowledge accumulated has contributed to a cognitive lock-in. Both participate in a self-reinforcing mechanism. Technical progress and better performance produced positive feedback among the ski lift operators and hence fostered the extension of the snowmaking networks. These findings support the so-called 'Jevons' paradox' situation (Alcott, 2005) with a rebound effect: the energy efficiency gains, *ceteris paribus*, reduced the cost of snow production when reducing the quantity of energy demanded by it. The consumption of these services is therefore stimulated (Polimeni & Polimeni, 2006). This rebound effect is one specific manifestation of psychological barriers to climate change adaptation with a counterproductive effect on behaviour change (Gifford, 2011). Thus, ski lift companies experienced a rebound effect together with a cognitive lock-in. They set up a specialised technological regime for snow management, including snowmaking. The specific expertise, partly based on the human capital accumulation (Lucas, 1988), enforced the competitiveness of ski resorts in the ski tourism market. However, many interviewed also expressed to feel locked in and do not conceive of operating a ski resort without snowmaking:

'Snowmaking is a necessary evil. I say "evil" because it is expensive and if we could do without, we would do without. But we cannot do without anymore, that is no longer possible. It is necessary; it is like a seat belt to avoid crashes.' summarised a CEO of a cable car company (#19).

The cognitive lock-in is consistent with Träwöger's results that showed the improvement of snow production techniques was the only adaptation strategy mentioned by some CEOs of cable car companies. Because of that, Träwöger indicated that a 'technosalvation' ideology existed among a large part of ski tourism stakeholders (Trawöger, 2014). We suggest that the benefits of technology advances that experienced ski lift operators over the last two decades have shaped a cognitive lock-in. This lock-in effect offers an interpretation of the common 'techno-optimism' (Barry, 2016) mindset of ski resort operators. In addition, the strong prevalence of technical and engineer profiles that we brought out in our core may also be an additional element to explain the strong conviction that the development of snowmaking facilities was an essential equipment.

We found that snowmaking investments have led to a structural lock-in and these findings support the equivocal effects of lock-ins stressed by Martin and Sunley (2006). On the one hand positive effects exist in that ski lift operators have increased the efficiency of their snowmaking process and at the same time, their snow reliability: 'At the beginning we could only improve the existing natural snow cover or ensure the end of the ski season. But today we are able to guarantee the entire ski season.' said interviewee #9. On the other hand, structural lock-in also leads to negative effects. Ski lift operators justify snowmaking facilities to ensure the value of their capital assets and, at the same time, all snowmaking-related investments stay relevant only from a ski tourism business perspective. This result is consistent with Tang & Jang (2011) who considered snowmaking as operational hedges suited for long-term risk exposure but difficult to reverse. These quasi-irreversible investments related to previous capital equipment (e.g. ski lifts and previous snowmaking facilities) are a strong incentive to keep ski lift operators on the same path to benefit from increasing returns over time.

Lastly, snowmaking development went beyond the ski lift operation and was incorporated in several ski tourism-related projects, including extension of ski resorts. The development did not only rely on ski lift operators but encompassed all the supply-side of the ski tourism industry, including under-researched ski tourism stakeholders. Concerning international tour operators, a mayor admitted: 'They are the "masters of the world" so we give in to every one of their demands' (#1) and shows that some stakeholders have a strong negotiation position in the development of ski resorts, including snowmaking facilities. The key role played by snowmaking in the ski industry reflects the existence of a lock-in close to Grabher's 'functional' lock-in (1993). Close inter-stakeholders relationships in the ski resort spur an extensive use of snowmaking which became an be-all and end-all to guarantee the profitability of the slightest project. This finding also supports previous research that stressed the need for a more holistic approach to understand adaptation issues in Alpine Regions (Abegg et al., 2017). Figure 23 provides a schematic diagram of path dependence and lock-in effects of snowmaking we stressed within our study on the supply side of the ski tourism industry.

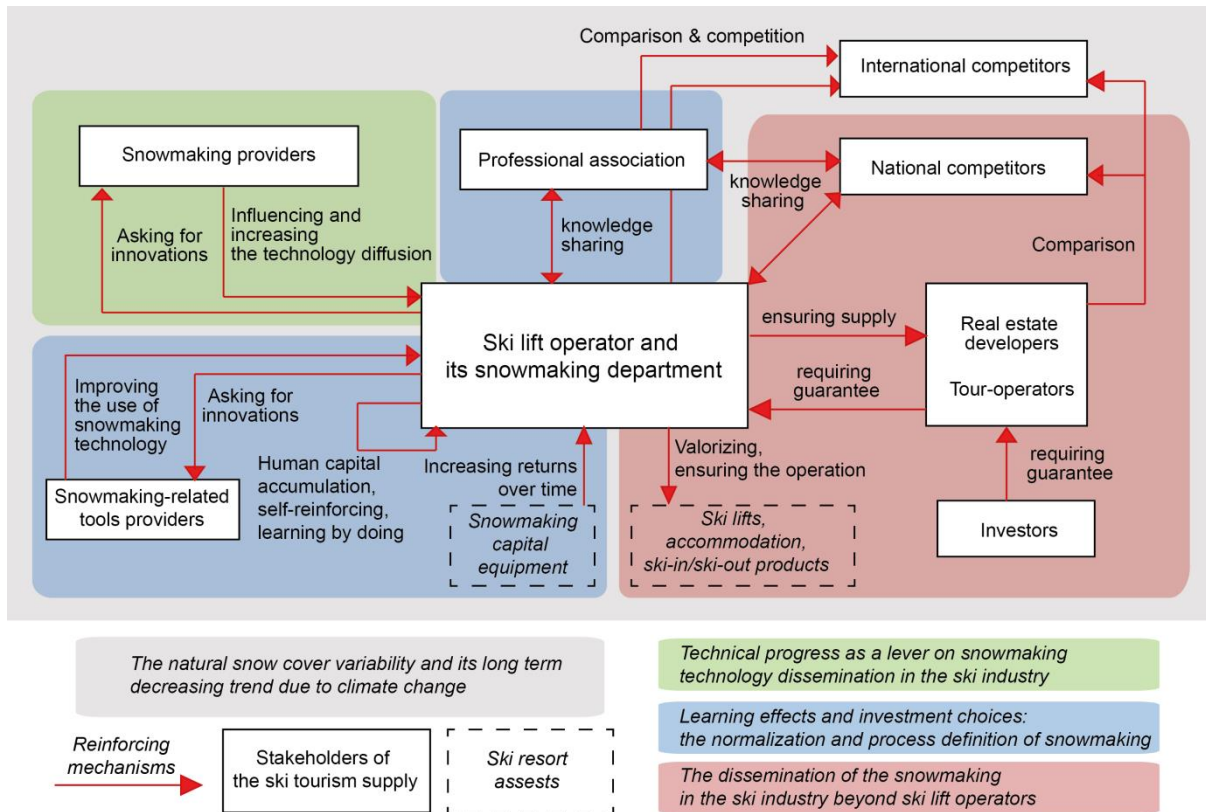


Figure 23. Schematic diagram of path dependence and lock-in effects of snowmaking technology on the supply side of the ski tourism industry

We showed the self-reinforcing mechanism of snowmaking development relied on all supply-side stakeholders of the ski industry. However the role of institutional stakeholders was the blind spot in our sampling and forms one of the limitations of the current study since we did not take account of institutional practices related to snowmaking. We suggest that ‘political’ lock-ins (Boschma & Lambooy, 1999; Grabher, 1993; Hassink, 2005) - i.e. thick institutional tissues aiming at preserving existing traditional industrial structures - likely exist and contribute to shaping the path dependence of ski resorts. Common vision for the snowmaking development found between interviewees from our core sample and local politicians from our extended sample reveals the strong ties between ski lift operators and public authorities. Apart from Gonseth's work for Switzerland (2008) and a widely held opinion that snowmaking may benefit from subsidies by the general public (Abegg et al., 2017; Falk & Steiger, 2018), there is no literature on local support regarding snowmaking facilities. Given interviewees admitted to have benefited from subsidies for their snowmaking investments, an assessment of the recent pro-snowmaking policies (e.g. grant programs for snowmaking investments) would be an opportunity to stress the contribution of institutional mechanisms in enforcing the path dependence of mountainous regions. Considering that snowmaking is unlikely to substantially reduce climate change impacts in the longer term, the IPCC SROCC in its ‘High Mountain Areas’ chapter indicated that climate change impacts put mountain communities dependent on ski tourism at financial risk (Hock et al., 2019). If it is clear that the expansion of snowmaking as the only adaptation can lead to ‘maladaptation’ (Schipper, 2020) - i.e. adaptive measures that make society more vulnerable to climate change - particular attention should be given to the role that local Alpine communities can

play. Deeply embedded in the ski tourism industry, local communities can be a source of leadership to the launch of new paths but they can also lead to a totally different outcome with reinforcing the existing path dependence.

Our study also only focused on large and very large ski resorts while smaller ski resorts present different characteristics. Often located at a lower-altitude and having less financial resources to invest, including in snowmaking facilities than large ski resorts, small ski resorts can appear to hold a marginal position in the ski tourism industry. Small ski resorts, less embedded in the snowmaking development, may more easily initiate a new path creation towards economic diversification. A comparative analysis between small and large ski resorts may highlight different path-dependent trajectories.

Chapitre V

EQUIPEMENTS POUR LA PRODUCTION DE NEIGE DANS LES STATIONS DE SPORTS D'HIVER : ENTRE POLITIQUES DE SOUTIEN REGIONALES ET DECLINAISONS TERRITORIALES

Ce chapitre V propose la version originale d'un article soumis en langue française dans la *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*.

This chapter only provides the original form of an article submitted in French to the Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research.

Ce chapitre, comme le précédent, s'inscrit dans une démarche de recherche intensive reposant en partie sur l'exploitation d'entretiens semi-directifs. Nous nous intéressons ici aux structures géographiques et aux mécanismes produits par les politiques publiques au niveau régional influençant l'investissement dans la production de neige. Nous soulignons d'un côté les caractéristiques locales des domaines skiables, propres à chaque entité et qui peuvent façonner des trajectoires d'équipement spécifiques. De l'autre, nous pointons l'influence du contexte institutionnel et plus spécifiquement le rôle des politiques publiques régionales dédiées à la production de neige. Nous montrons dans cet article comment la prise en compte de ces deux éléments s'avère nécessaires afin de comprendre les trajectoires d'équipement en production de neige des domaines skiables des Alpes françaises. Enfin, cet article est l'opportunité de mettre en avant le rôle joué par les régions, des acteurs institutionnels jusqu'ici peu étudiés dans le tourisme des sports d'hiver français.

Ce chapitre est tiré d'un article en attente d'une nouvelle soumission après demandes de révisions reçues en 11.2021 dans la *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*.

Référence de l'article

Berard-Chenu, L., François, H., Morin, S. et George, E. « Equipements pour la production de neige dans les stations de sports d'hiver : entre politiques de soutien régionales et déclinaisons territoriales » *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research* (en révision)

1. Résumé

Les spécificités des territoires touristiques de montagne et les politiques publiques régionales orientent les trajectoires d'équipement en production de neige des stations de ski des Alpes françaises. Ce travail en documente les modalités, en s'appuyant sur des données issues d'une cinquantaine d'entretiens réalisés entre octobre 2019 et septembre 2020 dans 20 stations de Savoie combinées avec une analyse des dispositifs de soutien à l'investissement en production de neige depuis 2016. L'accès à l'eau, les contraintes climatiques et les attentes des partenaires touristiques locaux sont des facteurs qui orientent, à l'échelle de chaque station, le développement de la production de neige. La dépendance des territoires de montagne à l'égard de l'économie des sports d'hiver a conduit à la mise en place par les acteurs institutionnels de politiques de soutien en faveur de la production de neige. Cette étude présente un état des lieux des politiques de soutien en France et montre au travers du cas de la région Auvergne-Rhône-Alpes qu'entre 2016 et 2019, le subventionnement a largement bénéficié à l'extension de la couverture en production de neige des plus grandes stations. Ce soutien des acteurs institutionnels est une des caractéristiques qui illustre un phénomène de dépendance au sentier des territoires de montagne vis-à-vis de l'industrie des sports d'hiver.

Mots clés : tourisme sports d'hiver ; dépendance au sentier, production de neige, politique régionale, système touristique

2. Introduction

La production de neige (aussi appelée « neige de culture » par les professionnels du tourisme hivernal) est l'adaptation technique aux effets de la variabilité et du changement climatique la plus répandue dans l'ensemble de l'industrie des sports d'hiver (Steiger et al., 2019). La croissance de ces équipements dans les dernières décennies témoigne de l'intérêt de cette technologie. Sa capacité à assurer la fiabilité de l'enneigement des stations de ski dépend à moyen terme des futures conditions météorologiques évoluant défavorablement sous l'effet du changement climatique, de la disponibilité de l'eau, du respect des réglementations environnementales ainsi que de la capacité à assurer les coûts d'investissement et d'exploitation des installations (Hock et al., 2019). La tendance à l'équipement est globale dans l'industrie européenne des sports d'hiver. La succession de plusieurs hivers faiblement enneigés à la fin des années 1980 et au début des années 90 a stimulé son essor dans les Alpes (Gonseth 2008, Gauchon, 2009). Les progrès techniques des années 1990 et 2000 combinés à la diminution de la fiabilité de l'enneigement lié aux effets du changement climatique ont favorisé son usage et son déploiement. En France, la part des surfaces couvertes en production de neige était estimée à 35% en 2015 (Spandre et al., 2015). Cette croissance soutenue depuis une quinzaine d'années masque cependant des disparités, notamment entre les stations ayant les capacités d'investir – les grandes et très grandes stations - et celles qui éprouvent plus de difficultés, les plus petites notamment (Berard-Chenu et al., 2020). Au-delà des capacités financières liées à la taille des stations et à leur modèle économique, d'autres facteurs peuvent influencer l'équipement en production de neige qui ont été peu étudiés à ce jour malgré les nombreux questionnements qui

mobilisent ces territoires au regard de leur trajectoire future de développement (Massart et al., 2021). Ces critères de choix sont de divers ordres, depuis les contraintes techniques jusqu'à la perception du besoin, mais quelle que soit leur nature, ils orientent les trajectoires de développement locales ainsi que les formes et la place qu'occupe le tourisme. Pour apporter un éclairage sur ces questions, nous avons mené une étude pour identifier les éléments locaux, dépendant et variant d'une station à une autre, qui influencent sa trajectoire d'équipement en production de neige. Si les facteurs locaux contribuent à la définition des choix d'aménagement, les territoires ne sont pas pour autant isolés, comme le soulignait déjà le concept de dépendance créatrice développé par Perret (1993). Outre la dynamique de l'industrie des sports d'hiver, le contexte politique et l'émergence de dispositifs de soutien à l'équipement des stations explicitement dédiés à la production de neige jouent un rôle incitatif important. Dans un second temps, nous avons analysé comment la dépendance des territoires de montagne à l'économie de l'industrie des sports d'hiver a conduit à la mise en place d'une politique publique en faveur de la production de neige. L'analyse des politiques de soutien à l'industrie des sports d'hiver s'avère d'autant plus nécessaire que des travaux récents sur ce sujet sont peu nombreux (Bohn & Bernardi, 2019). L'étude plus approfondie entre 2016 et 2019 du dispositif prévu par la région Auvergne-Rhône-Alpes permet d'appréhender les façons dont les acteurs institutionnels peuvent orienter, notamment avec une stratégie de subventionnement, l'équipement des stations en production de neige.

3. Positionnement et cadre méthodologique

Notre travail s'inscrit à la fois dans le courant de l'analyse territoriale des stations de ski et dans une approche évolutionniste, fondée sur le concept de dépendance au sentier, des destinations touristiques (Brouder, Clavé, Gill, Ioannides, et al., 2016). Plusieurs travaux ont mis en évidence l'intérêt d'étudier les stations de ski en tenant compte de leurs ancrages territoriaux. Perret (1993) a introduit une analyse dynamique et localisée des stations de ski faisant référence au concept de Système touristique localisé (STL). Il a ouvert le champ à des travaux où la prise en compte des spécificités des territoires de montagne permet une meilleure compréhension des recompositions à l'œuvre dans les stations de ski. Cette approche territoriale a permis de mettre en lumière les coordinations entre acteurs pour gérer la station de ski (Chambru & De Oliveira, 2021; Gerbaux & Marcelpoil, 2006), les processus de diversification touristique (Achin, 2015; François, 2007) ou encore les dynamiques foncières et immobilières (Fablet, 2013; Marcelpoil & François, 2009). Ces travaux illustrent la nécessité de prendre en compte les singularités territoriales pour comprendre les évolutions touristiques des stations de ski.

Par ailleurs, les territoires alpins, devenus dépendants de l'économie des sports d'hiver (Franch et al., 2008; Pechlaner & Tschurtschenthaler, 2003), apparaissent engagés dans un processus de «dépendance au sentier» (Martin & Sunley, 2006). Ce phénomène se caractérise par des effets de renforcement et de spécialisation du tissu économique conduisant à une situation de verrouillage. Cette rigidification s'inscrit dans la construction territoriale et d'un référentiel culturel partagé par l'ensemble des parties-prenantes, au-delà de ceux directement engagés dans l'activité économique du tourisme hivernal. L'influence de l'économie des sports d'hiver sur les territoires de montagne se manifeste par le soutien des

pouvoirs publics apporté au maintien de l'attractivité économique (Bohn & Bernardi, 2019; Falk & Steiger, 2018). La contribution des pouvoirs publics en France dans la constitution de destinations (Bensahel & Donsimoni, 1999) ou dans la diversification de l'offre touristique en montagne (Achin & George, 2019) a été documentée. Cependant les récents soutiens publics apportés à la production de neige, bien que médiatisés à leursancements, sont peu étudiés. A notre connaissance et à l'échelle européenne, seul Gonseth (2008) a réalisé une analyse de l'implication du secteur public en faveur de la production de neige en Suisse. L'auteur souligne la variété des soutiens entre un dispositif fédéral et les potentiels dispositifs cantonaux. Notre travail est l'opportunité de faire un état des lieux des dispositifs régionaux dans les Alpes françaises. Dans le cas de l'étude du dispositif régional d'Auvergne-Rhône-Alpes, nous montrons comment la politique publique peut orienter les trajectoires d'équipement pour la production de neige des stations de ski.

Pour mener ce travail, nous avons utilisé une méthode mixte, croisant différentes données. D'un côté la conduite et le traitement d'entretiens semi-directifs menés dans le département de la Savoie entre octobre 2019 et septembre 2020. De l'autre la constitution d'un état des lieux des politiques de soutien à la production de neige et l'analyse de données financières: investissements et subventions accordées par les régions Auvergne-Rhône-Alpes et Sud. Nous avons réalisé notre campagne d'entretiens auprès de 20 grandes et très grandes stations de Savoie selon la typologie de Domaines Skiables de France, la chambre professionnelle des exploitants de remontées mécaniques (30 entretiens). Le nombre de stations enquêtées garantit une diversité de situations tandis que le critère de la taille permet de cibler les stations les plus engagées dans la production de neige (Spandre et al., 2016a). En France, les remontées mécaniques sont un service public sous la responsabilité des collectivités locales dites « supports » qui peuvent faire le choix de gérer directement ce service ou de le déléguer. Pour comprendre l'influence des spécificités locales dans le développement de la production de neige, nous avons aussi rencontré les acteurs des collectivités locales supports de station de ski (n=15). Les personnes rencontrées étaient principalement des maires. Le guide d'entretien était structuré en trois parties, i) l'évolution de la couverture de la station en production de neige et les contraintes associées, ii) les relations entretenues entre les parties-prenantes de la station au sujet des choix de développement pour la production de neige, iii) la place des politiques de soutien à la production de neige dans les stratégies d'investissement. Concernant l'étude des politiques de soutien, nous avons réalisé une analyse plus poussée du dispositif « Plan Neige » mis en place entre 2016 et 2020 par la région Auvergne-Rhône-Alpes. A cette occasion nous avons réalisé des entretiens avec des élus régionaux et des fonctionnaires territoriaux. La liste de de l'ensemble des personnes rencontrées et de leur fonction occupée est présentée en Annexes (Annexes : Table 20).

