

CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES RÉGIONS DE MONTAGNES SUISSES

UNE ANALYSE DE VARIABLES CLIMATIQUES EN LIEN AVEC LE TOURISME

Thèse présentée à la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université de Neuchâtel.

Institut de Géographie

Université de Neuchâtel

Pour l'obtention du grade de docteur ès sciences humaines

GAËLLE SERQUET

Acceptée sur proposition du jury

Prof. Dr Martine Rebetez, directrice de thèse

Prof. Dr Stefan Brönnimann, rapporteur

Prof. Dr Laurent Tissot, rapporteur

PD Dr Christof Appenzeller, rapporteur

Dr Jean-Paul Ceron, rapporteur

Soutenue le 8 décembre 2011

Université de Neuchâtel

IMPRIMATUR

La Faculté des lettres et sciences humaines de l'Université de Neuchâtel, sur les rapports de Mme Martine Rebetez, directrice de thèse, professeure associée à l'institut de géographie, Université de Neuchâtel ; M. Christof Appenzeller, PD Dr., Federal office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss; M. Stefan Brönnimann, prof. à l'Institut de Géographie de l'Université de Berne ; M. Jean-Paul Ceron, chercheur, CRIDEAU/OMIJ, Université de Limoges ; M. Laurent Tissot, professeur à l'Institut d'histoire de l'Université de Neuchâtel, autorise l'impression de la thèse présentée par Mme Gaëlle Serquet en laissant à l'auteur la responsabilité des opinions énoncées.

Neuchâtel, le 8 décembre 2011



Le doyen
Patrick Vincent

« Le climat change. Les hommes aussi.

Parfois en s'adaptant. Plus souvent par le jeu de facteurs économiques et techniques, ou encore d'une autre organisation spatiale du peuplement. Ainsi, une « ressource » peut-elle avoir été exploitée, puis négligée. Tel aspect du climat, considéré comme une contrainte en un siècle, ne plus être ressenti comme telle en un autre. »

Charles-Pierre Péguy

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse n'aurait jamais vu le jour sans Martine Rebetez, ma directrice de thèse, qui m'a fortement encouragée à m'y lancer. Ses conseils, son soutien et son aide m'ont été extrêmement précieux. Merci infiniment!

Je remercie les membres du jury Christof Appenzeller, Stefan Brönnimann, Jean-Paul Ceron et Laurent Tissot d'avoir accepté d'expertiser cette thèse. Je les remercie également chaleureusement de la discussion lors du colloque de thèse. Leurs commentaires et suggestions ont été très utiles.

Mes remerciements se portent vers Jean-Pierre Dulex, Christophe Clivaz, Jean-Paul Jotterand, Christoph Marty, John Innes, James Kirchner et Flurin Sutter pour leurs précieuses contributions aux articles.

Je remercie Etienne Pigué et Andreas Matzarakis pour leurs commentaires sur mon projet de thèse et des divers conseils fort utiles.

Un merci particulier à Ola Söderström de m'avoir encouragée à faire une thèse et d'avoir su me conseiller aux moments opportuns.

Je tiens à remercier tous mes collègues du WSL et, en particulier, Brigitte Corboz, Matthias Dobbertin, Jacques Ferrez, Michèle Kaennel Dobbertin, Katy Lannas, Valentine Renaud, Andy Rigling et Georg Von Arx, mes collègues du laboratoire REME à l'EPFL Anne-Kathrin Faust, Camille Gonseth, Cecilia Matasci et Philippe Thalmann, mes anciens collègues du module développement durable des cours Sciences humaines et sociales de l'EPFL Michael Reinhard et Olivier Schmid ainsi que mes collègues de l'Institut de géographie de l'Université de Neuchâtel Noémie Béguelin Caudoux, Roger Besson, Blaise Dupuis, Clémence Merçay, Raoul Kaenzig, Sophie Marchand, Rafaele Poli, Patrick Rérat, Joëlle Salomon Cavin et Romaric Thiévent. Nos échanges professionnels ou amicaux ont été fort enrichissants et toujours très sympathiques.

Je remercie chaleureusement toutes les personnes interrogées des remontées mécaniques et des offices du tourisme du Canton de Vaud du temps qu'elles m'ont consacré mais également de leur aimable accueil.

Une partie des recherches incluses dans ce volume a été financée par l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), ainsi que par le Canton Vaud, les associations régionales

vaudoises (ADAEV, ADNV, ADPE, ARDA, Nyon Région) et l'office du tourisme vaudois (OTV). Qu'ils en soient remerciés.