4. Résultats

1. Développement de la production de neige en tenant compte des spécificités et les contraintes locales

Le développement de la production de neige dépend en premier lieu des configurations spatiales et des contraintes liées aux sites d'implantation des stations de ski. Un des premiers critères mentionnés par les interviewés est la qualité de l'enneigement naturel, perçue comme variable d'une station à une autre. La production de neige vient conforter ou compenser des régimes de précipitation perçus comme moins favorables vis-à-vis d'autres domaines skiables : « cet effort qu'on a pu faire [en équipement en production de neige] c'est parce que notre coin c'est quand même le secteur le plus sec des Alpes du Nord, du coup on n'a pas le choix que de muscler un peu notre neige de culture » (interviewé #38). Par opposition, certains exploitants ont expliqué que le retard qu'ils observaient dans leurs équipements en production de neige pouvait provenir des conditions d'enneigement naturelles plutôt bonnes qu'ils connaissaient, le besoin de s'équiper ne se faisant pas sentir. Certains secteurs au regard de leurs caractéristiques restent difficiles à équiper. Le vent rend l'implantation des installations, en grande majorité des perches en bord de piste, plus complexe, notamment sur des secteurs d'altitude : « On a peu de canons à neige car force est de constater qu'à certaines d'altitudes comme la nôtre on a énormément de vent et placer judicieusement un canon à neige relève du défi » explique un exploitant (#30). Les exploitants mentionnent aussi l'eau comme une ressource dont la disponibilité contraint le développement de la production de neige. Son abondance et sa facilité d'accès expliquent l'essor ou au contraire le retard dans la couverture des domaines skiables : « sur la neige de culture on a commencé tard, parce qu'on n'avait pas de ressource en eau, tout simplement » explique un exploitant (#22). La rareté de l'eau peut pousser les exploitants à réaliser de lourds investissements, pour la stocker ou la capter. En moyenne, le coût d'investissement pour une retenue d'altitude équivaut à 760k€ (source : exploitation données investissement 1997-2018 de *Montagne Leaders*, voir Berard-Chenu et al., 2020). Indépendamment des enjeux financiers, les exploitants restent soumis aux contraintes géographiques de leurs domaines skiables : un des exploitants expliquant qu'« aujourd'hui, on n'a pas trouvé sur notre domaine, de site dans lequel on pourrait lancer la construction d'une nouvelle retenue » (#42), restreignant ses projets d'extension. Par ailleurs la ressource en eau en montagne fait souvent l'objet d'usages multiples à laquelle la production de neige vient s'ajouter (Gerbaux et al., 2020). Les exploitants de domaines skiables composent avec d'autres usages, notamment celui de la production d'hydroélectricité. La proximité des stations de ski avec des ouvrages hydroélectriques facilite l'extension et l'augmentation des capacités de production des réseaux de production de neige. Plusieurs exploitants ont mentionné des prélèvements en eau dans ces installations hydroélectriques. Ces prélèvements représentent, sur une moyenne quinquennale, 20% des besoins en eau pour la production de neige en Savoie (Direction départementale des territoires de la Savoie, 2020). Le principal concessionnaire des ouvrages hydrauliques concernés (interviewé #52) confirme ces pratiques et rappelle qu'il est autorisé à fournir de l'eau pour produire de la neige. Les services de l'Etat ont défini que les volumes accordés pour la production de neige

ne devaient pas dépasser le seuil de 1% des volumes destinés à la production hydroélectrique (DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, 2019).

Les exploitants expliquent également composer avec l'héritage des territoires dans lesquels les stations sont implantées. Ils développent leurs réseaux de production de neige dans des domaines skiables façonnés par des choix de développement antérieurs. Par exemple, la différence d'altitude entre stations du département de Savoie et de Haute-Savoie illustre les spécificités auxquelles les exploitants sont confrontés: l'altitude minimale moyenne des stations de ski haute-savoyardes est de 1400m, soit 250m plus bas que celles des stations savoyardes. En Haute-Savoie, les stations se sont davantage développées autour des villages déjà mis en tourisme avant l'essor des sports d'hiver (Larique, 2006), tandis qu'en Savoie les stations ont été plus souvent construites *ex-nihilo*, à plus haute altitude. Les exploitants haut-savoyards développent donc la production de neige à des altitudes plus basses que leurs collègues savoyards en moyenne. Le critère de l'altitude pour le déploiement de la production de neige est d'ailleurs sujet de débat entre acteurs du tourisme. Plusieurs personnes rencontrées récusent un tel critère altitudinal et regrettent la définition d'un éventuel seuil: « il ne faut pas que l'on se dise, comme certains l'on fait en Savoie, que la [production de] neige, c'est au-dessus de 1500 mètres. Cela n'a pas de sens » précise un élu haut-savoyard (#11). On retrouve la même contradiction au sujet du développement de la production de neige que celle montrée par George-Marcelpoil & François (2012) dans la gestion des domaines skiables : d'un côté une tendance croissante à la territorialisation et de l'autre le maintien d'une approche sectorielle plus uniforme. Plusieurs exploitants ont insisté sur les particularités inhérentes à chaque station, chacune ayant son histoire, ses spécificités topographiques, sa façon de gérer son domaine skiable et donc ses particularités en matière de production de neige.

Les acteurs locaux impliqués dans la gestion de la station ainsi que les modalités de leur intervention sont propres à chaque station et influencent sa trajectoire d'équipement. Le rôle joué par certains acteurs-clés de la station (directeur d'exploitation, maire, entrepreneur local, etc.) a une influence sur la stratégie d'équipement. Certains exploitants ont été précurseurs comme le directeur des pistes d'une des stations étudiées qui milita pour l'équipement en production de neige dès les années 1970 pour finalement voir la première installation en 1985. D'autres se sont montrés beaucoup plus réticents et retardèrent l'équipement de leur station : « notre directeur des pistes de l'époque était presque contre la neige de culture car on était selon lui en altitude et qu'on en avait toujours assez eu [de neige naturelle] » explique un enquêté (#20). Du côté des collectivités, les mentalités des autorités délégantes ont évolué. Les exploitants mentionnent une prise de conscience par leurs autorités délégantes des nécessités d'investir dans la production de neige : « il y a une dizaine d'année en derrière les élus ne voulaient encore que du 'câble', quelque chose qui puisse se voir, c'était la priorité. Maintenant la réflexion c'est d'avoir aussi une assurance d'exploitation de ces équipements » (interviewé #25).

Dans ce contexte, certaines autorités délégantes se montrent prescriptives auprès de leurs délégataires. L'équipement en production de neige est soumis à l'influence à la fois de la stabilité politique et des rapports, souvent asymétriques (Gerbaux & Marcelpoil, 2006), qu'entretiennent acteurs publics et privés, y compris le délégant et délégataire. La production

de neige est un des enjeux de gouvernance des stations de ski : la localisation des équipements et la définition des secteurs d'exploitation prioritaires forment une « géopolitique » du domaine skiable. L'ensemble des acteurs touristiques de la station (tels que les hôteliers, les restaurateurs, les loueurs de matériels ou les écoles de ski) sont vigilants quant à la production de neige. Les services de nivoculture (services internes à l'exploitant de domaine skiable, en charge de la production) se retrouvent parfois sous l'influence de ces acteurs, comme l'indique un responsable nivoculteur : « Il y a trois ans on a eu des difficultés au mois d'avril, on a commencé à fermer des pistes et il a fallu qu'on se justifie [...] quand tu as la pression des socio-professionnels tu ne fais pas le fier » (interviewé #26). L'influence des parties-prenantes de la station est d'autant plus prégnante lorsque le service en charge de la production de la neige est géré directement par la collectivité. Au-delà des critères technico-économiques, la collectivité publique délégante peut jouer un rôle de régulation plus ou moins fort, pouvant aller jusqu'à une intervention directe pour soutenir des projets que les exploitants ne souhaitaient pas expressément réaliser. Des autorités locales ont reconnu avoir soutenu des travaux d'investissements pour équiper des retours sur les villages : « Pour se mettre d'accord sur le modèle économique avec l'exploitant, la collectivité devait porter 1,5 millions d'euros d'investissement à sa charge, c'était la condition » a précisé un fonctionnaire territorial (#9). La constitution de coalitions d'acteurs, sur un mode assez similaire à celui observé par Fablet (2013) dans les dynamiques immobilières des stations de ski, peut faire émerger des opérations d'équipement en production de neige. Les relations de pouvoirs, les rapports de force ainsi que les intérêts parfois divergents entre les différentes parties-prenantes (Chambru & De Oliveira, 2021) permettent d'expliquer des trajectoires d'équipements différentes en fonction des stations.

Nous avons montré que la production de neige se développe de manière différenciée en fonction des spécificités de chaque station. Des éléments dépendant des sites d'implantation, de l'historique de développement ainsi que des liens qu'entretiennent les différentes parties-prenantes de la station orientent le développement de la production de neige. Nous avons souligné l'implication des autorités publiques locales mais elles ne sont pas les seules : les institutions régionales influencent aussi l'équipement des stations au travers de leurs politiques publiques.

2. La production de neige : objet des politiques publiques régionales alpines

Les stations de ski ont régulièrement bénéficié du soutien des collectivités publiques. Les Départements, comme celui de la Savoie, sont historiquement engagés en faveur du tourisme hivernal (François & George-Marcelpoil, 2012). A la faveur de changements, la production de neige est devenue un thème de l'action publique des collectivités régionales. La Figure 24 montre l'évolution des investissements en production de neige (1997-2019) et des subventions régionales accordées entre 2016 et 2019 dans les Alpes françaises. On observe des politiques régionales dédiées au soutien à la production de neige à partir de 2016, à la faveur d'alternances politiques en région Auvergne-Rhône-Alpes comme en région Sud. Ces politiques de soutien se manifestent par l'attribution de subventions pour des investissements dans des équipements de production de neige et rompent avec les dispositifs régionaux antérieurs de soutien à la diversification touristique (Achin & George,

2019). La Figure 24 nous montre que l'ensemble des aides accordées sur le massif alpin sur la période 2016-2019 équivaut à près de 60M€. Le taux de subventionnement est en moyenne à 30%. Les projets de production de neige, financés par les exploitants ou les communes en fonction des cas, peuvent bénéficier d'aides publiques supplémentaires venant se cumuler avec le soutien régional. On note ainsi l'existence de politiques départementales de soutien à la production de neige en Haute-Savoie depuis 2008, en Isère depuis 2016 ou encore en Savoie (2007-2013).

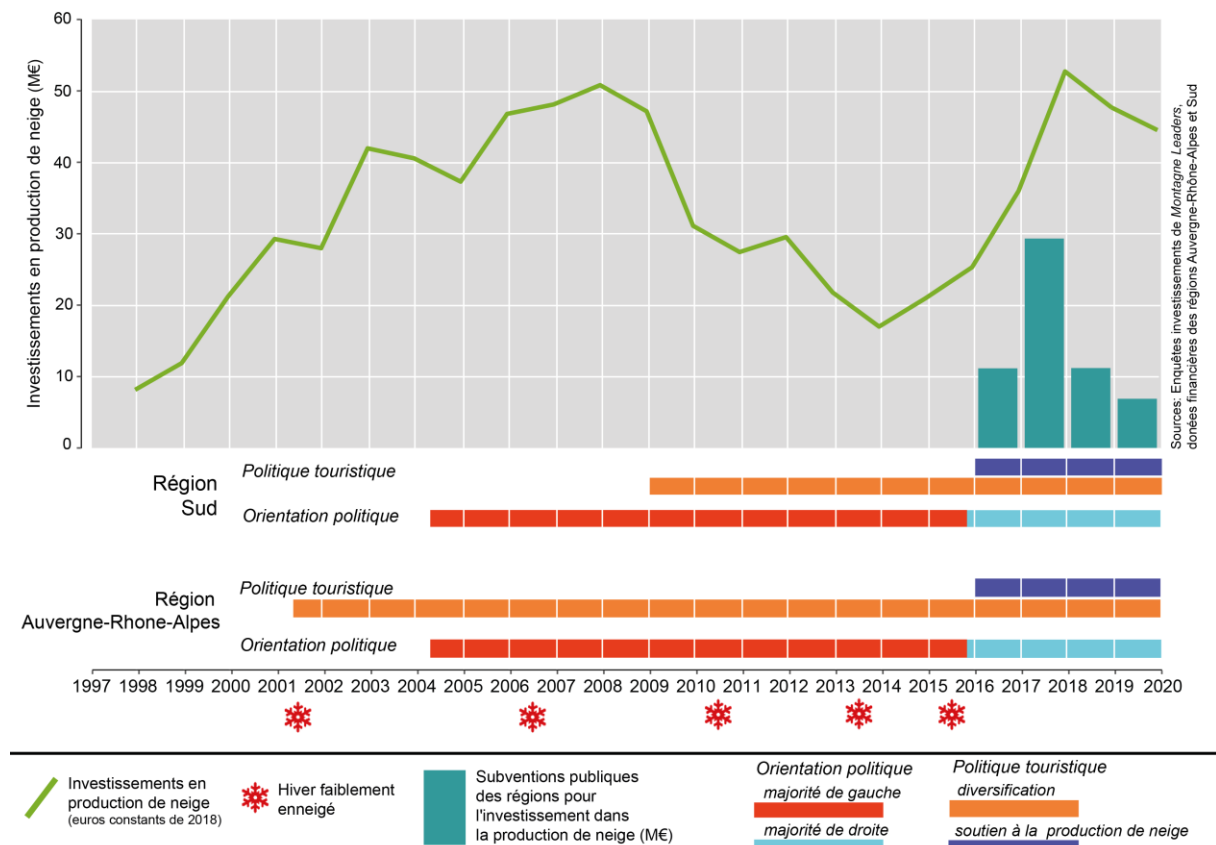


Figure 24. Evolution des investissements en production de neige (1997-2019) et des subventions régionales accordées entre 2016 et 2019 dans les Alpes françaises

Concernant la mise en place de la politique menée par la région Auvergne-Rhône Alpes, elle souligne la capacité des acteurs du tourisme du ski à ouvrir une fenêtre d'opportunité politique ou « policy window » (Kingdon, 1995; Kingdon & Stano, 1984) au sujet de la production de neige. Les conditions pour ouvrir une telle fenêtre sont réunies lorsque simultanément, (1) un problème est reconnu, (2) qu'une solution de politique publique existe et (3) que le contexte politique est favorable au changement. La Table 12 détaille l'application de ces critères en faveur de l'industrie des sports d'hiver dans la région Auvergne-Rhône-Alpes selon les concepts développés par Kingdon. L'influence des acteurs de l'industrie des sports d'hiver a débouché sur l'inscription des équipements pour la production de neige à l'agenda politique des candidats puis élus politiques de la région Auvergne-Rhône-Alpes. On retrouve de fortes convergences entre le discours des élus locaux et régionaux et celui des acteurs de l'industrie des sports d'hiver concernant la

production de neige. Les exploitants partagent une vision commune d'un retard d'équipement en production de neige vis-à-vis de leurs concurrents européens. Les références mises en avant en matière de production de neige sont les Italiens et les Autrichiens : « les stations autrichiennes ou du nord de l'Italie sont à la pointe en termes d'équipement en neige de culture , ce sont quand même des références » (interviewé #34) ; « Il y a un retard avéré en France par rapport à nos concurrents qu'ils soient italiens ou autrichiens, c'est sûr puisqu'ils ont un taux d'équipement de leurs domaines skiables qui oscille entre 70% et 100% et que nous on est très loin de cela » explique un exploitant (#40).

Ces éléments de discours, mis en avant par Domaines Skiables de France dans ses documents de communication (DSF, 2020), se retrouvent chez les élus locaux. La Table 13 répertorie les interviewés qui ont mentionné un retard français vis-à-vis de la concurrence européenne en équipement de production de neige. On remarque que ce discours, quasi-unanimement observé chez les exploitants, est repris aussi bien par les élus des communes qu'au niveau régional. Un maire de station décrit : « Les Dolomites c'est la référence, l'Autriche est derrière avec 60% de taux de couverture quand nous on est encore péniblement à 35-40%. » (#2). Au sujet de la politique de subvention, un élu régional explique que « nous [les stations d'Auvergne-Rhône-Alpes] étions particulièrement sous-dotées en neige de culture, contrairement à ceux qui forment la concurrence européenne dans le domaine du ski et donc il nous manquait des équipements en neige pour éviter une distorsion de concurrence » (#13). La vision d'une production de neige comme déterminant de compétitivité, vis-à-vis de la concurrence entre stations européennes, est partagée jusqu'au niveau des décideurs politiques de la Région Auvergne-Rhône-Alpes. S'il est encore trop tôt pour évaluer les retombées de cette politique de soutien – et ce d'autant plus dans le contexte des perturbations majeures de l'industrie touristique sous l'effet de la crise sanitaire due à l'épidémie de la COVID-19 en 2020 et 2021 - plusieurs effets peuvent néanmoins être mis en évidence. Ce plan a principalement permis d'étendre les surfaces couvertes dans des stations bénéficiant déjà d'équipements en production de neige. Ainsi sur les 148 projets financés par le « Plan Neige » de la région Auvergne-Rhône-Alpes entre 2016 et 2019, plus de la moitié concerne des extensions de réseaux de production de neige existants. La création de retenues d'altitude ne compte que pour 10% des projets mais capte 18% des montants (voir Table 19 en Annexes). Enfin, la moitié des projets subventionnés avaient un coût d'investissement supérieur à 850 000€. Tous les exploitants que nous avons rencontrés ont bénéficié de ces subventions dans leurs projets d'investissement en production de neige. Cette politique de soutien à la production de neige, sans critère d'altitude ou de taille, s'adressait à toutes les stations comme l'explique un élu régional : « ce plan n'exclut personne, n'est pas réservé aux plus fragiles et n'exclut pas les grandes stations ». Mais il concède néanmoins que les grandes stations ont largement bénéficié du dispositif : « nous nous sommes rendus compte que les 'petites stations' avaient du mal à accéder à des investissements même avec notre soutien de 30% » (#13). Les grandes stations ont donc largement bénéficié du dispositif d'Auvergne-Rhône-Alpes. Ces résultats viennent compléter ceux de Gonseth (2008) qui montraient qu'en Suisse la loi sur l'aide aux investissements dans les régions de montagne, dispositif fédéral de prêts à taux bonifié en vigueur de 1997 à 2008, avait essentiellement profité aux stations moyennes, les plus petites et les plus grandes ayant bénéficié de façon marginale du dispositif.

Table 12. Ouverture d'une fenêtre d'opportunité politique concernant la production de neige à l'échelle de la région Auvergne-Rhône-Alpes.

Notions selon Kingdon	Description des phénomènes	Cas pour la production de neige en Auvergne-Rhône-Alpes
Le problème public (<i>problem stream</i>)	La façon dont un problème est pensé par les groupes d'acteurs qui le portent dans la société et le font émerger sur la scène publique.	- Mauvais enneigement de l'hiver 2006/2007. - Prise de conscience de la vulnérabilité des stations vis-à-vis des précipitations neigeuses + reconnaissance grandissante des impacts du changement climatique par la profession des exploitants. - Rapport du député Rolland en 2006 sur la perte de compétitivité des domaines skiables français vis-à-vis de leurs concurrents européens. - Idée d'un retard français en matière de production de neige par rapport aux concurrents italiens et autrichiens
Le contexte politique (<i>political stream</i>)	Ce contexte peut regrouper : l'opinion publique, les forces politiques organisées (partis et syndicats), les pouvoirs exécutifs ou la négociation collective.	- Changement de majorité politique en décembre 2015 avec une orientation sur la politique touristique de montagne - Affirmation d'acteurs défendant l'industrie de sports d'hiver au sein de l'exécutif régional (par ex. arrivée d'un conseiller spécial « Montagne » auprès de l'exécutif régional, ancien président du syndicat national des moniteurs du ski français) - Concurrence inter-régionale, notamment avec la Région Sud, sur l'ampleur des soutiens apportés aux territoires de montagne.
Les politiques publiques (<i>policy stream</i>)	Ce sont l'ensemble des solutions en matière d'action publique disponibles. Elles dépendent des cadres législatifs et réglementaires, des faisabilités techniques et des systèmes de valeurs des acteurs.	- Dispositif d'incitation à l'investissement des opérateurs de domaines skiables. - Politique de subventionnement par la région: taux de 30% avec seuil de 600 000€ par projet. - Des dispositifs de soutien déjà éprouvés à l'échelon départemental : en Savoie (2007-2013) et en Haute-Savoie (depuis 2008).

En Auvergne-Rhône-Alpes, l'accès aux subventions pour les grandes stations a souvent donné lieu à un effet d'aubaine : les opérateurs ont réalisé des investissements avec un soutien public mais ces investissements étaient programmés et auraient sans doute été réalisés de toute façon tôt ou tard, avec ou sans subventions. Pour la plupart des exploitants, ces subventions ont permis d'accélérer leurs programmes d'investissements : « Je n'ai pas fait des choses que je n'aurais pas faites sans ; mais [les subventions] nous ont permis d'accélérer notre plan d'investissement » (interviewé #27). Certains enquêtés ont témoigné que le soutien régional permettait aussi de conforter les choix d'investissements de l'exploitant auprès des parties-prenantes de la station : l'attribution de financements est alors perçue comme une validation par l'échelon régional du projet de développement de la station.

Table 13. Mentions d'un retard français vis-à-vis de la concurrence européenne concernant l'équipement en production de neige en fonction des groupes d'interviewés

Groupes d'interviewés	Nombre d'entretiens évoquant un retard français (nombre d'entretiens du groupe)
Domaines skiables	26 (30)
Collectivités locales	8 (11)
Fabricants d'enneigeurs	3 (3)
Collectivités régionales	3 (4)
Promoteurs immobiliers	0 (2)
Gestionnaires de l'eau	0 (2)

5. Conclusion

Plusieurs facteurs expliquent les trajectoires différentes qu'ont prises les stations de ski en matière de développement de la production de neige. En premier lieu, les stations sont dépendantes de leur site d'implantation. Les spécificités géographiques et climatiques, notamment l'accès à l'eau et les configurations des domaines skiables, jouent un rôle fondamental et font qu'une station est plus ou moins bien dotée pour développer sa production de neige. En second lieu, les choix de développement passés des stations influent aussi sur les possibilités de développement des réseaux de production de neige. Aux aménagements hérités avec lesquels les stations composent s'ajoutent les parties-prenantes de la station qui orientent le développement de la production de neige. Ainsi les spécificités territoriales et les modalités de gouvernance sont des éléments déterminants pour comprendre la trajectoire d'équipement des stations de ski.

Notre étude montre, au travers de l'analyse de la politique de la Région Auvergne-Rhône-Alpes, que les collectivités publiques jouent un rôle singulier dans le développement de la production de neige. Les liens étroits qu'entretiennent les autorités publiques et acteurs économiques favorisent l'intervention publique en faveur de l'industrie du ski. Une fenêtre d'opportunité politique s'est ouverte pour apporter un soutien régional à la production de neige. Cette intervention publique sur la production de neige, souvent laissée aux soins des

exploitants (Bohn & Bernardi, 2019) est assez inédite en Europe. Bien que les autorités publiques locales peuvent soutenir financièrement les stations de ski en Autriche (Falk & Steiger, 2018, 2020) ou en Italie (Joly & Ungureanu, 2018), seule l'analyse de la politique suisse de soutien à la production de neige existait jusqu'alors. Avec le dispositif suisse, les plus petites stations n'étaient souvent pas éligibles tandis que les plus grandes n'en avaient pas besoin pour financer leurs investissements (Gonseth, 2008). Dans le cas de la région Auvergne-Rhône-Alpes et à la différence de la politique suisse, les grandes stations ont largement bénéficié du dispositif de soutien. La politique de soutien en Auvergne-Rhône-Alpes a rendu possible un effet d'aubaine car il permettait de réduire le coût de l'investissement tandis que le dispositif suisse avec son taux bonifié ne réduisait que le coût de l'emprunt, sans influence sur les coûts de l'investissement. Les dispositifs de soutien régionaux, au travers des subventions, contribuent à l'extension des systèmes de production de neige. Ce soutien renforce l'orientation des trajectoires des territoires de montagne à l'égard de l'industrie des sports d'hiver et peut participer à l'accroissement d'un verrouillage économique aux effets ambivalents pour les territoires de montagne. D'un côté la réalisation d'investissements hautement spécialisés comme ceux en production de neige permet de renforcer la compétitivité et l'attractivité de l'industrie du ski française. D'autre part le soutien apporté par les acteurs institutionnels peut empêcher des évolutions ou des restructurations du tissu économique, ce qui a été identifié et décrit pour d'autres contextes industriels (Grabher, 1993; Hassink, 2005, 2010). Un des risques encourus est celui d'une « maladaptation » (Schipper, 2020) où le renforcement des conditions d'exploitation de l'activité touristique hivernale dans les territoires de montagne peut d'une part s'avérer inefficace voire même contre-productif et empêcher ces territoires de s'adapter de façon plus profonde, voire radicale, à des changements de grande ampleur, notamment ceux liés aux impacts futurs du changement climatique.

ENJEUX ET CONCLUSION DE RECHERCHE

I. ENJEUX ET CONTRIBUTIONS DU TRAVAIL DE RECHERCHE

La vulnérabilité de l'industrie des sports d'hiver aux conditions d'enneigement l'a poussée à développer depuis plusieurs décennies des pratiques pour réduire sa dépendance aux variations d'enneigement naturel. Cette nécessité d'adaptation est d'autant plus marquée que l'exploitation d'un domaine skiable s'apparente à un secteur d'industrie lourde, avec de fortes immobilisations qui nécessitent d'être rentabilisées. Les contraintes d'exploitation d'un domaine skiable sont donc difficilement compatibles avec l'aléa de l'enneigement auquel s'ajoutent les impacts du changement climatique. Dans ce contexte, les opérateurs de domaines skiables ont massivement recouru à la production de neige pour répondre aussi bien aux impacts du changement climatique qu'à la variabilité interannuelle des précipitations neigeuses. Cependant ni les impacts du changement climatique, ni la variabilité des précipitations neigeuses se semblaient être des éléments suffisants pour d'expliquer les dynamiques d'investissement observées. Ce travail de thèse entendait donc apporter plusieurs contributions sur la compréhension des dynamiques d'investissement dans la production de neige et leurs effets quant à l'orientation des trajectoires de développement des stations de sports d'hiver.

L'enjeu principal résidait dans l'identification et la compréhension des mécanismes permettant d'expliquer l'essor de la production de neige dans l'industrie des sports d'hiver française. Compte-tenu des débats que suscite cette pratique aussi bien dans l'opinion publique qu'auprès des décideurs politiques, il existait un enjeu fort de meilleure connaissance et d'objectivation des mécanismes de développement de la production de neige. Bien qu'une tendance générale à la croissance des superficies équipées ait été montrée, il nous est apparu nécessaire de souligner que la production de neige restait aussi soumise à différentes contingences territoriales pouvant accélérer, orienter ou retarder son développement, notamment à l'échelle de chaque domaine skiable. Par ailleurs considérer la production de neige pas uniquement comme une caractéristique donnée d'un domaine skiable mais comme un processus dynamique ayant transformé l'activité économique des sports d'hiver nous est apparue comme un enjeu de recherche d'intérêt. En effet, l'équipement en production de neige a modifié l'exploitation des domaines skiables. Les motivations à s'équiper ont aussi pu varier, sous l'influence des choix passés ainsi qu'en fonction des différents intérêts défendus par les parties prenantes qui composent le système d'acteurs de l'industrie des sports d'hiver.

Cet enjeu de recherche se déclinait selon deux modalités de recherche.

La première consistait à identifier plus finement les mécanismes de croissance de la production de neige et notamment d'en avoir une connaissance à l'échelle individuelle des domaines skiables. Considérer les dynamiques de développement de la production de neige

au travers des trajectoires d'équipement des domaines skiables nous permet d'avoir une vision plus nuancée de son utilisation ainsi que de son apport dans la fiabilisation de l'enneigement des domaines skiables. En effet, il existait peu de recherches sur les changements passés de la fiabilité de l'enneigement en neige gérée dans les domaines skiables. Il apparaissait pertinent de caractériser les dynamiques passées d'équipement en production de neige ainsi que leurs effets sur la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables. Nous avons utilisé des données d'investissement afin d'en inférer l'évolution de la couverture en production de neige à l'échelle de chaque domaine skiable. Il existait donc un intérêt d'utilisation concrète des résultats issus des travaux de modélisation afin de caractériser l'évolution de l'enneigement en tenant des dynamiques d'équipement en production de neige. La meilleure connaissance des trajectoires passées a permis de mettre en évidence dans quelles mesures la production de neige a contribué à fiabiliser l'enneigement. Ces connaissances participent à une meilleure compréhension de l'effet de l'équipement des domaines skiables en production de neige.

La seconde modalité de ce travail était d'ordre théorique. En effet, nous avons identifié un enjeu de renouvellement des cadres de recherche pour étudier les trajectoires d'évolution des destinations touristiques. La mobilisation de la géographie économique évolutionniste (GEE) et de la notion de dépendance au sentier était l'opportunité d'appliquer un concept analytique peu mobilisé dans l'étude de l'évolution des destinations de montagne. La mise en évidence d'un phénomène de dépendance au sentier associé au développement de la production de neige a eu deux implications. D'un côté, cela a permis de renouveler la compréhension du phénomène de diffusion de cette technologie, en mettant à jour des mécanismes nouveaux. De l'autre, nous avons pu éprouver un concept théorique sur une technologie et dans un territoire touristique encore peu étudiés par la géographie économique évolutionniste. A terme, nous pouvons envisager une contribution théorique de la notion de dépendance au sentier dans l'orientation des trajectoires des destinations touristiques de montagne.

II. RESUMES DES PRINCIPAUX RESULTATS

Afin de comprendre le phénomène de croissance de la production de neige dans l'industrie touristique des sports d'hiver, nous avons mis en place une méthode de recherche mixte. Nos travaux ont montré que les dynamiques d'investissement en production de neige ne se réduisaient pas uniquement à des facteurs météorologiques et climatiques. Nous avons identifié que dans le cadre du marché touristique des sports d'hiver, des ancrages territoriaux et des facteurs technico-économiques déterminaient aussi l'investissement en production de neige.

1. Les conditions d'enneigement, déterminantes pour l'investissement dans la production de neige des plus petits domaines skiables

Une partie de ce travail de thèse s'est intéressée à déterminer l'influence des conditions météorologiques et des effets du changement climatique sur les choix d'investir dans la production de neige. Nous avons mis en évidence l'influence de la taille des domaines skiables comme facteur de différenciation dans les stratégies d'investissements en production de neige. Ainsi sur les 20 dernières années, nos résultats indiquent que les plus grandes stations sont celles qui investissent le plus dans les équipements de production de neige indépendamment de leur expérience de mauvaises conditions d'enneigement. Concernant les petits domaines skiables, ils semblent piloter leurs stratégies d'investissement dans la production de neige en fonction des conditions météorologiques qu'ils connaissent. En effet, ils investissent davantage en production de neige l'année suivant celle où ils sont confrontés à une baisse de leur enneigement. Ce résultat montre, d'une part, que les seules conditions d'enneigement ne permettent pas d'expliquer les dynamiques d'investissement. D'autre part, la taille des domaines skiables apparaît également comme un facteur de différenciation des comportements. En effet, les plus grands domaines skiables sont capables de soutenir des dynamiques d'investissement planifiées leur permettant de réduire le risque économique tandis que les petits domaines skiables ont davantage tendance à investir dans la production de neige en réaction à une dégradation de leurs conditions d'enneigement.

2. De fortes disparités d'équipement en production de neige observées entre domaines skiables

Nous avons aussi montré que la production de neige a en partie permis aux domaines skiables de réduire leur dépendance à l'aléa des précipitations neigeuses. En effet, derrière une tendance générale de hausse des superficies couvertes en production de neige, il existe différentes trajectoires d'équipement en production de neige en fonction des domaines skiables. Nous avons retracé ces différentes trajectoires d'évolution à l'échelle de 16 domaines skiables savoyards, en soulignant l'intérêt de mener des efforts de modélisation à l'échelle des domaines skiables puisque nous observons une grande hétérogénéité dans

l'évolution du taux de couverture des domaines skiables. Cette hétérogénéité se traduit par des gains de fiabilité de l'enneigement variables aussi bien en fonction de la période de la saison que de l'altitude des domaines skiables. Là aussi des situations contrastées sont observées entre fiabilité de l'enneigement sur les domaines majoritairement situés au-dessus de 2000 mètres et ceux situés sous cette altitude. L'observation que nous avons menée à l'échelle individuelle débute en 1997 et compte-tenu de nos reconstitutions de taux historiques, nous observons des différences dans la couverture en production de neige entre les domaines skiables dès cette date. L'inégal développement de la production de neige dans les domaines skiables des Alpes est constaté dès la deuxième moitié des années 1990. L'équipement différencié entre domaines skiables justifie donc les efforts de modélisation à l'échelle individuelle lorsque les données le permettent.

3. Production de neige, entre standardisation de l'usage et adaptation aux contextes locaux

Nos travaux ont montré que le développement de la production de neige dépend de facteurs technico-économiques propres à l'industrie des sports d'hiver ainsi que des ancrages locaux de cette activité dans les territoires de montagne. Ces résultats sont ressortis suite à l'analyse d'entretiens réalisés auprès d'acteurs des grands domaines skiables. Nous avons montré que les variations observées dans la couverture en production de neige s'expliquaient par l'influence de facteurs spécifiques associés à chaque domaine skiable. Ainsi, leurs possibilités financières, techniques mais aussi des contraintes géo-topographiques sont des facteurs qui limitent ou facilitent le développement de la production de neige. Par exemple, nous avons montré que l'accès à la ressource en eau est un des éléments principaux qui a pu faciliter ou retarder le développement de la production de neige dans de nombreux domaines skiables. Aux contraintes géo-topographiques s'ajoutent les spécificités des ancrages territoriaux et les choix de développement décidés par les parties prenantes qui composent l'écosystème touristique de montagne. Le développement d'ensembles immobiliers sur des secteurs de basse altitude ou le besoin de connecter différents secteurs d'un domaine skiable ont souvent guidé le développement de la production de neige. Enfin, une approche évolutive de l'équipement en production de neige a permis de montrer que la stratégie d'aménagement et les contraintes de production ont évolué au cours des 30 dernières années. L'équipement en production de neige est donc fonction de l'organisation des stations de ski qui est héritée de leurs phases successives de construction. En plus de l'influence de l'aménagement de la station, nous avons souligné que le développement de la production de neige était aussi dépendant des choix d'aménagement et d'équipement antérieurement réalisés par les opérateurs.

Au-delà des spécificités territoriales intrinsèques à chaque domaine skiable, nous montrons dans nos travaux qu'un mécanisme de dépendance au sentier s'est mis en place. L'essor, puis le renforcement ainsi que l'usage systématique de la production de neige ont été en partie facilités par les progrès techniques réalisés par les fabricants d'enneigeurs. L'acquisition au fil des ans d'une expertise, d'un savoir-faire et d'immobilisations ont progressivement constitué un capital très spécifique au sein de chaque domaine skiable. Ce capital oriente sur le long terme la trajectoire de développement des stations de ski. En effet,

nous avons vu qu'il représentait environ 20% des d'investissements réalisés par les opérateurs, il nécessite d'être régulièrement actualisé par de nouveaux investissements et ne reste pertinent que dans la poursuite de l'exploitation du domaine skiable. Enfin, nous avons mis en évidence que l'essor de la production de neige dépassait l'exploitation d'un domaine skiable puisqu'elle était devenue un outil permettant d'assurer la qualité de certaines prestations touristiques, notamment la pratique « skis-aux-pieds ». Nos résultats mettent en avant la place que jouent les tour-opérateurs soucieux de sécuriser leurs ventes ou les promoteurs immobiliers souhaitant valoriser leurs biens dans la dynamique d'équipement en production de neige.

4. Les dynamiques de la production de neige, au croisement de trois tendances dans les territoires touristiques de montagne

D'une manière générale, nos travaux montrent que les dynamiques d'investissements s'inscrivent à la fois dans une tendance générale liée à l'évolution de l'industrie du ski, aux impacts du changement climatique mais aussi dans des contextes territoriaux différents. La Figure 25 schématise les trois tendances dans lesquelles s'inscrit l'investissement dans la production de neige. Nous observons d'un côté, une tendance partagée par l'ensemble des grands domaines skiables étudiés. La production de neige ainsi que les motivations pour s'équiper sont les mêmes et trouvent leur source dans l'évolution de la gestion d'un domaine skiable et la mise en concurrence entre les différentes offres européennes. Dans ce contexte, le déploiement ainsi que l'usage de la production de neige se sont standardisés. D'un autre côté, nous observons que les logiques de développement composent avec l'ancrage local et les spécificités historiques des domaines skiables. Outre les capacités financières des opérateurs qui diffèrent, le déploiement de la production de neige s'inscrit dans le cadre de l'équilibre général des contrats de délégation de service public. L'accès à la ressource en eau ainsi que des conditions d'installations (lieux pour implanter une retenue d'altitude) et de production de neige (altitude d'implantation, exposition au vent) facilitent ou freinent le déploiement systématique et l'usage standard de cette pratique à l'échelle de chaque domaine. Les ancrages territoriaux orientent donc eux aussi le développement de cette technologie.