Les données météorologiques utilisées proviennent de MétéoSuisse et du SLF ; les données touristiques de l'OFS. Je les en remercie ainsi que toutes les personnes qui permettent que ces données existent.

Enfin, un tout grand merci à ma famille et à mes amis qui m'ont soutenue, remonté le moral ou changé les idées (voire les trois à la fois) tout au long de ce travail.

RÉSUMÉ

Notre étude du changement climatique dans les montagnes suisses s'inscrit dans le champ de la climatologie appliquée. Elle s'intéresse ainsi à l'évolution des paramètres climatiques susceptibles d'avoir un impact sur le tourisme de montagne en Suisse en lien avec le changement climatique. L'évolution des précipitations neigeuses, les facteurs qui influencent l'enneigement des pistes de ski ainsi que l'influence des périodes de grandes chaleurs sur la fréquentation touristique de montagne y sont abordés.

Notre analyse des précipitations neigeuses montre une diminution généralisée des proportions de jours de précipitations neigeuses par rapport aux jours de précipitations totales aux altitudes inférieures à 1700 m durant les dernières décennies. Elle montre également qu'actuellement les proportions de décembre, janvier et février correspondent à celles de novembre et mars des années 1960. Un décalage d'environ un mois a ainsi eu lieu durant ces cinquante dernières années. Les stations de ski ayant tout ou une partie de leur domaine skiable à des altitudes inférieures à 1700 m sont concernées.

Dans le but de mieux définir les besoins en enneigement des stations de ski, notre étude a identifié les facteurs clés qui influencent l'enneigement minimal requis pour ouvrir une piste de ski. Un nombre important de facteurs climatiques, géomorphologiques et humains ont ainsi été mis en évidence. Il s'agit de l'altitude, des quantités de précipitations régionales, de la rugosité du sol, de l'orientation et de la déclivité de la pente, de la fréquentation et de la préparation des pistes ainsi que des possibilités d'enneigement artificiel.

Notre analyse de la fréquentation hôtelière domestique estivale montre que les températures élevées à basse altitude ont un impact sur le nombre de nuitées engendrées par le tourisme domestique. L'ensoleillement en montagne, quant à lui, joue un rôle moins important pour la plupart des stations à l'exception de celles des Grisons. Nous avons également mis en évidence une réactivité des nuitées hôtelières domestiques aux températures en plaine qui varient suivant les stations étudiées. Les différences observées s'expliquent potentiellement par la distance des stations à un grand centre urbain. Plus largement, nos résultats suggèrent que les stations touristiques des Alpes pourraient bénéficier de l'augmentation future des températures. Le changement climatique pourrait, dans certaines conditions et dans une certaine mesure, offrir de nouvelles opportunités aux stations touristiques de montagnes.

Enfin, notre revue de la littérature a montré un manque de résultats en ce qui concerne les recherches en climatologie appliquée au tourisme de montagne. Même si notre travail de thèse a permis de combler certaines lacunes concernant la compréhension de l'évolution des différentes variables climatiques favorables à la pratique des activités touristiques en montagne, de nombreuses questions demeurent. En conclusion, nous proposons ainsi plusieurs axes d'études qui permettraient d'approfondir les connaissances en ce domaine.

Mots clés : Alpes, Changement climatique, Enneigement, Ensoleillement, Fiabilité de l'enneigement, Montagnes, Neige, Suisse, Température, Tourisme, Viabilité des domaines skiables.

English title : Climate change in the Swiss mountains. An analysis of climate variables related to tourism

Keywords : Alps, Climate change, Snow cover, Sunshine duration, Snow reliability, Mountains, Snow, Switzerland, Temperature, Tourism, Ski resorts' viability.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	5
RÉSUMÉ	7
SOMMAIRE	9
1. INTRODUCTION	13
2. OBJETS D'ÉTUDE ET PROBLÉMATIQUE	19
2.1. DE LA DICHOTOMIE NATURE / SOCIÉTÉ À L'ÉTUDE DES RELATIONS ENTRE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TOURISME	21
2.2. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE COMME PREMIER OBJET D'ÉTUDE	26
2.3. LE TOURISME DE MONTAGNE COMME SECOND OBJET D'ÉTUDE	29
2.4. L'APPORT DE L'INTER- ET TRANSDISCIPLINARITÉ	34
2.5. LES QUESTIONNEMENTS ACTUELS CONCERNANT LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TOURISME DE MONTAGNE	38
2.6. PROBLÉMATIQUE	58
2.7. QUESTIONS DE RECHERCHE ET OBJECTIFS	59
2.8. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	60
3. QUELQUES NOTIONS THÉORIQUES	67
3.1. SYSTÈMES, THÉORIES DE LA COMPLEXITÉ ET DU CHAOS	69
3.2. SYSTÈMES CLIMATIQUE ET TOURISTIQUE : ENTRE COMPLEXITÉ ET CHAOS	79
3.3. INTERACTIONS ENTRE CLIMAT ET TOURISME	86