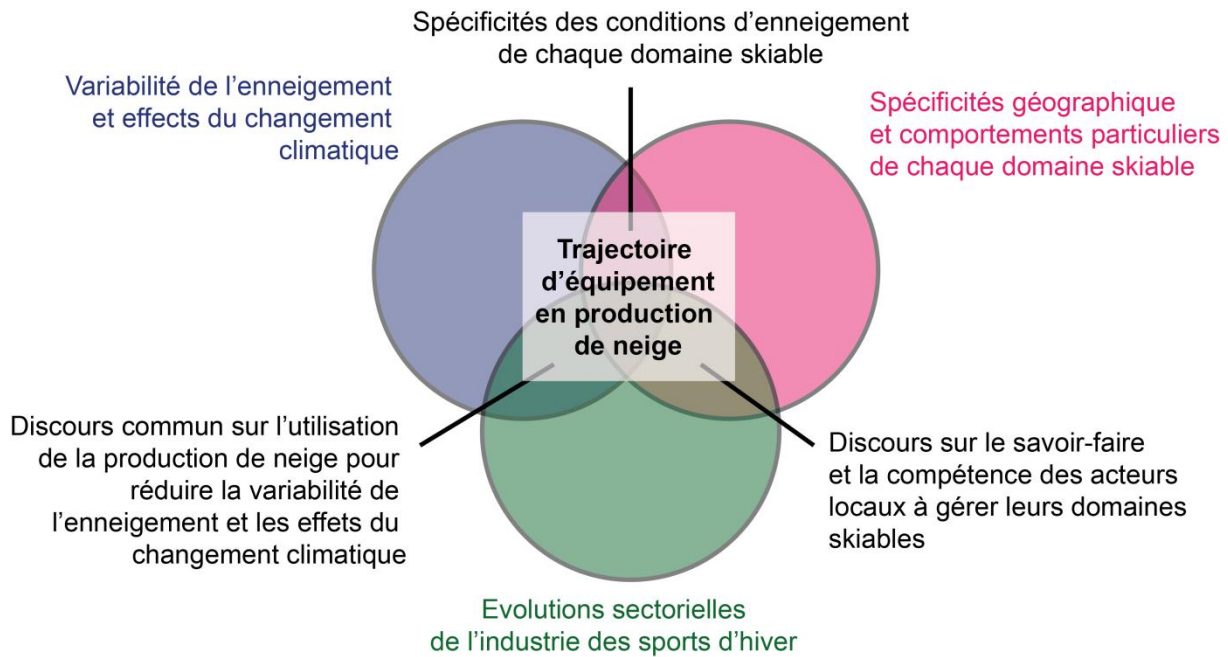


Figure 25. La dynamique de la production de neige dans les domaines skiables des Alpes françaises au croisement de trois influences: déterminants physiques, spécificités géographiques et tendances générales de l'industrie des sports d'hiver.

Notre travail de thèse offre une description ainsi qu'une meilleure compréhension d'une pratique, la production de neige, qui s'est généralisée dans l'industrie des sports d'hiver au cours des trente dernières années. Nous avons montré la pluralité des déterminants qui influençaient l'investissement dans la production de neige. Les résultats de nos travaux montrent aussi comment la production de neige a modifié l'industrie des sports d'hiver, en apportant certains gains de fiabilité de l'enneigement et en même temps en initiant un processus de dépendance au sentier. La meilleure compréhension des mécanismes de croissance de la production de neige fournit des éléments permettant d'éclairer le débat public que ce soit sur l'usage de cette technologie ou sur les réflexions quant aux transitions des territoires touristiques de montagne. Les résultats peuvent aussi fournir une base de réflexion quant aux rôles que peuvent jouer les acteurs insitutionnels dans l'orientaiton du développement économique des territoires de montagne.

ANNEXES

Table des Annexes

I.	Annexes Chapitre I.....	132
II.	Annexes Chapitre II.....	137
III.	Annexes Chapitre IV	141
IV.	Annexes Chapitre V	144

I. ANNEXES CHAPITRE I

Table 14. Revue de presse d'articles mentionnant la production de neige dans la presse nationale française entre 1993 et 2019 selon la base de données en ligne Europresse

Année	Mois	Journal	Titre
1993	octobre	Les Echos	<i>Les stations de montagne investissent à nouveau</i>
1994	décembre	Les Echos	<i>Les stations de montagne veulent se prémunir contre le manque de neige</i>
1996	avril	La Tribune	<i>Les canons à neige « cultivent » l'or blanc automatiquement</i>
1996	avril	La Tribune	<i>Les stations de ski s'informatisent tout schuss</i>
1999	janvier	Libération	<i>La neige bonne à skier, ça ne tombe pas du ciel.</i>
2000	février	Le Figaro	<i>Y-aura-t-il de la neige aux vacances ?</i>
2000	octobre	L'Humanité	<i>Neige artificielle</i>
2001	janvier	Le Monde	<i>La course aux canons à neige</i>
2001	février	Le Monde	<i>Une neige si cultivée</i>
2001	février	La Croix	<i>Neige rare et réchauffement de la planète posent des questions sur l'avenir des sports d'hiver</i>
2001	mars	Le Monde	<i>Les Vosges, un massif au canon</i>
2001	mai	Libération	<i>Artificielle, mais tenace</i>
2001	décembre	Libération	<i>Val-d'Isère sauvé par les canons</i>
2002	avril	Les Echos	<i>Les Alpes du Sud sauvées par l'enneigement artificiel</i>
2003	janvier	La Tribune	<i>Les Alpes du Sud investissent dans la neige artificielle</i>
2004	février	Libération	<i>La poudreuse artificielle pas vraiment blanche comme neige</i>
2004	avril	L'Express	<i>Interdire les canons à neige?</i>
2004	avril	Libération	<i>La neige artificielle n'est pas sur une si mauvaise pente</i>
2004	avril	Le Monde	<i>Les canons à neige artificielle favorisent la pollution des sols</i>
2004	avril	Le Monde	<i>Les additifs ajoutés à l'eau des canons à neige artificielle favorisent la pollution des sols</i>
2004	décembre	Le Monde	<i>En Savoie, le recours à l'enneigement artificiel inquiète les écologistes</i>
2004	décembre	Le Figaro	<i>Les écologistes tirent sur les canons à neige</i>
2004	décembre	Libération	<i>La neige artificielle noircit les sommets</i>
2005	février	Les Echos	<i>La neige de culture « blanchie » par les experts</i>
2005	mars	L'Humanité	<i>La neige pompe l'eau</i>
2006	février	Les Echos	<i>Des stations privées d'eau ?</i>
2006	février	Le Monde	<i>Des canons à neige précieux mais dangereux</i>
2006	septembre	Le Monde	<i>La baisse de l'enneigement va peser sur la gestion de l'eau</i>
2006	décembre	La Croix	<i>Les stations de ski créent des hivers artificiels</i>
2006	décembre	La Croix	<i>Restera-t-il de la neige en montagne ?</i>
2006	décembre	Le Figaro	<i>Alerte sur l'enneigement des stations</i>
2006	décembre	Aujourd'hui en Fr.	<i>La neige artificielle peut être écolo</i>
2006	décembre	Aujourd'hui en Fr.	<i>« On ne pourra pas en créer indéfiniment »</i>
2007	janvier	Aujourd'hui en Fr.	<i>Ces canons qui divisent la montagne</i>
2007	janvier	Les Echos	<i>Culte de la neige et neige de culture</i>
2007	juillet	Le Monde	<i>La Savoie asséchée réfléchit à un juste partage de l'eau</i>

Année	Mois	Journal	Titre
2007	novembre	Le Monde	<i>Et si la neige manquait ?</i>
2008	janvier	Libération	<i>Piste verte pour la neige artificielle</i>
2008	janvier	Les Echos	<i>La neige de culture se fait omniprésente</i>
2008	février	Aujourd'hui en Fr.	<i>Les canons à neige sauvent la saison des Vosges</i>
2008	août	Les Echos	<i>Les stations de ski multiplient la construction de retenues collinaires</i>
2008	décembre	Le Monde	<i>La neige de culture pèse sur l'eau et la biodiversité</i>
2009	août	Le Monde	<i>En Savoie, la préservation de la montagne se heurte à la logique économique</i>
2009	novembre	La Tribune	<i>À Zermatt, la neige sera israélienne</i>
2010	février	La Croix	<i>L'attribution des JO doit-elle dépendre d'une garantie d'enneigement ?</i>
2010	février	Les Echos	<i>Un nouveau lac artificiel aux Arcs</i>
2010	juillet	Le Figaro	<i>Les élus de montagne très inquiets de la ressource en eau</i>
2010	septembre	L'Humanité	<i>Les canons à neige assèchent la montagne</i>
2010	septembre	20 minutes	<i>La neige artificielle pas canon pour l'environnement</i>
2011	février	Aujourd'hui en Fr.	<i>Y aura-t-il assez de neige sur les pistes?</i>
2011	mars	Les Echos	<i>Les canons à neige déclenchent une guerre de l'eau</i>
2011	novembre	Aujourd'hui en Fr.	<i>Dure, dure, la neige artificielle...</i>
2017	janvier	L'OBS	<i>Les canons à neige, c'est comme avec le nucléaire : on fonce</i>
2012	février	Libération	<i>Toutes les pistes du ski artificiel</i>
2014	février	Le Figaro	<i>Quand le climat tuera les JO d'hiver</i>
2015	décembre	Le Monde	<i>Comment on fabrique de la neige de culture</i>
2015	décembre	Aujourd'hui en Fr.	<i>Des températures trop élevées, même pour la neige de culture</i>
2015	décembre	La Croix	<i>Comment est fabriquée la neige de culture</i>
2015	décembre	Libération	<i>Les sports d'hiver sur la pente raide</i>
2015	décembre	La Croix	<i>Cultivons la neige</i>
2015	décembre	Aujourd'hui en Fr.	<i>Les cent tonnes de neige de la discorde</i>
2016	janvier	Les Echos	<i>Canons à neige et activités ludiques au programme</i>
2016	janvier	Le Figaro	<i>Le prix de la neige artificielle</i>
2016	février	La Croix	<i>Les stations de ski « accros » à la neige artificielle</i>
2016	avril	La Tribune	<i>Neige de culture : le réchauffement climatique est-il une aubaine?</i>
2016	mai	Les Echos	<i>50 millions d'euros pour la neige artificielle</i>
2016	juillet	La Tribune	<i>Montagne : la Région mise sur le court terme</i>
2016	décembre	L'OBS	<i>Canons à neige et folie douce : quand la montagne devient un triste parc d'attractions</i>
2016	décembre	Le Monde	<i>En moyenne montagne, l'hiver à coups de canon</i>
2016	décembre	Aujourd'hui en Fr.	<i>Merci la neige de culture</i>
2016	décembre	L'Express	<i>Face au manque de neige, des stations ont trouvé la parade</i>
2017	février	Aujourd'hui en Fr.	<i>Méta dit merci à la neige de culture</i>
2017	août	Les Echos	<i>Climat : des canons à neige pour protéger le glacier des deux-alpes de la fonte</i>
2017	août	La Tribune	<i>Des canons à neige sur le glacier des Deux Alpes, une première</i>
2017	décembre	La Croix	<i>Des champions de ski condamnés à la neige artificielle</i>

Année	Mois	Journal	Titre
2018	janvier	Libération	<i>A fond les canons (à neige) !</i>
2018	février	Le Figaro	<i>Les nouveaux canons de la neige</i>
2018	février	Le Parisien	<i>Réchauffement climatique : la neige artificielle pointée du doigt</i>
2018	février	Aujourd'hui en Fr.	<i>La neige artificielle pointée du doigt</i>
2018	mars	L'Express	<i>Neige artificielle: les secrets des faiseurs d'or blanc</i>
2018	novembre	Les Echos	<i>Canons à neige, retenues collinaires : les stations de ski s'équipent à marche forcée</i>
2018	décembre	20 Minutes	<i>Montagne: Les stations de ski pourraient limiter la casse jusqu'en 2050 grâce à la neige de culture</i>
2018	décembre	Huffington Post	<i>Ça sera grâce à la neige artificielle si les skieurs pourront encore skier en 2050 en Isère</i>
2018	décembre	La Croix	<i>La neige de culture et le réchauffement climatique</i>
2019	janvier	Le Parisien	<i>Victimes du réchauffement, les stations de ski misent sur les canons à neige</i>
2019	janvier	Aujourd'hui en Fr.	<i>Les canons à poudreuse au secours des stations</i>
2019	janvier	Le Monde Diplo.	<i>Dans les Alpes, la neige artificielle menace l'eau potable</i>
2019	juin	Le Figaro	<i>Réchauffement climatique: la neige artificielle, un pis-aller fragile</i>

Table 15. *Commentaires réalisés concernant la production de neige par les gouvernements sur le projet final de résumé à l'intention des décideurs du rapport SROCC.*

"Artificial snowmaking": Aren't there any negative impacts on the environment ? Please put some word of caution against that 'effective artificial snowmaking in many places'. Artificial snowmaking has issues in terms of the resource cost (limiting profitability of ski resorts), use of energy/ electricity to produce the snow (unless electricity is produced by 'clean energy', it increases GHG emission) and, a bigger concern, the water required (sometimes pumped from groundwater, or exacerbating water use conflicts). There are a number of reports and literature on that topic. [Government of France]

Put some word of caution against that 'effective artificial snowmaking in many places'. As we all know, artificial snowmaking has issues in terms of the resource cost (limiting profitability of ski resorts), use of energy/ electricity to produce the snow (unless electricity is produced by 'clean energy'. This increases GHG emission) and, a bigger concern, the water required (if it is pumped from groundwater it does not help!). There are a number of reports and literature on that topic. [Government of Monaco]

According to the context, "Artificial snowmaking" seems to be presented in a good way. However, this is a somewhat consuming method as it can not be widely used in the tropics. So I suggest that the sentence should be constructed with the idea that while this method ("artificial snowing") can now be perceived as effective, a more efficient method or a fundamental solution needs to be implemented. [Government of Republic of Korea]

Suggest replacing "Artificial snowmaking" with "Snowmaking technology". The snow is not artificial per se. [Government of United States of America]

The report qualifies artificial snowmaking as an effective adaptation measure for sustaining ski tourism. Artificial snow cannot be a sustainable alternative to natural snow because of its impacts on natural resources, notably on water and soils. In addition, it involves considerable energy use and risks locking in high-emission, non-essential activities, often with questionable long-term viability. It should be deleted as an example of a successful adaptation option, or should be carefully qualified, highlighting the high risk of maladaptation. [European Union]

Point B7.5 states that artificial snow-making will become less effective even at 1.5°C of warming. Point A7.5 as written could give the misleading impression that it will continue to be an effective form of adaptation. "Artificial snowmaking has so far been effective in many places as an adaptation measure for sustaining ski tourism, but is not expected to remain effective as temperatures increase" might be more appropriate wording. [Government of United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)]

Please revise or delete these lines. Artificial snowmaking has severe environmental impacts and high energy requirements, leading to GHG emissions. It is not a sustainable option and should therefore not be portrayed as an appropriate and effective adaptation measure. It is also not effective in low-lying areas, and increasingly maladaptive with rising temperatures (cf. B7.5/2.3.5, 2.3.6). [Government of Germany]

We would suggest adding some words to the second paragraph as follows: "Snow management methods such as artificial snowmaking has been effective in many places as an adaptation measure for sustaining ski tourism, when environmental conditions and economic costs are met. "We are afraid that the current second sentence picks up a part of the explanation in section 2.3.5. Our preference is covering the key message in 2.3.5 more generally. We understand 2.3.5 discusses the effectiveness of snow management method as adaptation and that one of the main methods is artificial snowmaking but this is only effective when various conditions are met. [Government of Japan]

This comment is valid for B7.5 as well as for A7.5: Artificial snowmaking is a 'maladaptation'. It has serious impacts on the water cycle and on the vegetation layer. It is a very short-sighted measure. Suggestion to delete this sentence or add a qualifier that makes it clear that artificial snowmaking is not a viable solution. [European Union]

Please consider to remove the reference to artificial snow-making. Rationale: Artificial snowmaking is an adaptation measure which is not sustainable and should therefore not portrayed as an appropriate measure. The following sentence (L32-33) is important for development under climate change conditions. See also our comment to P-11 L43-44: [Government of Germany]

Source :https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FD_GovernmentReviewComments.pdf

II. ANNEXES CHAPITRE II

Table 16. List of ski resorts from collection B with within-ski resort deviations of natural snow reliability index and snowmaking investment based on an 18-year period (1997–2014)

Ski resort	Size	Ski lift mean elevation (masl)	Ski lift power (km.pers/h)	Natural snow reliability index		Snowmaking investments	
				Annual mean (%)	Full period SD	Annual mean (k€)	Full period SD
Col Saint Jean	M	1885	2952	34	29	110	215
Stations de l'Ubaye	L	1910	5825	37	31	62	186
Pra-Loup	L	2058	6772	48	33	333	497
Val d'Allos	L	2040	8257	48	33	376	564
Station du Queyras	L	2067	6834	48	36	494	869
Ancelle	S	1511	1842	52	31	232	306
Stations du Champsaur	M	1692	3907	47	26	167	257
Les Orres	L	2029	6545	60	35	556	943
Montgenèvre	L	2156	8587	67	32	588	731
Orcières Merlette	L	2204	8297	76	28	296	481
Pelvoux-Vallouise	S	1615	1391	54	31	79	94
Puy Saint Vincent	L	2043	5734	78	29	212	346
Réallon	S	1792	1408	48	36	27	73
Risoul	L	2190	6734	68	37	432	976
Serre Chevalier	XL	1999	26,571	73	27	1197	1264
Massif du Dévoluy	L	1834	7068	59	29	522	798
Vars	L	2144	9073	59	36	637	991
Chazelet-Villar d'Arene	S	1898	1088	70	29	29	109
Stations du Mercantour	XL	2031	17,669	57	32	1908	2200
Roubion Les Buisses	S	1629	728	28	31	19	82
Valberg-Beuil	M	1656	4849	36	36	763	1374
Col Du Rousset	S	1433	1297	58	34	0	2
Lus-la-Jarjatte	S	1357	385	25	28	0	2
Autrans	S	1420	1535	42	32	9	16
Chamrousse	L	1883	7078	89	18	138	166
Le Collet d'Allevard	M	1715	2897	77	25	45	104
Gresse-en-Vercors	S	1410	1257	47	32	34	67
Saint Pierre de Chartreuse	M	1318	2958	52	33	2	8
L'Alpe d'Huez	XL	2129	18,232	73	24	1498	2380
L'Alpe du Grand	M	1716	3225	58	31	64	269

Ski resort	Size	Ski lift mean elevation (masl)	Ski lift power (km.pers/h)	Natural snow reliability index		Snowmaking investments	
				Annual mean (%)	Full period SD	Annual mean (k€)	Full period SD
Serre							
Les Deux Alpes	XL	2311	23,796	83	18	361	347
Saint Hilaire du Touvet	S	1075	517	27	24	16	63
Les Sept Laux	L	1786	10,881	78	23	423	1065
Oz-Vaujany	L	1853	8072	65	26	257	580
Lans-en-Vercors	S	1523	1880	60	35	13	22
Méaudre	S	1265	1645	32	26	29	92
Col de Marcieu	S	1194	221	41	35	26	98
Villard-de-Lans	L	1575	9644	61	30	522	757
Albiez-Montrond	M	1725	2708	73	26	137	365
Arêches-Beaufort	M	1652	4247	74	20	122	253
Aussois	M	2096	3055	55	24	288	509
Bonneval-sur-Arc	S	2339	2024	72	31	30	41
Crest Voland	M	1411	3472	58	34	202	312
Val d'Arly	L	1506	8345	71	25	300	339
Savoie Grand Revard	S	1407	1287	70	32	1	3
La Norma	M	2018	4032	54	29	262	397
La Plagne	XL	2061	35,044	74	21	1156	1023
La Rosiere	L	2033	6969	70	26	276	798
La Toussuire	L	1940	6148	72	24	322	536
Le Corbier	L	1865	6363	71	22	195	344
Les Arcs	XL	2019	31,699	76	23	1599	2063
Les Karellis	M	2043	4986	84	17	118	197
Les Menuires	XL	2189	22,331	79	20	834	692
Les Saisies	L	1739	8433	74	23	477	709
Méribel	XL	1878	15,767	64	23	948	869
Pralognan	M	1813	3505	52	28	82	104
Saint-François-Longchamp	L	1904	6405	62	27	105	225
Saint-Sorlin d'Arves	L	2028	7746	75	22	201	363
Tignes	XL	2443	25,814	88	17	677	932
Val Cenis	L	1927	13,212	50	29	361	357
Val d'Isère	XL	2381	24,371	87	18	1333	833
Val Fréjus	M	2145	3773	57	30	159	443
Valloire	L	1951	9631	77	20	666	1121
Valmeinier	L	2019	7718	80	19	481	696
Valmorel	L	1762	11,005	64	26	358	484
Val Thorens	XL	2501	19,844	91	14	1469	1641
Orelle	L	2294	5217	61	10	62	223
Bessans	S	1849	185	32	32	66	186
Sainte-Foy	S	2067	2436	74	25	89	193

Ski resort	Size	Ski lift mean elevation (masl)	Ski lift power (km.pers/h)	Natural snow reliability index		Snowmaking investments	
				Annual mean (%)	Full period SD	Annual mean (k€)	Full period SD
Tarentaise							
Courchevel	XL	2094	39,787	79	20	1111	1184
Aillon Le Jeune-Margeriaz	M	1431	3594	64	26	9	30
Abondance	S	1375	1205	65	26	73	180
Avoriaz-Morzine	XL	1789	18,826	81	15	544	704
Bellevaux Hirmentaz	S	1362	2115	65	29	163	193
Bernex	S	1399	2372	68	25	118	228
Chamonix	XL	1939	27,378	82	15	524	604
La Chapelle d'Abondance	M	1381	3156	68	27	154	458
Chatel	L	1641	13,959	79	20	740	1164
Combloux	M	1541	4753	82	20	202	617
Les Contamines-Hauteluce	L	1786	10,409	76	20	427	470
Flaine	L	1987	13,466	93	9	545	789
Le Grand Bornand	L	1516	11,400	76	22	733	841
Habere Poche	S	1200	1454	51	29	19	75
La Clusaz	L	1633	13,826	82	18	641	847
Les Brasses	M	1249	2617	54	29	201	327
Les Carroz d'Araches	L	1562	7348	70	25	272	517
Les Gets	L	1502	10,489	72	26	472	527
Les Houches-Saint-Gervais	L	1536	5872	77	22	53	118
Manigod Croix Fry	S	1579	2088	86	22	111	216
Megève	XL	1562	15,132	80	21	619	946
Mont-Saxonnex	S	1346	828	77	25	8	17
Morzine Pleney Nyon	L	1468	9204	71	24	472	564
Plaine-Joux	S	1508	749	60	31	30	111
Praz-De-Lys-Sommand	L	1575	5099	78	24	21	72
Saint Gervais Bettex	L	1552	7293	77	19	441	564
Espace Roc d'Enfer	M	1425	3100	62	27	145	544
Morillon-Samoens-Sixt	L	1446	12,159	68	20	170	246
Thollon-Les-Memises	S	1538	2468	81	22	57	134
Saint Nicolas de Véroce	M	1751	3657	84	17	74	114

Ski resort	Size	Ski lift mean elevation (masl)	Ski lift power (km.pers/h)	Natural snow reliability index		Snowmaking investments	
				Annual mean (%)	Full period SD	Annual mean (k€)	Full period SD
Sallanches- Cordon	S	1315	1005	61	29	35	96

III. ANNEXES CHAPITRE IV

Table 17. List of participants interviewed with their group affiliation and position held

Respondent No.	Category	Position	Gender
1	local authority	local politician/mayor	m
2	local authority	local politician/mayor	m
3	local authority	local politician/mayor	m
4	resort development	chief operating officer	m
5	resort development	ski resort development manager	m
6	ski lift	CEO	m
7	ski lift	snowmaking manager	m
8	ski lift	assistant snowmaking manager	m
9	ski lift	snowmaking manager	m
10	ski lift	chief operating officer	m
11	ski lift	CEO	m
12	ski lift	CEO	m
13	ski lift	CEO	m
14	ski lift	snowmaking manager	m
15	ski lift	chief operating officer	m
16	ski lift	CEO	m
17	ski lift	chief operating officer	m
18	ski lift	CEO	m
19	ski lift	chief operating officer	m
20	ski lift	snowmaking manager	m
21	ski lift	CEO	m
22	ski lift	CEO	m
23	ski lift	snowmaking manager	m
24	ski lift	CEO	m
25	ski lift	snowmaking manager	m
26	ski lift	chief operating officer	m
27	ski lift	CEO	m
28	ski lift	CEO	m

Respondent No.	Category	Position	Gender
29	ski lift	marketing director	m
30	ski lift	chief operating officer	m
31	ski lift	CEO	m
32	ski lift	snowmaking manager	m
33	ski lift	marketing manager	m
34	ski lift	CEO	m
35	ski lift	Corporate social responsibility manager	m
36	Snowmaking companies	marketing director	m
37	Snowmaking companies	research and development director	m
38	Snowmaking companies	marketing director	m

Table 18. *Semi-structured interview guide for our core sample (CS)*

1. Could you introduce yourself?
 - your background
 - your previous experience in the ski industry
2. Could you describe the current snowmaking situation?
 - Do you know the part of the ski slopes covered with snowmaking systems?
 - How do you describe your snowmaking situation with respect to other ski resorts?
 - Could you describe the companies that supplied you snowmaking systems?
 - Could you describe the relationships with other ski tourism stakeholders regarding snowmaking use?
3. How do you manage your current snowmaking systems?
 - Do you know your water and energy consumption related to snow production?
 - Do you measure the cost of your snowmaking production?
 - What are the tools used to manage the snowmaking production?
4. What were the different phases of the development of snowmaking?
 - Do you know when the first snowmaking system was set-up in your ski resort?
 - Did you notice any technical progress? Did they have any impacts on the development of your snowmaking system?
5. What were the reasons for the development of snowmaking?
 - Did these reasons change over time?
 - Could you explain the role of snowmaking in the ski lift operation? Did it change over time?
6. How do you plan your future snowmaking investments?
 - What sort of timescale do you use to plan snowmaking investment?
 - Do you plan snowmaking investments with other investments?
 - How do you manage the development of snowmaking systems?
 - Have you already benefited from public support?
 - What are the barriers and the challenges of future snowmaking development?

IV. ANNEXES CHAPITRE V

Table 19. Résumé des projets ayant reçus des subventions de la part de la Région Auvergne-Rhône-Alpes entre 2016 et 2019

Types d'opération	Nb. de projets	Montants des subventions (M€)
Extension de réseaux existants	88	26,0
Amélioration de réseaux existants	42	10,3
Retenue d'altitude	15	8,1
Création de nouvelles installations	3	0,7
<i>Total</i>	<i>148</i>	<i>45,1</i>

Table 20. Liste des différentes personnes interviewées

N°	Catégorie	Poste occupé	Genre
1	collectivité locale	Maire	m
2	collectivité locale	Maire	m
3	collectivité locale	Elu local	m
4	collectivité locale	Maire	f
5	collectivité locale	Maire	m
6	collectivité locale	Elu local	m
7	collectivité locale	Maire	m
8	collectivité locale	Maire	m
9	collectivité locale	Fonctionnaire territorial	m
10	collectivité locale	Fonctionnaire territorial	m
11	collectivité locale / collectivité régionale	Maire/élu régional	m
12	collectivité locale	Maire	m
13	collectivité régionale	Elu régional/maire	m
14	collectivité régionale	Fonctionnaire territorial	m
15	collectivité régionale	Elu régional	m
16	promoteur	Directeur d'exploitation	m
17	promoteur	Responsable marché ski/montagne	m
18	domaine skiable	Directeur général	m
19	domaine skiable	Responsable nivoculture	m
20	domaine skiable	Assistant responsable nivoculture	m
21	domaine skiable	Responsable nivoculture	m
22	domaine skiable	Directeur d'exploitation	m
23	domaine skiable	Directeur général	m
24	domaine skiable	Directeur général	m
25	domaine skiable	Directeur général	m
26	domaine skiable	Responsable nivoculture	m
27	domaine skiable	Directeur d'exploitation	m
28	domaine skiable	Directeur général	m
29	domaine skiable	Directeur d'exploitation	m
30	domaine skiable	Directeur général	m

N°	Catégorie	Poste occupé	Genre
31	domaine skiable	Directeur d'exploitation	m
32	domaine skiable	Responsable nivoculture	m
33	domaine skiable	Directeur général	m
34	domaine skiable	Directeur général	m
35	domaine skiable	Responsable nivoculture	m
36	domaine skiable	Directeur général	m
37	domaine skiable	Responsable nivoculture	m
38	domaine skiable	Directeur d'exploitation	m
39	domaine skiable	Directeur général	m
40	domaine skiable	Directeur général	m
41	domaine skiable	Responsable marketing	m
42	domaine skiable	Directeur d'exploitation	m
43	domaine skiable	Directeur général	m
44	domaine skiable	Responsable nivoculture	m
45	domaine skiable	Responsable marketing	m
46	domaine skiable	Directeur général	m
47	domaine skiable	Référent RSE	m
48	fabricants d'enneigeurs	Directeur commercial	m
49	fabricants d'enneigeurs	Respo. Recherche et Développement	m
50	fabricants d'enneigeurs	Directeur commercial	m
51	gestionnaire d'eau	Responsable	m
52	gestionnaire d'eau	Responsable	m

BIBLIOGRAPHIE

- Abegg, B., Agrawala, S., Crick, F., & Montfalcon, A. (2007). Climate change in the European Alps : Adapting winter tourism and natural hazards management. *Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management*. <https://www.oecd.org/env/cc/climatechangeintheeuropeanlpsadaptingwintertourismandnaturalhazardsmanagement.htm>
- Abegg, B., Kolb, M., Sprengel, D., & Hoffmann, V. H. (2008). Klimawandel aus der sicht der schweizer seilbahnunternehmer. *Jahrbuch der Schweizerischen Tourismuswirtschaft 2008*, 73-83.
- Abegg, B., Morin, S., Demiroglu, O. C., François, H., Rothleitner, M., & Strasser, U. (2020). Overloaded ! Critical revision and a new conceptual approach for snow indicators in ski tourism. *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01867-3>
- Abegg, B., Steiger, R., & Trawöger, L. (2017). Resilience and Perceptions of Problems in Alpine Regions. In R. W. Butler (Éd.), *Tourism and Resilience* (Cabi, p. 105-117). 10.1079/9781780648330.0105
- Achin, C. (2015). *La gouvernance de la diversification comme enjeu de l'adaptation des stations de moyenne montagne : L'analyse des stations de la Bresse, du Dévoluy et du Sancy* [Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01452832/document>
- Achin, C., & George, E. (2019). Tourism Diversification in the Development of French Ski Resorts. In U. Pröbstl-Haider, H. Richens, & S. Türk, *Winter Tourism : Trends and Challenges* (CAB International,).
- Alcott, B. (2005). Jevons' paradox. *Ecological Economics*, 54(1), 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.020>
- Arbesser, M., Grohall, G., Helmenstein, C., & Kleissner, A. (2010). *Die ökonomische Bedeutung des alpinen Wintersports in Österreich—Jahresbericht 2009*.
- Arellano, M., & Bond, S. (1991). Some Tests of Specification for Panel Data : Monte Carlo Evidence and an Application to Employment Equations. *Review of Economic Studies*, 58(2), 277-297.
- Arnell, N. W., & Delaney, E. K. (2006). Adapting to climate change : Public water supply in England and Wales. *Climatic Change*, 78(2-4), 227-255. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9067-9>
- Arthur, W. B. (1988). Self-reinforcing mechanisms in economics. In *The economy as an evolving complex system* (p. 9-31).
- Arthur, W. B. (1989). Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events. *The Economic Journal*, 99(394), 116-131. <https://doi.org/10.2307/2234208>
- Arthur, W. B. (1994). *Increasing returns and path dependence in the economy*. University of Michigan Press.
- Atout France. (2012). *Panorama du tourisme de la montagne—Cahier n° 2 : L'emploi et les retombées économiques* (N° 34; Observation touristique, p. 232). Atout France. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/catalogue/9782367110127/index.shtml>
- Atout France. (2013). *Tableau de bord des investissements touristiques : Actualisation à 2012 et prévisions 2013*. Atout France.
- Atout France. (2015). *Tourisme hivernal des stations de montagne : Offre, demande et évolutions récentes* (p. p.89). Atout France.

- Atout France. (2016). *Tableau de bord des investissements touristiques : Actualisation à 2015 et prévisions 2016 (10e édition)*. Atout France.
- Atout France. (2018). *Les investissements touristiques en France : Tendances, projets et chiffres clés 2017-2018*. Atout France.
- Badré, M., Prime, J.-L., & Ribiere, G. (2009). *Neige de culture : Etat des lieux et impacts environnementaux - Note socio-économique*. (La Défense, p. 152). Conseil général de l'environnement et du développement durable. <https://www.vie-publique.fr/rapport/30692-neige-de-culture-etat-des-lieux-et-impacts-environnementaux>
- Barry, J. (2016). Bio-fuelling the Hummer? : Transdisciplinary thoughts on techno-optimism and innovation in the transition from unsustainability. In E. Byrne, G. Mullally, & C. Sage (Éds.), *Transdisciplinary Perspectives on Transitions to Sustainability*. Routledge.
- Bazeley, P. (2013). *Qualitative data analysis with NVivo (2nd ed.)*. SAGE Publications Ltd.
- Beaudin, L., & Huang, J.-C. (2014). Weather conditions and outdoor recreation : A study of New England ski areas. *Ecological Economics*, 106, 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.07.011>
- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacona, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J.-I., Magnusson, J., Marty, C., Morán-Tejeda, E., Morin, S., Naaim, M., Provenzale, A., ... Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere : A review of its current state, trends, and future challenges. *Cryosphere*, 12(2), 759-794.
- Beniston, M., Fox, D. G., Adhikary, R., Andressen, R., Guisan, A., Holten, J., Innes, J., Maitima, J., Price, M., & Tessier, L. (1995). The impacts of climate change on mountain regions. In R. T. Watson, M. C. Zinyowera, & R. H. Moss, *Climate Change 1995 : Impacts, Adaptions, and Mitigation of Climate Change : Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report for the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, Cambridge, p. pp.191-213). <https://www.ipcc.ch/report/ar2/wg2/>
- Bensahel, L., & Donsimoni, M. (1999). *Le tourisme, facteur de développement local*. Presses universitaires de Grenoble.
- Berard-Chenu, L., Cognard, J., François, H., Morin, S., & George, E. (2020). Do changes in snow conditions have an impact on snowmaking investments in French Alps ski resorts? *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01933-w>
- Berard-Chenu, L., François, H., George, E., & Morin, S. (2021). Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2018. *The Cryosphere Discussions*, 1-28. <https://doi.org/10.5194/tc-2021-270>
- Bicknell, S., & Mcmanus, P. (2006). The Canary in the Coalmine : Australian Ski Resorts and their Response to Climate Change. *Geographical Research*, 44(4), 386-400. <https://doi.org/10.1111/j.1745-5871.2006.00409.x>
- Blundell, R., & Bond, S. (1998). Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. *Journal of Econometrics*, 87(1), 115-143.
- Bohn, D., & Bernardi, C. de. (2019). The different shades of snow—An analysis of winter tourism in European regional planning and policy documents. In U. Pröbstl-Haider, H. Richins, & S. Türk (Éds.), *Winter tourism : Trends and challenges* (p. 47-63). CABI. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20193416986>

- Bonnemains, A. (2015). *Vulnérabilité et résilience d'un modèle de développement alpin : Trajectoire territoriale des stations de sports d'hiver de haute altitude de Tarentaise*. [Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01237308/document>
- Boschma, R. (2005). Rethinking regional innovation policy. In G. Fuchs & P. Shapira (Éds.), *Rethinking Regional Innovation and Change : Path Dependency or Regional Breakthrough?* (p. 249-271). Springer. https://doi.org/10.1007/0-387-23002-5_12
- Boschma, R., Balland, P.-A., & Kogler, D. F. (2015). Relatedness and technological change in cities : The rise and fall of technological knowledge in US metropolitan areas from 1981 to 2010. *Industrial and Corporate Change*, 24(1), 223-250. <https://doi.org/10.1093/icc/dtu012>
- Boschma, R., & Frenken, K. (2006). Why is economic geography not an evolutionary science? Towards an evolutionary economic geography. *Journal of Economic Geography*, 6(3), 273-302. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbi022>
- Boschma, R., & Lambooy, J. (1999). The prospects of an adjustment policy based on collective learning in old industrial regions. *GeoJournal*, 49(4), 391-399. <https://doi.org/10.1023/A:1007144414006>
- Boschma, R., & Martin, R. (2007). Editorial : Constructing an evolutionary economic geography. *Journal of Economic Geography*, 7(5), 537-548. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbm021>
- Boulay, G., & Grandclément, A. (2019). *Introduction à la géographie économique*. Armand Colin.
- Bourdeau, P. (2008). Les défis environnementaux et culturels des stations de montagne. *Téoros. Revue de recherche en tourisme*, 27(2), 23-30.
- Bourdeau, P. (2009). De l'après-ski à l'après-tourisme, une figure de transition pour les Alpes ? Réflexions à partir du cas français. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, 97-3. <https://doi.org/10.4000/rga.1049>
- Breiling, M., Charamza, P., & Feilmayr, W. (2008). Klimasensibilität des Salzburger Wintertourismus nach Bezirken. Die Bedeutung eines Klimawandels und Strategien der Anpassung. *Schriftenreihe des Instituts für Städtebau, Landschaftsarchitektur und Entwerfen, E-260L, TU Wien*.
- Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1980). The Lagrange Multiplier Test and its Applications to Model Specification in Econometrics. *The Review of Economic Studies*, 47(1), 239-253. <https://doi.org/10.2307/2297111>
- Brouder, P., Clavé, S. A., Gill, A., & Ioannides, D. (2016). Why is tourism not an evolutionary science? Understanding the past, present and future of destination evolution. In P. Brouder, S. A. Clavé, A. Gill, & D. Ioannides (Éds.), *Tourism Destination Evolution* (p. 1-18). Routledge.
- Brouder, P., Clavé, S. A., Gill, A., Ioannides, D., Clavé, S. A., Gill, A., & Ioannides, D. (2016). *Tourism Destination Evolution*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315550749>
- Brouder, P., & Eriksson, R. H. (2013). Tourism evolution : On the synergies of tourism studies and evolutionary economic geography. *Annals of Tourism Research*, 43, 370-389. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2013.07.001>
- Bureau of Labor Statistics. (2020). *Employment Cost Index*. <https://www.bls.gov/ncs/ect/#tables>
- Bureau van Dijk. (2019). *Diane database*. <https://www.bvdinfo.com/en-gb/our-products/data/national/diane>
- Bürki, R., Elsasser, H., Abegg, B., & Koenig, U. (2005). Climate change and tourism in the Swiss alps. In *Tourism, Recreation and Climate Change* (p. 155-163).
- Butler, R. (Éd.). (2005). *The tourism area life cycle v. 1. Applications and modifications*. Channel View Publications. <http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip0513/2005015059.html>