4. IMPACT DE L'ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS NEIGEUSES SUR LA PRATIQUE DES ACTIVITÉS TOURISTIQUES HIVERNALES	91
4.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE	93
4.2. ARTICLE 1 : SEASONAL TRENDS AND TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE SNOWFALL/PRECIPITATION-DAY RATIO IN SWITZERLAND	95
4.3. ARTICLE 2 : MONTHLY TRENDS AND THE CORRESPONDING ALTITUDINAL SHIFT OF THE SNOWFALL / PRECIPITATION-DAY RATIO	105
4.4. CONCLUSIONS DU CHAPITRE	115
5. RÉFLEXION AUTOUR DES CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ DE L'ENNEIGEMENT POUR LA PRATIQUE DU SKI ALPIN	117
5.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE	119
5.2. ARTICLE 3 : CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ DE L'ENNEIGEMENT DES DOMAINES SKIABLES EN LIEN AVEC LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	121
5.3. CONCLUSIONS DU CHAPITRE	132
6. IMPACT DE L'AUGMENTATION DES JOURNÉES TRÈS CHAUDES SUR LA FRÉQUENTATION TOURISTIQUE HÔTELIÈRE EN MONTAGNE	135
6.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE	137
6.2. ARTICLE 4 : RELATIONSHIP BETWEEN TOURISM DEMAND IN THE SWISS ALPS AND HOT SUMMER AIR TEMPERATURES ASSOCIATED WITH CLIMATE CHANGE	138
6.3. CONCLUSIONS DU CHAPITRE	150
7. CONCLUSIONS GÉNÉRALES	153
BIBLIOGRAPHIE	161
TABLE DES MATIÈRES	177

LISTE DES FIGURES	181
LISTE DES TABLES	185
ANNEXES	187
ANNEXE 1 : WINTER AND SPRING CHANGES IN SD/PD [%] FOR 1961-2008 AND 1979- 2008	189
ANNEXE 2 : GRILLE D'ENTRETIEN POUR LES RESPONSABLES DES REMONTÉES MÉCANIQUES	191
ANNEXE 3 : GRILLE D'ANALYSE CONCERNANT L'ENNEIGEMENT DES PISTES DE SKI	193

1. INTRODUCTION

Le changement climatique global est un des plus importants défis de l'histoire moderne de l'humanité. Depuis le milieu du 19^{ème} siècle, les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique ont cru de manière exponentielle provoquant de nombreux bouleversements dans le système climatique (IPCC, 2007a). L'impact du changement climatique sur l'environnement se manifeste de plusieurs manières : augmentation des températures et des périodes caniculaires, diminution de l'enneigement à basse et moyenne altitude, fonte des glaciers, augmentation du niveau de la mer, etc. (IPCC, 2007b).

Certains de ces changements ont et auront des conséquences directes sur les destinations touristiques qui tirent profit de la nature et du climat (UNWTO & UNEP, 2008), comme c'est le cas pour les destinations des montagnes suisses. Ces dernières, et plus particulièrement les Alpes, font parties des destinations touristiques traditionnelles d'Europe. Pour les régions concernées, le secteur touristique est ainsi un important revenu économique. En effet, 30% du PIB et des emplois sont attribuables au tourisme dans les Grisons et 25, respectivement 30% en Valais (STV-FST, 2008). De plus, l'intensité touristique, soit le nombre de nuitées touristiques comparées au nombre de résidents est, en Suisse, la plus élevée dans trois régions alpines : les Grisons, le Valais et l'Oberland bernois (OFS, 2007).