- Butler, R. W. (1980). The Concept of a Tourist Area Cycle of Evolution : Implications for Management of Resources. *The Canadian Geographer / Le Géographe Canadien*, 24(1), 5-12. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.1980.tb00970.x>
- Campos Rodrigues, L., Freire-González, J., González Puig, A., & Puig-Ventosa, I. (2018). Climate Change Adaptation of Alpine Ski Tourism in Spain. *Climate*, 6(2), 29. <https://doi.org/10.3390/cli6020029>
- Chabert, L. (1988). L'évolution des rapports de force dans l'aménagement de la montagne pour le ski, l'exemple rhonalpin / The changing balance of power in the development of mountainous regions for skiing : The example of the Rhône-Alpes region. *Géocarrefour*, 63(4), 206-211. <https://doi.org/10.3406/geoca.1988.3375>
- Chambru, M., & De Oliveira, J.-P. (2021). Changement climatique et développement territorial en montagne : Conflictualités et enjeux communicationnels. Le cas d'une station de moyenne montagne des Alpes du Nord. *Revue française des sciences de l'information et de la communication*, 21, Article 21. <https://doi.org/10.4000/rfsic.10306>
- Charmaz, K. (2006). *Constructing grounded theory : A practical guide through qualitative analysis*. Sage.
- Chevallier, M. (1997). Les mutations du tourisme alpin. In R. Knafo (Éd.), *L'Institut de Saint-Gervais : Une recherche-action dans la montagne touristique* (Belin, p. pp.153-169).
- CIPRA. (2004). *L'enneigement artificiel dans l'arc alpin—Rapport de synthèse*. https://www.cipra.org/fr/publications/2709?set_language=fr
- Clarimont, S., & Viès, V. (2009). Le tourisme pyrénéen face au développement durable : Une intégration partielle et hésitante. *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, 97-3, Article 97-3. <https://doi.org/10.4000/rga.967>
- Clivaz, C., Crevoisier, O., Kebir, L., Nahrath, S., & Stock, M. (2014). Resort development and touristic capital of place. *Working Paper MAPS (Maison d'analyse Des Processus Sociaux) Université de Neuchâtel*, 5, 25.
- Cooper, M. G., Nolin, A. W., & Safeeq, M. (2016). Testing the recent snow drought as an analog for climate warming sensitivity of Cascades snowpacks. *Environmental Research Letters*, 11, 084009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/8/084009>
- Corbin, J., & Strauss, A. (2008). *Basics of Qualitative Research (3rd ed.) : Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*. SAGE Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781452230153>
- Cour des Comptes. (2011). *La gestion du domaine skiable en Rhône-Alpes* (p. 35) [Rapport public annuel]. https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/15_gestion_domaine_skiable_rhone_alpes.pdf
- Cour des Comptes. (2018). *Les stations de ski des Alpes du nord face au réchauffement climatique : Une vulnérabilité croissante, le besoin d'un nouveau modèle de développement* (p. 82) [Rapport public annuel]. <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2018-01/14-stations-ski-Alpes-nord-face-rechauffement-climatique-Tome-2.pdf>
- Cowan, R. (1990). Nuclear Power Reactors : A Study in Technological Lock-in. *The Journal of Economic History*, 50(3), 541-567. <https://doi.org/10.1017/S0022050700037153>
- Croissant, Y., & Millo, G. (2008). Panel data econometrics in R : The plum package. *Journal of Statistical Software*, 27(2), 1-43.

- Cuvelier, P. (1997). *L'économie des pratiques touristiques* [Thèse de doctorat]. Université Lille 1 - Sciences et technologies.
- 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. *Tourism Management*, 43, 8-21. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2014.01.009>
- Darbellay, F., Clivaz, C., Nahrath, S., & Stock, M. (2011). Approche interdisciplinaire du développement des stations touristiques. Le capital touristique comme concept opératoire. *Mondes du Tourisme*, 4, 36-48. <https://doi.org/10.4000/tourisme.543>
- David, P. A. (1985). Clio and the Economics of QWERTY. *The American Economic Review*, 75(2), 332-337.
- Dawson, J., & Scott, D. (2013). Managing for climate change in the alpine ski sector. *Tourism Management*, 35, 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2012.07.009>
- de Freitas, C. R. (2003). Tourism climatology : Evaluating environmental information for decision making and business planning in the recreation and tourism sector. *International Journal of Biometeorology*, 48(1), 45-54. <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0177-z>
- Demiroglu, O. C., Turp, M. T., Ozturk, T., & Kurnaz, M. L. (2016). Impact of Climate Change on Natural Snow Reliability, Snowmaking Capacities, and Wind Conditions of Ski Resorts in Northeast Turkey : A Dynamical Downscaling Approach. *Atmosphere*, 7(4), 1.
- Direction départementale des territoires de la Savoie. (2020). *Observatoire Neige de Culture en Savoie—Saison 2019-2020* (p. 6) [L'Observatoire de la Neige de Culture]. Direction départementale des territoires de la Savoie. http://www.observatoire.savoie.equipement-agriculture.gouv.fr/PDF/Etudes/Observatoire_NC_2019_2020.pdf
- DREAL Auvergne-Rhône-Alpes. (2019). *Production de neige de culture dans un contexte de changement climatique Cadrage régional – éléments d'aide à l'instruction et à la décision* (p. 38). Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Auvergne-Rhône-Alpes. http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/20191120-doctrine-ara-neigedeculture_post-concertation_regionale_vf.pdf
- DSF. (2017). *Indicateurs et analyses 2017*. Domaines Skiabiles de France. https://www.domaines-skiabiles.fr/smedia/filer_private/a6/bf/a6bf85fa-d342-4589-8fb3-31068bbec47e/indicateurs-et-analyses-2017.pdf
- DSF. (2018). *Nivoculteur* (Support pédagogique de Domaines Skiabiles de France, p. 195) [Support pédagogique à l'usage des candidats à l'examen CQP de Nivoculteur]. Domaine Skiabiles de France.
- DSF. (2020). *Indicateurs et analyses 2020*. Domaines Skiabiles de France. https://www.domaines-skiabiles.fr/smedia/filer_private/41/d2/41d2abea-3518-4199-a0bf-69539fea06ea/indicateurs-et-analyses-2020.pdf
- DSF, & ANMSM. (2015). *Changement climatique & Stations de montagne. Quelles conséquences ? Quelles actions?* Domaines Skiabiles de France. http://www.domaines-skiabiles.fr/fr/smedia/filer_private/5a/43/5a4327f4-118e-4869-a6fb-ec82783eab2b/changement-climatique-stations-de-montagne-quelles-consequences-quelles-actions.pdf
- DSF, Ecole du Ski français, & ANMSM. (2018). *La neige de culture—Les fondamentaux*. Domaines Skiabiles de France.

- http://www.domaines-skiables.fr/fr/smedia/filer_private/72/b2/72b2fbef-3ffb-452c-98e7-bcd957b72f07/la-neige-de-culture-cest-quoi.pdf
- Durand, Y., Giraud, G., Laternser, M., Etchevers, P., Mérindol, L., & Lesaffre, B. (2009). Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958–2005) : Climatology and Trends for Snow Cover. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(12), 2487-2512. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC1810.1>
- Elsasser, H., & Messerli, P. (2001). The Vulnerability of the Snow Industry in the Swiss Alps. *Mountain Research and Development*, 21(4), 335-339. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2001\)021\[0335:TVOTSI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2001)021[0335:TVOTSI]2.0.CO;2)
- Équipe MIT. (2002). *Tourismes 1. Lieux communs*. Belin.
- Équipe MIT. (2005). *Tourismes 2. Moments de lieux*. Belin.
- Équipe MIT. (2011). *Tourismes 3. La révolution durable*. Belin.
- Eurostat. (2008). *Les salaires et le coût de la main-d'œuvre*. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5610229/KS-CD-06-001-06-FR.PDF/1c4de88e-0ce5-4070-97b7-8737883a49bc?version=1.0>
- Eurostat. (2020). *Labour costs annual data*. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/product?code=tps00173>
- Fablet, G. (2013). Real Estate Development in the Ski Resorts of the Tarentaise Valley. Between cyclical variations and structural requirements. *Journal of Alpine Research | Revue de Géographie Alpine*, 101-3, Article 101-3. <https://doi.org/10.4000/rga.2196>
- Falk, M. (2009). Are multi-resort ski conglomerates more efficient? *Managerial and Decision Economics*, 30(8), 529-538. <https://doi.org/10.1002/mde.1470>
- Falk, M., & Lin, X. (2018). The declining dependence of ski lift operators on natural snow conditions. *Tourism Economics*, 1354816618768321. <https://doi.org/10.1177/1354816618768321>
- Falk, M., & Steiger, R. (2018). An Exploration of the Debt Ratio of Ski Lift Operators. *Sustainability*, 10(9), 2985. <https://doi.org/10.3390/su10092985>
- Falk, M., & Steiger, R. (2019). Size facilitates profitable ski lift operations. *Tourism Economics*, 1354816619868117. <https://doi.org/10.1177/1354816619868117>
- Falk, M., & Steiger, R. (2020). Size facilitates profitable ski lift operations. *Tourism Economics*, 26(7), 1197-1211. <https://doi.org/10.1177/1354816619868117>
- Falk, M., & Tveteraas, S. L. (2019). Modelling the wider effects of ski lift investments. *Empirical Economics*. <https://doi.org/10.1007/s00181-019-01626-3>
- Falk, M., & Vanat, L. (2016). Gains from investments in snowmaking facilities. *Ecological Economics*, 130, 339-349. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.003>
- Foxon, T., & Pearson, P. (2008). Overcoming barriers to innovation and diffusion of cleaner technologies : Some features of a sustainable innovation policy regime. *Journal of Cleaner Production*, 16(1, Supplement 1), S148-S161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.10.011>
- Franch, M., Martini, U., Buffa, F., & Parisi, G. (2008). 4L tourism (landscape, leisure, learning and limit) : Responding to new motivations and expectations of tourists to improve the competitiveness of Alpine destinations in a sustainable way. *Tourism Review*, 63(1), 4-14. <https://doi.org/10.1108/16605370810861008>
- François, H. (2007). *De la station ressource pour le territoire au territoire pour la station. Le cas des stations de moyenne montagne périurbaines de Grenoble* [Thèse de doctorat]. Université Grenoble Alpes.

- François, H., Carmagnola, C., George, E., Rouch, L., Berard-Chenu, L., & Morin, S. (2021, février 17). Ski : La pandémie ne permettra pas forcément de réinventer le tourisme de montagne. *The Conversation*. <http://theconversation.com/ski-la-pandemie-ne-permettra-pas-forcement-de-reinventer-le-tourisme-de-montagne-154654>
- François, 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 – Storia delle Alpi – Geschichte der Alpen*, 17, 227.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.08.005>
- François, H., Morin, S., Spandre, P., Lafaysse, M., Lejeune, Y., & 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, application aux Alpes françaises et introduction de la prise en compte des pratiques de gestion (damage et neige de culture). *La Houille Blanche*, 4, 66-84. <https://doi.org/10.1051/lhb/2016041>
- Garín-Muñoz, T., & Montero-Martín, L. F. (2007). Tourism in the Balearic Islands : A dynamic model for international demand using panel data. *Tourism Management*, 28(5), 1224-1235. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2006.09.024>
- Gauchon, C. (1997). Anciennes remontées mécaniques dans les montagnes françaises : Pour une géographie des friches touristiques (Old ski lifts and telphers in French mountains : for a geography of touristic waste lands). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 74(3), 296-310. <https://doi.org/10.3406/bagf.1997.1986>
- Gauchon, C. (2009). Les hivers sans neige et l'économie des sports d'hiver : Un phénomène récurrent, une problématique toujours renouvelée. In *Neige et glace de montagne : Reconstitution, dynamique, pratiques* (p. 193-204). Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie, n°8. <https://hal.archives-ouvertes.fr/halsde-00404054>
- Géneau de Lamarlière, I. (2013). Géographie économique. In J. Lévy & M. Lussault, *Dictionnaire de géographie et de l'espace des sociétés* (La Documentation Française, p. 320-322).
- George-Marcelpoil, E., & François, H. (2012). From creating to managing resorts. Emerging stakeholder group rationales in the Tarentaise valley. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, 100-3. <https://doi.org/10.4000/rga.1925>
- George-Marcelpoil, E., & François, H. (2016). Governance of French ski resorts : Will the historic economic development model work for the future? In H. Richins & J. S. Hull (Éds.), *Mountain tourism : Experiences, communities, environments and sustainable futures* (p. 319-330). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780644608.0319>
- George-Marcelpoil, E., François, H., Fablet, G., Bray, F., Achin, C., Torre, A., & Barré, J. B. (2012). *Atlas des stations du massif des Alpes* [François]. http://www.observatoire-stations.fr/to_download/atlas_alpes_nov2012_version-web.pdf
- Gerbaux, F., & Marcelpoil, E. (2006). Gouvernance des stations de montagne en France : Les spécificités du partenariat public-privé. *Revue de Géographie Alpine*, 94(1), 9-19. <https://doi.org/10.3406/rga.2006.2380>
- Gerbaux, M., Spandre, P., François, H., George, E., & Morin, S. (2020). Fiabilité de l'enneigement et disponibilité des ressources en eau pour la production de neige dans les domaines skiables

- du Département de l'Isère (France), en conditions climatiques actuelles et futures. *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, 108-1, Article 108-1. <https://doi.org/10.4000/rga.6724>
- Giaccone, L. (2019). *Étude de la couverture médiatique du changement climatique dans les régions de montagne* (p. 119) [Mémoire de fin d'études]. Ecole Supérieure de Journalisme de Lille. <https://drive.google.com/file/d/1rv9miWK1VbalHeXkm-bE8M4bS9Zs5gPG/view>
- GIEC, 2018. (sous press). Annexe I: Glossaire. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Robert, A. Pirani, C. Péan, S. L. Connors, M. I. Gomis, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, X. Zhou, J. Skea, P. R. Shukla, W. Moufouma-Okia, Y. Chen, E. Lonnoy, & M. Tignor, *Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté* (p. 24). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf
- GIEC, 2019. (sous press). *Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique* (p. 765). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf
- GIEC, 2019. (sous presse). Résumé à l'intention des décideurs. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, N. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer, *Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique* (p. 39). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2020/07/SROCC_SPM_fr.pdf
- Gifford, R. (2011). The dragons of inaction: Psychological barriers that limit climate change mitigation and adaptation. *American Psychologist*, 66(4), 290-302. <https://doi.org/10.1037/a0023566>
- Gill, A. M., & Williams, P. W. (2014). Mindful deviation in creating a governance path towards sustainability in resort destinations. *Tourism Geographies*, 16(4), 546-562. <https://doi.org/10.1080/14616688.2014.925964>
- Gill, A. M., & Williams, P. W. (2016). Contested pathways towards tourism-destination sustainability in Whistler, British Columbia. In P. Brouder, S. A. Clavé, A. Gill, & D. Ioannides (Éds.), *Tourism destination evolution* (p. 43). Routledge.
- Goncalves, O. (2013). Efficiency and productivity of French ski resorts. *Tourism Management*, 36, 650-657. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2012.06.008>
- Gong, H., & Hassink, R. (2019). Co-evolution in contemporary economic geography: Towards a theoretical framework. *Regional Studies*, 53(9), 1344-1355. <https://doi.org/10.1080/00343404.2018.1494824>
- Gonseth, C. (2008). *Adapting ski area operations to a warmer climate in the Swiss Alps through snowmaking investments and efficiency improvements* [Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne]. <https://infoscience.epfl.ch/record/124842>
- Gössling, H., & Hall, C. M. (2005). An Introduction to Tourism and Global Environmental Change. In *Tourism and Global Environmental Change* (p. 15-48). Routledge.
- Gössling, S., Scott, D., & Hall, C. M. (2021). Pandemics, tourism and global change: A rapid assessment of COVID-19. *Journal of Sustainable Tourism*, 29(1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/09669582.2020.1758708>

- Grabher, G. (1993). The weakness of strong ties ; The lock-in of regional development in Ruhr area. In *The embedded firm ; On the socioeconomics of industrial networks* (p. 255-277). Routledge. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10030364606/>
- Greene, W. H. (2019). *Econometric analysis* (Eighth edition.). Pearson.
- Grünewald, T., Wolfsperger, F., & Lehning, M. (2018). Snow farming : Conserving snow over the summer season. *Cryosphere*, 12(1), 385-400. <https://doi.org/10.5194/tc-12-385-2018>
- Gumuchian, H. (1976). Danielle Arnaud. —La neige empoisonnée. Bruno Cognat. —La montagne colonisée. *Revue de Géographie Alpine*, 64(2), 282-284.
- Halkier, H., Müller, D. K., Goncharova, N. A., Kiriyanova, L., Kolupanova, I. A., Yumatov, K. V., & Yakimova, N. S. (2019). Destination development in Western Siberia : Tourism governance and evolutionary economic geography. *Tourism Geographies*, 21(2), 261-283. <https://doi.org/10.1080/14616688.2018.1490808>
- Hamilton, L. C., Rohall, D. E., Brown, B. C., Hayward, G. F., & Keim, B. D. (2003). Warming winters and New Hampshire's lost ski areas : An integrated case study. *International Journal of Sociology and Social Policy*, 23(10), 52-73. <https://doi.org/10.1108/01443330310790309>
- Hanzer, F., Carmagnola, C. M., Ebner, P. P., Koch, F., Monti, F., Bavay, M., Bernhardt, M., Lafaysse, M., Lehning, M., Strasser, U., François, H., & Morin, S. (2020). Simulation of snow management in Alpine ski resorts using three different snow models. *Cold Regions Science and Technology*, 172, 102995. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.102995>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.08.003>
- Hassink, R. (2005). How to unlock regional economies from path dependency? From learning region to learning cluster. *European Planning Studies*, 13(4), 521-535. <https://doi.org/10.1080/09654310500107134>
- Hassink, R. (2010). Locked in Decline ? On the Role of Regional Lock-ins in Old Industrial Areas. In R. Boschma & R. Martin (Éds.), *The Handbook of Evolutionary Economic Geography*. Edward Elgar Publishing. <https://www.elgaronline.com/view/9781847204912.00031.xml>
- Hausman, J. A. (1978). Specification Tests in Econometrics. *Econometrica*, 46(6), 1251-1271. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/1913827>
- Hjalager, A.-M. (2015). 100 Innovations That Transformed Tourism. *Journal of Travel Research*, 54(1), 3-21. <https://doi.org/10.1177/0047287513516390>
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Käb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B., Steltzer, H., Allen, S., Arenson, L., Baneerjee, S., Barr, I., ... Zhang, Y. (2019). *High Mountain Areas* (p. 131-202). IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-414230>
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K., Engelbrecht, F., Guiot, K., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S., Thomas, A., Warren, R., Zhou, G., Halim, S., ... Zougmore, R. (2019). Chapter 3 : Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In *Global Warming of 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15518/>