Au niveau suisse, la valeur ajoutée attribuable au tourisme a correspondu à près de 3% de la valeur ajoutée brute globale de l'économie suisse en 2008; une grande partie des recettes touristiques (61%) étant imputables aux résidents suisses (STV-FST, 2010). L'apport du tourisme se retrouve également dans la création d'emploi puisque 4,2% de l'emploi dans l'ensemble de l'économie était assignable au tourisme en 2008 (STV-FST, 2010). Par comparaison, l'industrie de la construction a généré un peu moins de 6% de la valeur ajoutée totale et emploie environ 7% des personnes actives en 2007 (Koerber & Kaufmann, 2007) et l'industrie de l'électrotechnique, de la mécanique de précision et de l'horlogerie 4% de la valeur en 2005 et 3% de la population active en 2007 (Roth, 2007). Par ailleurs, en 2011, la Suisse se trouve pour la quatrième fois consécutive en première position du classement de la compétitivité touristique calculé par le World Economic Forum (WEF, 2011). Ceci signifie que la Suisse jouit d'un environnement extrêmement favorable au

développement du tourisme. La proximité avec d'autres grands pays consommateurs de tourisme tels la France, l'Allemagne, l'Autriche ou encore la Grande Bretagne est un avantage certain en terme de compétitivité, puisque le potentiel commercial du tourisme dépend de la distance entre le point de départ et la destination ainsi que du revenu dont bénéficie la population des marchés émetteurs (SECO, 2010). Pourtant, aujourd'hui, la Suisse occupe le 27^{ème} rang des principales destinations touristiques alors qu'elle se plaçait parmi les cinq premières en 1950; la mondialisation ainsi que l'aviation et la motorisation croissante ayant changé le tourisme en profondeur durant ces soixante dernières années (SECO, 2010). De nouvelles destinations touristiques sont apparues, remodelant les lieux ainsi que les activités privilégiées par les touristes. La concurrence s'est dès lors accrue à toutes les saisons. Il en a résulté qu'à partir des années 1970, la demande en nuitées a stagné voire chuté à l'exception du tourisme urbain et de certaines grandes destinations alpines à vocation internationale qui ont connu, depuis la fin des années 1990, un fort développement (SECO, 2010).

Le changement climatique est un nouveau défi pour le tourisme de montagne. Avec la diminution de l'enneigement aux altitudes les plus basses, les stations touristiques qui dépendent principalement de la saison hivernale se trouvent à un moment charnière de leur histoire si elles veulent pouvoir poursuivre leur activité. Quelques études scientifiques se sont penchées sur cette question au tournant de l'an 2000, mais de nombreuses questions restent ouvertes concernant les conséquences de l'évolution de l'enneigement sur la viabilité des stations de ski. Par ailleurs, le potentiel de développement de la saison estivale pour les régions de montagne a très peu été étudié.

Ce travail de thèse en climatologie appliquée a pour objectif d'apporter une meilleure connaissance de l'évolution des variables climatiques permettant ou favorisant la pratique des activités touristiques extérieures en montagne. Pour ce faire, il vise à mieux appréhender l'évolution de l'enneigement ainsi que l'impact que celui-ci peut avoir sur la pratique du ski alpin, pilier du tourisme hivernal des montagnes suisses. De plus, il s'intéresse à l'été et au développement potentiel de cette saison. En effet, les modèles prévoient une réorientation des touristes plus au nord et en montagne durant les périodes les plus chaudes mais aucune étude n'avait jusqu'ici analysé si ce phénomène s'était déjà produit lors des périodes caniculaires que l'Europe a connues durant les étés des années 2000.

La première partie de cette thèse, plus théorique, présente les deux objets étudiés, la problématique, les questions de départ, une synthèse de l'état de l'art (chapitre 2) ainsi que quelques notions théoriques (chapitre 3). La seconde partie regroupe les résultats obtenus lors des diverses analyses qui ont été menées (chapitres 4 à 6). Ceux-ci sont présentés sous forme d'articles soit déjà publiés (premier article du chapitre 4 et chapitre 6), soit soumis (second article du chapitre 4 et chapitre 5)

dans diverses revues scientifiques, toutes à comité de lecture et référencées dans ISI Web of Knowledge.

Plus particulièrement, le chapitre 4 présente l'évolution des précipitations neigeuses par rapport aux précipitations totales durant les cinq dernières décennies. L'objectif de cette analyse est de mettre en évidence l'impact du changement de température sur les précipitations neigeuses en minimisant l'effet de la variabilité dans la fréquence et l'intensité des précipitations. Cette analyse a fait l'objet de deux articles introduits dans cette thèse. Le premier article compare l'évolution de la proportion du nombre de jours avec précipitations neigeuses (SD) par rapport au nombre total de jours de précipitations (PD) pour les saisons d'hiver (décembre, janvier et février) et de printemps (mars et avril). Pour ce faire, les données de 76 stations météorologiques, réparties sur l'ensemble du territoire suisse à des altitudes comprises entre 200 et 2700 m, ont été analysées durant deux périodes (1961-2008 et 1979-2008). Pour chaque station, l'évolution saisonnière de la proportion de SD/PD a ensuite été mise en relation avec son altitude ainsi qu'avec sa température moyenne au début de la période analysée. Enfin, un modèle empirique de prévisions de l'évolution future de la proportion de SD/PD en fonction de différentes températures moyennes de départ a été créé.