- Hoffmann, V. H., Sprengel, D. C., Ziegler, A., Kolb, M., & Abegg, B. (2009). Determinants of corporate adaptation to climate change in winter tourism : An econometric analysis. *Global Environmental Change*, 19(2), 256-264. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.12.002>
- IPCC, 2021. (2021). *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf
- IPCC, 2019. (in press). Summary for Policymakers. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, N. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer, *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/>
- Joly, M., & Ungureanu, E. I. (2018). Global warming and skiing : Analysis of the future of skiing in the Aosta valley. *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, 10(2), 161-171. <https://doi.org/10.1108/WHATT-12-2017-0077>
- Keller, P. F., Terzibasoglu, E., & Stange, S. (2018). *Sustainable Mountain Tourism – Opportunities for Local Communities* (p. 156). World Tourism Organization (UNWTO). <https://doi.org/10.18111/9789284420261>
- Kingdon, J. W. (1995). *Agendas, alternatives, and public policies*. Longman.
- Kingdon, J. W., & Stano, E. (1984). *Agendas, alternatives, and public policies* (Vol. 45). Little, Brown Boston.
- Klein, G., Vitasse, Y., Rixen, C., Marty, C., & Rebetez, M. (2016). Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, 139(3), 637-649. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1806-y>
- Knafou, R. (1978). *Les stations intégrées de sports d'hiver des Alpes françaises : L'aménagement de la montagne à la « française »*. Masson.
- Knafou, R. (1987). L'évolution récente de l'économie des sports d'hiver et de l'aménagement touristique de la montagne en France. *Revue de Géographie Alpine*, 75(2), 101-114. <https://doi.org/10.3406/rga.1987.2671>
- Knafou, R. (1997). *L'Institut de Saint-Gervais : Une recherche-action dans la montagne touristique*. Belin.
- Knowles, N. L. B., & Scott, D. (2020). Media representations of climate change risk to ski tourism : A barrier to climate action? *Current Issues in Tourism*, 0(0), 1-8. <https://doi.org/10.1080/13683500.2020.1722077>
- Köberl, J., François, H., Cognard, J., Carmagnola, C., Prettenhaler, F., Damm, A., & Morin, S. (2021). The demand side of climate services for real-time snow management in Alpine ski resorts : Some empirical insights and implications for climate services development. *Climate Services*, 22, 100238. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100238>
- Krugman, P. (1991). Increasing Returns and Economic Geography. *The Journal of Political Economy*, 99(3), 483-499. <https://doi.org/10.1086/261763>
- Larique, B. (2006). Les sports d'hiver en France : Un développement conflictuel ? *Flux*, n° 63-64(1), 7-19.
- Lawson, T. (1997). *Economics and Reality*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203195390>
- Lévy, J., & Lussault, M. (2013). *Dictionnaire de géographie et de l'espace des sociétés* (p. 1137 p.). La Documentation Française. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01252959>

- Liebowitz, S. J., & Margolis, S. E. (1995). Path Dependence, Lock-in, and History. *Journal of Law, Economics, & Organization*, 11(1), 205-226.
- Lorit, J.-F., Aymeric, M., & Dalmas, D. (1990). *Les difficultés financières des communes stations de sports d'hiver* (p. 63) [Inspection générale de l'administration]. Ministère de l'intérieur.
- Lucas, R. E. (1988). On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22(1), 3-42. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7)
- Luthe, T. (2009). *Vulnerability to global change and sustainable adaptation of ski tourism –SkiSustain*.
- Luthe, T., Wyss, R., & Schuckert, M. (2012). Network governance and regional resilience to climate change : Empirical evidence from mountain tourism communities in the Swiss Gotthard region. *Regional Environmental Change*, 12(4), 839-854.
<https://doi.org/10.1007/s10113-012-0294-5>
- Ma, M., & Hassink, R. (2013). An evolutionary perspective on tourism area development. *Annals of Tourism Research*, 41, 89-109. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2012.12.004>
- MacKinnon, D., Cumbers, A., Pike, A., Birch, K., & McMaster, R. (2009). Evolution in Economic Geography : Institutions, Political Economy, and Adaptation. *Economic Geography*, 85(2), 129-150. <https://doi.org/10.1111/j.1944-8287.2009.01017.x>
- MacKinnon, D., Dawley, S., Pike, A., & Cumbers, A. (2019). Rethinking Path Creation : A Geographical Political Economy Approach. *Economic Geography*, 95(2), 113-135.
<https://doi.org/10.1080/00130095.2018.1498294>
- Magnier, E. (2013). *Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne : Impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse)* [Thèse, Université Paris-Sorbonne - Paris IV ; Université de Lausanne].
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00922929>
- Magrini, M.-B., Anton, M., Cholez, C., Corre-Hellou, G., Duc, G., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Pelzer, E., Voisin, A.-S., & Walrand, S. (2016). Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system. *Ecological Economics*, 126, 152-162.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.024>
- Marcelpoil, E., & François, H. (2009). Real Estate : A Complex Factor in the Attractiveness of French Mountain Resorts. *Tourism Geographies*. <https://doi.org/10.1080/14616680903053326>
- 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(1), 261-277.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0035.1>
- Marke, T., Strasser, U., Hanzer, F., Stötter, J., Wilcke, R. A. I., & Gobiet, A. (2015). Scenarios of Future Snow Conditions in Styria (Austrian Alps). *Journal of Hydrometeorology*, 16(1), 261-277.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0035.1>
- Martin, E., Brun, E., & Durand, Y. (1994). Sensitivity of the French Alps snow cover to the variation of climatic variables. *Annales Geophysicae*, 12(5), 469-477.
<https://doi.org/10.1007/s00585-994-0469-6>
- Martin, R., & Sunley, P. (2006). Path dependence and regional economic evolution. *Journal of Economic Geography*, 6(4), 395-437. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbl012>
- Martin, R., & Sunley, P. (2015). Towards a Developmental Turn in Evolutionary Economic Geography? *Regional Studies*, 49(5), 712-732. <https://doi.org/10.1080/00343404.2014.899431>

- Martin, S., Mainguy, J., & de Saintignon, M.-F. (1990). Neige à Noël et potentialités de production de neige de culture dans les Préalpes françaises du Nord : Un problème de risque climatique, un exemple de démarche opérationnelle. *L'Espace géographique*, 19/20(3), 255-272.
- Marty, C., Tilg, A.-M., & Jonas, T. (2017). Recent Evidence of Large-Scale Receding Snow Water Equivalents in the European Alps. *Journal of Hydrometeorology*, 18(4), 1021-1031. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0188.1>
- Massart, C., Emmanuelle, G., Bourdeau, P., Granet-Abisset, A.-M., & Gauchon, C. (2021). *Winter sports resorts' strategies to adapt to climate change*. Peter Lang. <https://doi.org/10.3726/b17108>
- Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C. M., Marty, C., Morin, S., Schöner, W., Cat Berro, D., Chiogna, G., De Gregorio, L., Kotlarski, S., Majone, B., Resch, G., Terzago, S., Valt, M., Beozzo, W., Cianfarra, P., Gouttevin, I., Marcolini, G., ... Weilguni, V. (2021). Observed snow depth trends in the European Alps : 1971 to 2019. *The Cryosphere*, 15(3), 1343-1382. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>
- Mayer, M. (2009). Innovation as a Success Factor in Tourism : Empirical Evidence from Western Austrian Cable-Car Companies. *Erdkunde*, 63(2), 123-139. JSTOR.
- Mayer, M., Steiger, R., & Trawöger, L. (2007). Technischer Schnee rieselt vom touristischen Machbarkeitshimmel – Schneesicherheit und technische Beschneigung in westösterreichischen Skidestinationen vor dem Hintergrund klimatischer Wandlungsprozesse. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, 149, 157-180.
- Ménégoz, M., Valla, E., Jourdain, N. C., Blanchet, J., Beaumet, J., Wilhelm, B., Gallée, H., Fettweis, X., Morin, S., & Anquetin, S. (2020). Contrasting seasonal changes in total and intense precipitation in the European Alps from 1903 to 2010. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11), 5355-5377. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5355-2020>
- Merriam, S. B., & Tisdell, E. J. (2016). *Qualitative research : A guide to design and implementation* (Fourth edition.). Jossey-Bass, a Wiley Brand.
- Morin, S., Samacoïts, R., François, H., Carmagnola, C. M., Abegg, B., Demiroglu, O. C., Pons, M., Soubeyroux, J.-M., Lafaysse, M., Franklin, S., Griffiths, G., Kite, D., Hoppler, A. A., George, E., Buontempo, C., Almond, S., Dubois, G., & Cauchy, A. (2021). Pan-European meteorological and snow indicators of climate change impact on ski tourism. *Climate Services*, 22, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100215>
- Morrison, C., & Pickering, C. M. (2013). Perceptions of climate change impacts, adaptation and limits to adaption in the Australian Alps : The ski-tourism industry and key stakeholders. *Journal of Sustainable Tourism*, 21(2), 173-191. <https://doi.org/10.1080/09669582.2012.681789>
- Mote, P. W., Li, S., Lettenmaier, D. P., Xiao, M., & Engel, R. (2018). Dramatic declines in snowpack in the western US. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0012-1>
- Müller, D. K. (2019). An Evolutionary Economic Geography Perspective on Tourism Development in a Remote Ski Resort : The Case of Tarnaby/Hemavan in the Swedish Mountains. In R. L. Koster & D. A. Carson (Éds.), *Perspectives on Rural Tourism Geographies : Case Studies from Developed Nations on the Exotic, the Fringe and the Boring Bits in Between* (p. 137-157). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11950-8_8

Bibliographie

- Njøs, R., Sjøtun, S. G., Jakobsen, S.-E., & Fløysand, A. (2020). Expanding Analyses of Path Creation : Interconnections between Territory and Technology. *Economic Geography*, 96(3), 266-288. <https://doi.org/10.1080/00130095.2020.1756768>
- Olefs, M., Fischer, A., & Lang, J. (2010). Boundary Conditions for Artificial Snow Production in the Austrian Alps. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6), 1096-1113. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2251.1>
- Paccard, P. (2010). *Gestion durable de l'eau en montagne : Le cas de la production de neige en stations de sports d'hiver*. [Thèse de doctorat, Université de Savoie]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00572604/document>
- Papatheodorou, A. (2004). Exploring the evolution of tourism resorts. *Annals of Tourism Research*, 31(1), 219-237. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2003.10.004>
- Pechlaner, H., & Tschurtschenthaler, P. (2003). Tourism Policy, Tourism Organisations and Change Management in Alpine Regions and Destinations : A European Perspective. *Current Issues in Tourism*, 6(6), 508-539. <https://doi.org/10.1080/13683500308667967>
- Pentland, B. T., & Rueter, H. H. (1994). Organizational Routines as Grammars of Action. *Administrative Science Quarterly*, 39(3), 484-510. <https://doi.org/10.2307/2393300>
- Perret, J. (1993). *Le développement touristique local, les stations de sports d'hiver*. CEMAGREF. <http://ark.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3326420v>
- Pike, A., MacKinnon, D., Cumbers, A., Dawley, S., & McMaster, R. (2016). Doing Evolution in Economic Geography. *Economic Geography*, 92(2), 123-144. <https://doi.org/10.1080/00130095.2015.1108830>
- Polimeni, J. M., & Polimeni, R. I. (2006). Jevons' Paradox and the myth of technological liberation. *Ecological Complexity*, 3(4), 344-353. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2007.02.008>
- 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(4), 591-605. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1400-8>
- Pons-Pons, M., Johnson, P. A., Rosas-Casals, M., Sureda, B., & Jover, È. (2012). Modeling climate change effects on winter ski tourism in Andorra. *Climate Research*, 54(3), 197-207. <https://doi.org/10.3354/cr01117>
- Préau, P. (1968). Essai d'une typologie des stations de sports d'hiver dans les Alpes du Nord. *Revue de Géographie Alpine*, 56(56), 127-140. <https://doi.org/10.3406/rga.1968.3571>
- Pröbstl-Haider, U. (2019). Winter Tourism in the Alps and the Implications of Climate Change. In U. Pröbstl-Haider, H. Richens, & S. Türk (Éds.), *Winter Tourism : Trends and Challenges* (CABI, Vol. 1-64-72). CABI. <https://www.cabi.org/bookshop/book/9781786395207/>
- Pröbstl-Haider, U., Richens, H., & Türk, S. (2019). *Winter Tourism : Trends and Challenges* (CABI). CABI. <https://www.cabi.org/bookshop/book/9781786395207/>
- Roodman, D. (2009). A Note on the Theme of Too Many Instruments*. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 71(1), 135-158. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2008.00542.x>
- Sanz-Ibáñez, C., & Clavé, S. A. (2014). The evolution of destinations : Towards an evolutionary and relational economic geography approach. *Tourism Geographies*, 16(4), 563-579. <https://doi.org/10.1080/14616688.2014.925965>
- Savoie-Mont-Blanc Tourisme. (2020). *Les chiffres clés* (p. 72). Observatoire du tourisme Savoie-Mont-Blanc Tourisme. https://pro.savoie-mont-blanc.com/var/ezwebin_site/storage/original/application/75f9465d8cb7c4462bfdb00d4d6ce1aa.pdf

- Schamp, E. W. (2010). On the notion of co-evolution in economic geography. In R. Boschma & R. Martin (Éds.), *The handbook of evolutionary economic geography*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781849806497>
- Schipper, E. L. F. (2020). Maladaptation : When Adaptation to Climate Change Goes Very Wrong. *One Earth*, 3(4), 409-414. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.09.014>
- Scott, D., Gössling, S., & Hall, C. M. (2012). International tourism and climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 3(3), 213-232. <https://doi.org/10.1002/wcc.165>
- Scott, D., & McBoyle, G. (2006). Climate change adaptation in the ski industry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(8), 1411. <https://doi.org/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(2), 171-181.
- Scott, D., Steiger, R., Dannevig, H., & Aall, C. (2020b). Climate change and the future of the Norwegian alpine ski industry. *Current Issues in Tourism*, 23(19), 2396-2409. <https://doi.org/10.1080/13683500.2019.1608919>
- Scott, D., Steiger, R., Knowles, N., & Fang, Y. (2020a). Regional ski tourism risk to climate change : An inter-comparison of Eastern Canada and US Northeast markets. *Journal of Sustainable Tourism*, 28(4), 568-586. <https://doi.org/10.1080/09669582.2019.1684932>
- Scott, D., Steiger, R., Rutt, M., Pons, M., & Johnson, P. (2019). The differential futures of ski tourism in Ontario (Canada) under climate change : The limits of snowmaking adaptation. *Current Issues in Tourism*, 22(11), 1327-1342. <https://doi.org/10.1080/13683500.2017.1401984>
- Scott, D., Steiger, R., Rutt, M., Pons, M., & Johnson, P. (2020c). Climate Change and Ski Tourism Sustainability : An Integrated Model of the Adaptive Dynamics between Ski Area Operations and Skier Demand. *Sustainability*, 12(24), 10617. <https://doi.org/10.3390/su122410617>
- SEATM. (1989). *Neige de culture – Guide d'aide à la décision* (p. 176). Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de la Mer.
- Setterfield, M. (1997). *Rapid growth and relative decline : Modelling macroeconomic dynamics with hysteresis*. Macmillan.
- Simmie, J., & Martin, R. (2010). The economic resilience of regions : Towards an evolutionary approach. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 3(1), 27-43. <https://doi.org/10.1093/cjres/rsp029>
- Spandre, P. (2016). *Observation et modélisation des interactions entre conditions d'enneigement et activité des stations de sports d'hiver dans les Alpes françaises* [Thèse de doctorat]. Université Grenoble Alpes.
- 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*, 16, 24-36. <https://doi.org/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*, 103-2. <https://doi.org/10.4000/rga.2913>
- Spandre, P., François, H., Thibert, E., Morin, S., & George-Marcelpoil, E. (2017). Determination of snowmaking efficiency on a ski slope from observations and modelling of snowmaking events and seasonal snow accumulation. *The Cryosphere*, 11(2), 891-909. <https://doi.org/10.5194/tc-11-891-2017>

- Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., George, E., & Morin, S. (2019a). Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts. *Scientific Reports*, 9(1), 8043. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44068-8>
- Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Lafaysse, M., George, E., & Morin, S. (2018). *Modelling the impact of future climate change on operating conditions of ski resorts in the French Alps*. 20, 14701. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..2014701S>
- Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Pons, M., Vernay, M., Lafaysse, M., George, E., & Morin, S. (2019b). Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps : Relevance of snowmaking as a technical adaptation. *The Cryosphere*, 13(4), 1325-1347. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1325-2019>
- Spandre, P., Morin, S., Lafaysse, M., Lejeune, Y., François, H., & George-Marcelpoil, E. (2016b). Integration of snow management processes into a detailed snowpack model. *Cold Regions Science and Technology*, 125, 48-64. <https://doi.org/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(3), 251-262. <https://doi.org/10.3354/cr00941>
- Steiger, R., & Mayer, M. (2008). Snowmaking and Climate Change. *Mountain Research and Development*, 28(3), 292-298. <https://doi.org/10.1659/mrd.0978>
- Steiger, R., & Scott, D. (2020). Ski tourism in a warmer world : Increased adaptation and regional economic impacts in Austria. *Tourism Management*, 77, 104032. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2019.104032>
- Steiger, R., Scott, D., Abegg, B., Pons, M., & Aall, C. (2019). A critical review of climate change risk for ski tourism. *Current Issues in Tourism*, 22(11), 1343-1379. <https://doi.org/10.1080/13683500.2017.1410110>
- Steiger, R., & Stötter, J. (2013). Climate Change Impact Assessment of Ski Tourism in Tyrol. *Tourism Geographies*, 15(4), 577-600. <https://doi.org/10.1080/14616688.2012.762539>
- Stern, N. (2007). *Stern Review on the economics of climate change*. Cambridge University Press.
- Stock, M., Coëffé, V., & Violier, P. (2020). *Les enjeux contemporains du tourisme : Une approche géographique* (Nouvelle édition revue). Presses universitaires de Rennes.
- Syndicat National des Téléphériques de France. (2002). *Neige de culture : Le savoir et la production* (p. 138).
- Tang, C.-H. (Hugo), & Jang, S. (Shawn). (2011). Weather risk management in ski resorts : Financial hedging and geographical diversification. *International Journal of Hospitality Management*, 30(2), 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2010.09.012>
- Töglhofer, C., Eigner, F., & Prettenhaler, F. (2011). Impacts of snow conditions on tourism demand in Austrian ski areas. *Climate Research*, 46(1), 1-14. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2013.07.010>
- Tuppen, J. (2000). The restructuring of winter sports resorts in the French Alps : Problems, processes and policies. *International Journal of Tourism Research*, 2(5), 327-344. [https://doi.org/10.1002/1522-1970\(200009/10\)2:5<327::AID-JTR229>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1522-1970(200009/10)2:5<327::AID-JTR229>3.0.CO;2-Y)
- Uhaldeborde, J. M. (2007). Le tourisme durable de montagne sous le prisme du financement des petites communes. In *Tourisme durable en montagne : Entre discours et pratiques* (Vol. 5603). AFNOR.