Le deuxième article propose une analyse mensuelle de l'évolution de la proportion de SD/PD pour chaque mois de novembre à avril durant les années 1961-2008. Les données de 52 stations météorologiques, réparties sur l'ensemble du territoire suisse à des altitudes comprises entre 200 et 2700 m, ont été analysées. Pour chaque station, l'évolution mensuelle de la proportion de SD/PD a été mise en relation avec son altitude ainsi qu'avec sa température moyenne au début de la période analysée. Afin d'affiner l'influence de l'altitude sur l'évolution des proportions de SD/PD pour chaque mois, les stations analysées ont été regroupées en six classes altitudinales. Pour chaque classe, la pente de l'évolution durant la période observée ainsi que les proportions de SD/PD de 1961 et de 2008 prévus par le modèle ont été calculés. Les proportions de 1961 et de 2008 de chaque mois et de chaque classe altitudinale ont ensuite été comparées afin de comprendre leur évolution passée et de prévoir leur évolution future.

Le chapitre 5 présente les résultats de l'article qui s'intéresse aux facteurs d'enneigement des pistes de ski alpin. Son but est de discuter les critères climatiques à retenir lors de l'analyse de la viabilité des domaines skiables. Pour ce faire, des entretiens auprès de professionnels en charge de remontées mécaniques ont été menés. A l'aide de la littérature et des données recueillies lors des entretiens, les différents facteurs d'enneigement des pistes ainsi que leurs spécificités et leurs impacts sur l'enneigement ont ainsi pu être établis. Des critères climatiques minimaux à retenir lors de l'analyse de la viabilité des domaines skiables sont proposés en conclusion de cet article.

Le chapitre 6 présente les résultats de l'article concernant la saison estivale. Celui-ci a pour objectif de déterminer si aujourd'hui déjà les périodes de grandes chaleurs ont une influence sur la fréquentation touristique de montagne. Pour ce faire, les variations de la fréquentation hôtelière domestique de 40 stations touristiques des Alpes suisses ont été mises en relation avec les températures estivales mesurées en plaine et l'ensoleillement mesuré en montagne. Le nombre de jours au-dessus d'un seuil de température et celui au-dessus d'un seuil d'ensoleillement ont été calculés pour les mois de juin, juillet et août de 1997 à 2007. Les stations ont ensuite été classées en fonction de la réactivité de leur taux d'occupation domestique au nombre de jours chauds ou ensoleillés. Afin d'expliquer ce classement, la distance de chaque station à un grand centre urbain ainsi que le séjour moyen par mois et par station ont été calculés.

Finalement, pour conclure ce travail de thèse, nous présentons une synthèse générale des résultats obtenus lors de nos différentes analyses ainsi que des perspectives pour de futures recherches scientifiques dans ce domaine.

2. OBJETS D'ÉTUDE ET PROBLÉMATIQUE

2.1. DE LA DICHOTOMIE NATURE / SOCIÉTÉ À L'ÉTUDE DES RELATIONS ENTRE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TOURISME

Etudier l'impact potentiel du changement climatique sur le tourisme relève, de manière plus large, de la question des relations qu'entretiennent les êtres humains avec leur environnement. A partir de l'Antiquité, ce questionnement s'est fait à travers l'étude du concept de nature. Celui-ci a dès lors été l'objet de nombreux écrits et positionnements de la part d'auteurs de différentes disciplines scientifiques dont la géographie, la philosophie, la sociologie ou l'ethnologie. Dès son apparition, le concept de nature est défini par rapport à celui de culture, de société ou d'artifice. En effet, alors que ces deux concepts auraient pu être envisagés comme deux thématiques sans lien l'une avec l'autre, elles ont toujours été considérées comme étant intimement liées, se construisant l'une par rapport à l'autre. La première renvoie à la réalité matérielle et physique de l'environnement non modifié par l'homme, la seconde à tout ce qui a été créé, transformé et codifié par l'action et les relations humaines.