- Vanat, L. (2018). *2018 International Report on Snow & Mountain Tourism* (N° 10th; p. 211). Laurent Vanat Consulting. <https://www.vanat.ch/RM-world-report-2018-FR.pdf>
- Vanat, L. (2019). *2019 International report on snow & Mountain tourism*. Laurent Vanat Consulting.
- Vanat, L. (2020). *2020 International Report on Snow & Mountain Tourism*. Laurent Vanat Consulting. www.vanat.ch/RM-world-report-2020.pdf
- Vanloqueren, G., & Baret, P. V. (2009). How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. *Research Policy*, 38(6), 971-983. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2009.02.008>
- Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., & Morin, S. (2018). Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps. *The Cryosphere*, 12(4), 1249-1271. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018>
- Vernay, M., Lafaysse, M., Hagenmuller, P., Nheili, R., Verfaillie, D., & Morin, S. (2019). *The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958—Present) [Data set]*. AERIS. <https://doi.org/10.25326/37>
- Vernay, M., Lafaysse, M., Monteiro, D., Hagenmuller, P., Nheili, R., Samacoïts, R., Verfaillie, D., & Morin, S. (2021). The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas, description and evaluation (1958–2020). *Earth System Science Data Discussions*, 1-36. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-249>
- Veyret-Verner, G. (1959). La deuxième révolution économique et démographique des Alpes du Nord : Les « sports d'hiver. Réflexions et suggestions ». *Revue de Géographie Alpine*, 47(3), 293-305. <https://doi.org/10.3406/rga.1959.1927>
- Villieu, P. (2019). *Macroéconomie : L'investissement* (3e éd.). La Découverte. <https://doi.org/10.3917/dec.villi.2019.01>
- Vionnet, V., Brun, E., Morin, S., Boone, A., Faroux, S., Le Moigne, P., Martin, E., & Willemet, J.-M. (2012). The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2. *Geoscientific Model Development*, 5(3), 773-791. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-773-2012>
- Vlès, V. (2019). Des territoires touristiques aux abords du point vertigineux. In G. Carrère, C. Dumat, & M.-C. Zelem (Éds.), *Dans la fabrique des transitions écologiques Permanence et changements* (p. 75-98). L'Harmattan. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03137623>
- Vlès, V. (1996). *Les stations touristiques*. Economica.
- Williams, S. (2014). *Tourism geography : Critical understandings of place, space and experience* (3rd edition). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203743881>
- Wilson, G., Green, M., & Mack, K. (2018). Historical Climate Warming in the White Mountains of New Hampshire (USA) : Implications for Snowmaking Water Needs at Ski Areas. *Mountain Research and Development*, 38(2), 164-171. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-17-00117>
- Wolff, F.-C. (2014). Lift ticket prices and quality in French ski resorts : Insights from a non-parametric analysis. *European Journal of Operational Research*, 237(3), 1155-1164. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.062>
- Wooldridge, J. M. (2016). *Introductory econometrics : A modern approach* (Sixth edition). Cengage Learning.
- Woolf, N. H., & Silver, C. (2017). *Qualitative analysis using NVivo : The Five-Level QDA method* (1st éd.). Routledge.

Bibliographie

Zhu, S., He, C., & Zhou, Y. (2017). How to jump further and catch up? Path-breaking in an uneven industry space. *Journal of Economic Geography*, 17(3), 521-545.
<https://doi.org/10.1093/jeg/lbw047>

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Nombre d'articles dans la presse nationale s'intéressant à la production de neige entre 1993 et 2019 (élaboration L. Bérard-Chenu).....	9
Figure 2. Distribution of investments over the 2005–2016 period, for the 5 main types of investment: new ski lift, ski lift maintenance, snowmaking, ticketing, and ski slope remodeling. Results are provided as a function of (a) ski resort size and (b) the mean elevation of the ski resort (by steps of 300 m).....	46
Figure 3. Evolutions of annual investments in snowmaking by ski resort size groups over the 1997–2014 period	48
Figure 4. Within-year relative standard deviations of snowmaking investments, for various ski resort size categories (1997–2014)	49
Figure 5. Overall interquartile ranges of snowmaking investments and natural snow reliability index regarding ski resort size	50
Figure 6. Interquartile ranges of snowmaking investments and snow reliability index according to ski resort size (1997–2014).....	50
Figure 7. Schematic description of the method	70
Figure 8. Evolution of the snowmaking coverage rate over 1997-2018 for the 16 ski resorts in Savoie with the linear model. Colours represent individual ski resorts, anonymized and ordered as a function of decreasing fraction of the domain below 2000 m.	71
Figure 9. Time evolution of the combined snow reliability indicator and snowmaking fractional coverage for two contrasting very large ski resorts (ski resort #6 has 65% of its ski area below 2000m, 39% for ski resort #12) in Savoie from 1961 to 2018. The top row represents the time variations of the indicator for several snow management options (grooming only, snowmaking coverage corresponding to Badré et al.,2009 - mean value for al French ski resorts, individual evolution of the snowmaking coverage based on investment figures, and situation corresponding to using the snowmaking coverage in 2018 for the whole time period). The bottom row indicates the corresponding snowmaking fraction coverage. The last row represents the increase in snow cover reliability compared to the grooming only situation. The ski resort #6 shows a higher-than-average snowmaking equipment, while the ski resort #12 shows a lower-than-average snowmaking equipment.	72
Figure 10. Relationship between the combined snow cover reliability difference (y-axis) between configurations with snowmaking and the snow cover reliability with grooming only (no snowmaking, x-axis), for two contrasting ski resorts.....	73
Figure 11. Time evolution of the combined snow reliability indicator and snowmaking fractional coverage for ski resort #04 (medium size, 83% of its surface area below 2000 m elevation) from 1961 to 2018. The left column represents the time variations of the indicator for several snow management options (grooming only,	

individual evolution of the snowmaking coverage based on investment figures, and the situation corresponding to using the snowmaking coverage in 2018 for the whole time period). The right column represents the increase in snow cover reliability compared to the grooming only situation (taking into account the evolution in snowmaking coverage since 1997 or using the fractional coverage for 2018 throughout the entire record). Each row corresponds to a monthly snow reliability indicator: December to March.74

Figure 12. Similar to Figure 11 but for ski resort #14 (very large ski resorts, 30% of the surface area below 2000 m elevation).....75

Figure 13. Relationship between the monthly (December, January, February and March), from top to bottom) snow cover reliability difference (y-axis) between configurations with snowmaking and the snow cover reliability with grooming only (no snowmaking, x-axis), for two contrasting very large ski resorts and for the time period from 1961 to 2018, on the left with below average snowmaking coverage, and on the right with above-average snowmaking coverage.....76

Figure 14. Frequency of occurrence of monthly snow reliability challenging conditions, between 1991 and 2018, below the reference Q20 value for the time period 1961-1990, without snowmaking throughout the entire time period. Each row corresponds to a ski resort (ranked as a function of decreasing fraction of the domain below 2000 m). Each column corresponds to a monthly reliability indicator. The values in the matrix correspond to the Q20 reference snow reliability indicator. Red cells correspond to larger frequencies during 1991-2018 than during the reference time period (more often challenging conditions), and vice versa in blue.78

Figure 15. Same as Figure 14 but for the snowmaking coverage of 2018 throughout the entire period from 1961 to 2018 (including for the reference time period 1961-1990).79

Figure 16. Same as Figure 14 and Figure 15 but with a snowmaking coverage variable in time for each ski resort.....80

Figure 17. Schéma des effets de dépendance au sentier et de verrouillage liés à la production de neige sur l'offre de l'industrie des sports d'hiver93

Figure 18. Sketch maps of the study area98

Figure 19. The affiliation and investments in snowmaking since 2000 of Savoie's ski resorts.99

Figure 20. Background and position held by interviewees from the core sample (n=30). Each row corresponds to a position in the ski lift company and each column corresponds to an educational background mentioned by interviewees. The values and colours in the matrix correspond to the number of interviewees [Author's elaboration]102

Figure 21. Evolution of snowmaking-related investments for the 20 largest ski resorts in Savoie for the time period 1997-2018.[Author's elaboration].....106

Figure 22. Pictures of the development of snowmaking closely linked with accommodation in ski resorts from Savoie. (Source: author's elaboration).....	107
Figure 23. Schematic diagram of path dependence and lock-in effects of snowmaking technology on the supply side of the ski tourism industry	110
Figure 24. Evolution des investissements en production de neige (1997-2019) et des subventions régionales accordées entre 2016 et 2019 dans les Alpes françaises	120
Figure 25. La dynamique de la production de neige dans les domaines skiables des Alpes françaises au croisement de trois influences: déterminants physiques, spécificités géographiques et tendances générales de l'industrie des sports d'hiver.	130

LISTE DES TABLES

Table 1. Différences sémantiques concernant la production de neige entre le discours des acteurs du tourisme hivernal (à gauche) et celui des associations de protection de la nature et de l'environnement (à droite).....	10
Table 2. Extraits des remarques formulées par les Etats à l'égard de la production de neige à l'occasion de leurs relectures de la dernière version préalable à l'approbation du résumé à l'intention des décideurs du rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique (SROCC) du GIEC [notre traduction]	13
Table 3. Ski resort categories by ski lift power	41
Table 4. Average answer rate to Montagne Leaders snowmaking survey for ski resorts in the French Alps (1997–2014)	42
Table 5. Capital intensity ratio by the tourism industry sector in France (2009–2016)	44
Table 6. Descriptive statistics about investments 2005–2016 (12 years) as a function of ski resort size.....	45
Table 7. Descriptive statistics of snowmaking investments and natural snow reliability index regarding ski resort size	49
Table 8. Impacts of prior year snow reliability on snowmaking investments on the larger ski resorts sample (L and XL).....	51
Table 9. Impacts of prior year snow reliability on snowmaking investment on the smaller ski resorts sample (S and M)	51
Table 10. Snowmaking investment cost to equip ski slopes area.....	66
Table 11. Overview of interviewees from our 2 samples	101
Table 12. Ouverture d'une fenêtre d'opportunité politique concernant la production de neige à l'échelle de la région Auvergne-Rhône-Alpes.	122
Table 13. Mentions d'un retard français vis-à-vis de la concurrence européenne concernant l'équipement en production de neige en fonction des groupes d'interviewés	123
Table 14. Revue de presse d'articles mentionnant la production de neige dans la presse nationale française entre 1993 et 2019 selon la base de données en ligne Europresse	132
Table 15. Commentaires réalisés concernant la production de neige par les gouvernements sur le projet final de résumé à l'intention des décideurs du rapport SROCC.	135

Table 16. List of ski resorts from collection B with within-ski resort deviations of natural snow reliability index and snowmaking investment based on an 18-year period (1997–2014)	137
Table 17. List of participants interviewed with their group affiliation and position held	141
Table 18. Semi-structured interview guide for our core sample (CS)	143
Table 19. Résumé des projets ayant reçus des subventions de la part de la Région Auvergne-Rhône-Alpes entre 2016 et 2019	144
Table 20. Liste des différentes personnes interviewées.....	144

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	1
ABBREVIATIONS.....	3
PREAMBULE	4
INTRODUCTION	5
CHAPITRE I ETAT DE LA LITTERATURE & METHODOLOGIE DE RECHERCHE	7
I. La production de neige, enjeu de société.....	8
1. Un sujet de débat public	9
2. Une pratique ancienne pour les opérateurs de domaines skiables.....	11
3. Positions des organismes et pouvoirs publics à l'égard de la production de neige.....	12
II. Etat de la littérature scientifique	16
1. Lieux touristiques et trajectoire d'évolution	16
2. Evolutions de l'industrie française des sports d'hiver.....	18
3. La production de neige comme adaptation au changement climatique	20
4. Modélisation des spécificités des domaines skiables dans les études d'impacts du changement climatique et limites rencontrées	21
5. Logiques d'investissement dans la production de neige dans l'industrie du ski.....	22
III. Problématique de recherche	25
IV. Méthodologie de recherche : le choix d'une méthode mixte.....	25
1. Collecte et traitement de données extensives	25
2. Collecte et traitement de données intensives	27
V. Structuration du travail de thèse.....	27
CHAPITRE II L'EVOLUTION DES CONDITIONS D'ENNEIGEMENT A-T-ELLE UN IMPACT SUR LES INVESTISSEMENTS EN MATIERE D'ENNEIGEMENT DANS LES STATIONS DE SKI DES ALPES FRANÇAISES ?	29
I. Résumé long en français	31
1. Résumé.....	31
2. Introduction	31
3. Revue de littérature et hypothèses de recherche	31
4. Matériel et méthode	32

5. Résultats	34
6. Discussion.....	35
II. Do changes in snow conditions have an impact on snowmaking investments in French Alps ski resorts?	36
1. Abstract.....	36
2. Introduction	36
3. Conceptual background and development of assumptions.....	38
4. Materials and methods.....	40
5. Results	44
6. Discussion.....	52
7. Acknowledgements.....	55
CHAPITRE III ÉVOLUTION PASSEE DE LA FIABILITE DE L'ENNEIGEMENT NATUREL ET GERE DES STATIONS DE SKI DES ALPES FRANÇAISES DE 1961 A 2018	56
I. Résumé long en français	58
1. Résumé.....	58
2. Introduction	58
3. Matériel et méthode	59
4. Résultats	60
5. Discussion.....	61
6. Conclusions et perspectives	62
II. Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2018.....	63
1. Abstract.....	63
2. Introduction	63
3. Material and methods	65
4. Results	70
5. Discussion.....	80
6. Conclusions and perspectives	85
CHAPITRE IV DEPENDANCE AU SENTIER ET EFFETS DE VERROUILLAGE DANS L'INDUSTRIE DES SPORTS D'HIVER: ETUDE DE CAS DE LA PRODUCTION DE NEIGE DANS LES ALPES FRANÇAISES	87
I. Résumé long en français	89
1. Résumé.....	89
2. Introduction	89

3. Revue de littérature.....	89
4. Méthode et données utilisées	90
5. Résultats	91
6. Discussion et conclusion.....	92
II. Path dependence and lock-in effects in the ski tourism industry: a case study for snowmaking in the French Alps	94
1. Abstract.....	94
2. Introduction	94
3. Conceptual background	95
4. Material and method	98
5. Results.....	102
6. Discussion and conclusion.....	108
CHAPITRE V EQUIPEMENTS POUR LA PRODUCTION DE NEIGE DANS LES STATIONS DE SPORTS D'HIVER : ENTRE POLITIQUES DE SOUTIEN REGIONALES ET DECLINAISONS TERRITORIALES	112
1. Résumé.....	114
2. Introduction	114
3. Positionnement et cadre méthodologique.....	115
4. Résultats	117
5. Conclusion	123
ENJEUX ET CONCLUSION DE RECHERCHE.....	125
I. Enjeux et contributions du travail de recherche	125
II. Résumés des principaux résultats.....	127
1. Les conditions d'enneigement, déterminantes pour l'investissement dans la production de neige des plus petits domaines skiables	127
2. De fortes disparités d'équipement en production de neige observées entre domaines skiables	127
3. Production de neige, entre standardisation de l'usage et adaptation aux contextes locaux .	128
4. Les dynamiques de la production de neige, au croisement de trois tendances dans les territoires touristiques de montagne	129
ANNEXES	131
I. Annexes Chapitre I.....	132
II. Annexes Chapitre II.....	137
III. Annexes Chapitre IV.....	141
IV. Annexes Chapitre V.....	144

BIBLIOGRAPHIE	146
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	163
LISTE DES TABLES.....	166
TABLE DES MATIERES.....	168

ABSTRACT

The tourism sector, including the ski tourism industry, is a key economic activity for many mountain regions. The ski tourism industry is at the centre of social, economic, environmental and climate issues. The vulnerability of ski tourism to the variability of snow cover and its reduction due to climate change are part of the climate vulnerability of mountain tourism areas. Snowmaking technology has been deployed in the French Alps for over 30 years now and is the most widely used adaptive response to climate vulnerability. This practice raises many concerns regarding both its economic and environmental relevance in a medium to long-term perspective. Its capacity to decisively steer the future development of mountain tourism regions is a key issue.

To understand how the dynamics of snowmaking investments can influence the development of mountain regions, this work has sought to identify two key components. First, the plurality of determinants involved in snowmaking investments. Our analysis takes into account both physical and technical-economic factors that participate in the dynamic of snowmaking growth.

We carried out a situational analysis of snowmaking investments in over 100 ski resorts in the French Alps. We underlined that snowmaking plays a crucial role in a capital-intensive sector. Econometric modelling revealed that investment strategies in snowmaking in larger ski resorts were beyond natural snow conditions. We integrated the investment figures into a growth model to infer the evolution of the part of ski slopes equipped with snowmaking facilities at the scale of individual ski areas. We crossed that modelling with a snowpack model and assessed the gains in snow reliability reached with snowmaking.

We based part of our thesis research on a theoretical framework from evolutionary economic geography and the notion of path dependency. Based on more than 50 semi-directed interviews of stakeholders, we have highlighted how the diffusion of snowmaking has modified the ski industry. In particular, we have stressed the self-reinforcing and lock-in mechanisms involving both ski lift operators and a broad range of stakeholders in the winter sports economy: snowmaking system providers, local institutions, tour-operators and real estate promoters. Our approach allows a better understanding of the mechanisms happening in the ski industry in the context of transition to a less winter tourism dependent economy in mountain regions.

Keywords: economic geography, French Alps, path dependence, ski tourism, snowmaking, climate change



RESUME

Le tourisme des sports d'hiver est une activité économique structurante pour de nombreux territoires de montagne. La variabilité de l'enneigement et sa diminution liée au changement climatique sont des d'éléments de vulnérabilité climatique pour les territoires touristiques de montagne. La technologie de la production de neige développée dans les Alpes françaises depuis plus de 30 ans est considérée comme une réponse adaptative face aux enjeux du changement climatique. Cette pratique soulève de multiples questions au regard de sa pertinence économique et environnementale à moyen et à long terme mais aussi pour sa capacité à orienter dans la durée le devenir des sociétés de montagne

Afin de comprendre comment la production de neige oriente le développement des territoires touristiques de montagne, ce travail s'est attaché à identifier les déterminants des dynamiques d'investissement dans la production de neige. L'originalité de notre travail réside dans la prise en compte des déterminants physiques et technico-économiques qui orientent les trajectoires d'équipement dans la production de neige.

Un état des lieux de l'investissement dans la production de neige dans les domaines skiables des Alpes françaises souligne la place déterminante de cette pratique dans un secteur à forte intensité capitalistique. Une modélisation économétrique révèle que dans les plus grands domaines skiables, les stratégies d'investissement en production de neige sont indépendantes des conditions d'enneigement en neige naturelle. Nous avons reconstitué les trajectoires d'équipement en production de neige des domaines skiables sur la base de leurs investissements. Avec cette reconstitution, couplée à une chaîne de modélisation des conditions d'enneigement, nous avons évalué les gains de fiabilité de l'enneigement associés à la production de neige sur la période passée.

Notre recherche s'est aussi inscrite dans le champ de la géographie économique évolutionniste en mobilisant le concept de dépendance au sentier. Nous avons montré, avec un série d'entretiens, comment la diffusion de la production de neige a modifié l'industrie des sports d'hiver. Nous avons mis en évidence des mécanismes d'auto-renforcement et de verrouillage impliquant les gestionnaires de domaine skiable ainsi que l'ensemble des parties-prenantes de l'économie des sports d'hiver. Notre approche permet une plus grande compréhension des mécanismes à l'œuvre dans les territoires touristiques de montagne à l'heure où des démarches de transition touristique sont initiées.

Mots clefs: géographie économique, Alpes françaises, dépendance au sentier, tourisme des sports d'hiver, production de neige, changement climatique