Depuis le 20^{ème} siècle, deux grandes approches se côtoient. La première, héritée de la philosophie antique, sépare radicalement la nature et la société / culture; ce qui se traduit par l'étude bien distincte de ces deux entités. Cette conception se retrouve, entre autres, dans les grands courants de l'écologie, à l'instar de l'écologie profonde (*deep ecology*). La nature y est vue comme fragile, à protéger. L'homme ne peut plus être envisagé comme le créateur des valeurs et dès lors doit conformer son comportement au cadre plus général de la nature. On ne doit plus le considérer comme le centre autour duquel tout s'organise. C'est le principe de l'égalité biocentrique qui prime. Ce trope considère les rapports entre nature et société comme des rapports de forces. Les hommes par leur croissance démographique et technique sont devenus capables de rivaliser avec les forces locales de la terre (Bourg, 1996).

Plusieurs conceptions sont à rattacher à cette approche générale qui oppose radicalement nature et société. Nous renvoyons le lecteur à Latour (1999: 77-85) pour une description détaillée de celles-ci. Pour notre part, nous en retiendrons trois, utiles à la conceptualisation de nos objets d'étude. La première préconise d'instaurer entre chacun des pôles nature / société la distance la plus grande possible avec l'autre. Il s'agit de s'arracher de l'un des pôles pour s'en éloigner le plus possible. La liberté humaine en ce sens se définit par l'arrachement aux strictes déterminations naturelles. Michelet (1834: 1) a clairement exprimé ceci : « Avec le monde a commencé une guerre qui doit finir avec le monde, et pas avant : celle de l'homme contre la nature, de l'esprit contre la matière, de la liberté contre la fatalité ». Cette vision se retrouve également lorsque l'on oppose « campagne » à « ville », « centre » à « périphérie », « ici » et « ailleurs », « travail » à « loisirs », etc. En ce qui concerne la notion de « nature », celle-ci est généralement opposée à « culture », à « société » ou encore à « artificiel ». Il en résulte un dédain mutuel de chacun des pôles : une nature qui ignore tout du monde social; un monde social qui ignore tout de la nature et qui doit au maximum s'en démarquer (Latour, 1999).

La seconde perspective envisage la dichotomie nature / société comme une conquête de l'un des deux pôles par l'autre pôle en lui apportant les bienfaits du pôle envahisseur. Il s'agira ainsi soit d'une *naturalisation* soit d'une *socialisation*. Cette vision se caractérise par son aspect militant, par son esprit de conquête et de combat. Selon Latour (1999), les débats sur les rôles respectifs de la nature et de l'environnement sont de ce type, tout comme les discussions sur la distinction de l'âme et du corps.

Enfin, tout en restant dans l'opposition claire entre nature et société, il est possible de considérer que la nature telle qu'elle est connue par l'homme ne fait que refléter les catégories sociales et, inversement, les conquêtes pour la liberté humaine ne font que renvoyer l'image des strictes nécessités naturelles. Selon cette conception, la dichotomie nature / société est un effet de miroir (Latour, 1999).

La seconde approche qui a émergé dans le courant du 20^{ème} siècle préconise de ne plus opposer la nature à la société / culture. On peut ainsi y voir, par exemple, un couplage ou une association (Berque, 1986; Morin, 1973), une globalisation (Latour, 1999) ou encore une continuité (Descola, 2005; Larrère & Larrère, 1997).

Dès les années 1970, Morin (1973) exhorte à « *cesser de disjoindre nature et culture* » car « *la clé de la culture est dans notre nature et la clé de notre nature est dans la culture* ». En se basant sur l'éthologie des grands singes, il postule que la société n'est pas l'apanage de l'être humain, car elle

appartient tout autant au règne animal. Cette vision l'amène à repenser toute la question de la nature humaine. Berque (1986), va dans la même direction, puisqu'il maintient la distinction des notions de nature et société mais les associe. Il réfute ainsi le fait de l'impossibilité de l'articulation de la notion de « nature » avec celles de « société », de « culture » ou d'« individu ». Il considère que ne pas admettre leur articulation fige le monde dans l'irréalité. Selon lui,

« dans la réalité, ces distinctions se résolvent au sein de chaque être humain, au sein de chaque milieu ; (...) C'est ainsi par le couplage indissoluble de deux ordres de transformations : transformations d'ordre naturel et transformations d'ordre culturel, couplage qui se réalise (et ne se réalise que) dans chaque individu et dans chaque milieu, que s'articule la nature et la culture » (Berque, 1986: 132).

Latour (1999) ira encore plus loin en englobant la notion de nature qu'il nomme « *nature non sociale* » et celle de société ou « *nature sociale* » dans une même et unique entité. Selon lui, la nature est une partie du monde soumise à la stricte causalité et au seul règne de la nécessité ; c'est ce qui la distingue de la société. Cependant, elle signifie aussi l'ensemble formé par la réunion de la nature et de la société humaine (*nature sociale*) puisque cette dernière ne se conçoit pas non plus en dehors du cadre de la causalité. La distinction de la « *nature non sociale* » et de « *la nature sociale* » peut dès lors être vue de deux manières. Soit cette distinction appartient elle-même à l'ordre de la nature, l'évolution ayant arraché l'humanité à la stricte détermination de la nature (*non sociale*) ; soit elle appartient à l'ordre de la société. Dans ce second cas, « *il s'agit d'une catégorisation par l'esprit humain d'une distinction artificielle, d'une convention, qui n'existe pas dans les choses, mais qui a, au cours de l'histoire, joué un rôle considérable dans la délimitation de l'humain* » (Latour, 1999: 77). Dès lors que le second cas est une catégorisation artificielle de l'esprit, il devient envisageable de partir de la réunion de ces deux notions pour définir la totalité de la nature, c'est ce qu'il nomme « *globalisation* ». La nature désigne ainsi la réunion de la « *nature non sociale* » et de la « *nature sociale* » et non pas la distinction de ces deux entités.

Larrère et Larrère (1997) apportent, quant à eux, l'idée de continuité entre la nature et la société. Ainsi, selon eux, « *on ne peut plus concevoir l'extériorité de l'homme et de la nature. Les hommes et leurs aptitudes, les sociétés et leurs activités, l'humanité elle-même sont en continuité avec la nature* » (Larrère & Larrère, 1997: 162). Ceci est dû au fait que les sociétés (aussi développées soient-elles) « *sont situées dans une nature qu'elles transforment et dont elles dépendent* » (Larrère & Larrère, 1997: 162). Ainsi, tous les ouvrages techniques et autres produits que l'humanité fabrique sont considérés comme des objets hybrides qui mettent en action des processus naturels et qui ont un

avenir naturel non maîtrisé par l'humanité. Ces auteurs invitent dès lors à repenser l'usage de la nature par l'homme.

Descola (2005) postule également qu'il y a continuité entre la nature et la société. Suite à l'étude de sociétés humaines qui ne font pas la distinction entre les humains et les non-humains (animaux et végétaux), il énonce que « *tout humain se perçoit comme une unité mixte d'intériorité et de physicalité* » (2005: 169). Il définit l'intériorité comme étant l'âme, l'esprit, la conscience, le souffle ou l'énergie vitale. La physicalité représente, quant à elle, la forme extérieure, mais ne se résume pas à la simple matérialité du corps. Elle englobe également tous les processus physiologiques, perceptifs ainsi que le tempérament. Il identifie dès lors quatre combinaisons possibles de l'intériorité et de la physicalité qui reflètent toutes les relations entre humains et non-humains possibles. La première combinaison, le « totémisme » envisage que la physicalité et l'intériorité du non-humain sont identiques à celle de l'humain, il y a ainsi continuité matérielle et morale. La seconde, l'« animisme », met en évidence la ressemblance des intériorités entre humains et non-humains mais les différencie au niveau du corps (physicalité). La troisième, « le naturalisme », rattache au contraire les humains aux non-humains par leur ressemblance des physicalités mais les distingue par l'aptitude culturelle (intériorité). Enfin, « l'analogisme », postule la différence des intériorités et des physicalités. Cette quatrième combinaison ne doit cependant pas être vue comme n'ayant aucune relation de correspondance. Au contraire, selon Descola (2005: 325), « *un monde saturé de singularités est presque inconcevable et en tout cas fort inhospitalier* ». C'est pourquoi, même cette combinaison ne fait pas la distinction totale entre nature et culture. Elle postule plutôt que les relations entre humains et non-humains sont constituées d'« *un réseau de discontinuités structuré par des relations de correspondances* ».

En parallèle aux débats concernant la dichotomie nature / société, la fin du 19^{ème} siècle a vu plusieurs géographes s'intéresser aux interactions entre la société humaine et son environnement. Deux géographes allemands se distinguèrent notamment de la géographie des 18^{ème} et 19^{ème} siècles : Ritter (1836) en proposant le paradigme déterministe, et Ratzel (1897) le paradigme environnementaliste. Ces deux paradigmes stipulent que l'environnement est l'élément principal de l'implantation et du fonctionnement des sociétés humaines. Le déterminisme étant même plus radical puisqu'il postule que « *tout fait géographique est explicable par des causes (on dit parfois : par des conditions)* » et que « *lorsque les causes (conditions) sont réunies, le fait se produit* » (Bailly & Béguin, 2001: 46). Cette vision du monde a eu les dérives que l'on connaît de justification du colonialisme notamment. Ceci explique peut-être en partie la tendance des géographes du 20^{ème} siècle à s'être très tôt éloignés de ce paradigme et à n'avoir eu de cesse de s'en démarquer. Le

paradigme possibiliste proposé par Vidale de la Blache (1903, 1922) en est un bon exemple. L'environnement naturel ne détermine plus les actions humaines, c'est l'homme qui choisit les possibilités offertes par la nature. « *En introduisant l'homme et ses motivations culturelles et socio-économiques, le possibilisme a simplement, mais très utilement, élargi le champ des causes explicatives des faits géographiques observés* » (Bailly & Béguin, 2001: 46). L'environnement reste toutefois au centre des préoccupations des géographes. Ce n'est que petit à petit que ce dernier perdra sa place durant le 20^{ème} siècle. La volonté de se démarquer du déterminisme, la conviction moderne que c'est l'homme qui a un impact sur son environnement et non l'inverse ainsi que les visions modernes de la dichotomie nature / société ont considérablement marqué les recherches en géographie. Dans de nombreux champs d'étude et notamment dans l'étude des migrations (Piguet, 2009), la plupart des chercheurs en sont venus à ne plus considérer l'environnement naturel comme facteur influant certains comportements humains.

En climatologie appliquée en revanche, et plus particulièrement en climatologie historique, le courant déterministe influence encore certaines études récentes (Buentgen et al., 2011). Le déterminisme climatique est cependant également controversé (Pfister, 2010). C'est l'historien Emmanuel Le Roy Ladurie et son Histoire du Climat depuis l'an Mil (Le Roy Ladurie, 1967) qui a remis, dès les années 1960, ce paradigme au goût du jour. Plus généralement, les études en climatologie appliquée postulent que le climat influence certains comportements sociaux puisqu'elles s'intéressent justement aux conséquences du climat sur l'être humain. Besancenot (1989: 9) y voit par exemple le tourisme comme étant « *littéralement déterminé, dans le court terme, par le temps qu'il fait, et à plus long terme par le climat* ». Il faut cependant nuancer ses propos puisque lui-même met en évidence les limites de l'usage d'indices bioclimatiques pour expliquer le tourisme. La plupart des approches en climatologie appliquée ont d'ailleurs « *écarté depuis plusieurs décennies tout déterminisme primaire* » (Péguy, 1989: 202). Le climat y est depuis lors considéré comme un facteur parmi d'autres ayant une influence sur les sociétés humaines.

Il est à noter que les recherches en climatologie appliquée sont restées assez confinées jusqu'au début des années 1990. Les découvertes concernant le changement climatique et la prolifération des études y relatives, dont les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ou IPCC en anglais) font la synthèse (IPCC, 2007a), ont propulsé ce champ d'étude sur le devant de la scène. Ceci a également eu pour corollaire de redonner une place honorable à l'environnement naturel (le climat mais également les catastrophes naturelles) au sein de plusieurs autres disciplines des sciences humaines (Pfister, 2010; Piguet, 2009; Viner, 2006).

2.2. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE COMME PREMIER OBJET D'ÉTUDE

2.2.1. Une définition du climat

Il est d'usage de définir ce qu'est le climat en le comparant aux temps ou météores, ou plus largement de définir la climatologie par rapport à la météorologie puisque ces deux sciences sont proches tout en étant bien distinctes. Elles sont aussi très fréquemment confondues. La météorologie est la science qui « *procède à l'observation des météores en même temps qu'elle tente de les expliquer. Par rapport à la climatologie, science de synthèse, c'est une science analytique et explicative dont la première se nourrit* » (Viers & Vigneau, 1990: 7). Quant à la climatologie appliquée à laquelle cette thèse se rattache, nous la définissons, à l'instar de Péguy (1989: 201), par l'« *ensemble des connaissances propres à intégrer l'analyse spatio-temporelle des données météorologiques dans les projets d'organisation de l'espace géographique et dans le choix des systèmes de production dans le but de maximiser les espérances d'utilité globale des productions soumises à des contraintes météorologiques* ».

Le temps peut être défini comme étant « *un indicateur de l'état local d'un système, soit l'atmosphère au contact de la surface de la terre, qui est lui-même caractérisé par un certain nombre de variables intensives, qui changent en tout point du système* » (Hufty, 2001: 2). La définition du temps journalier se fait à l'aide de météores ou variables météorologiques telles la température, les précipitations (sous forme de pluie ou de neige), l'humidité de l'air, l'ensoleillement ou la nébulosité, la vitesse et la direction du vent ou encore la pression barométrique.

Si la définition de la notion de temps est assez aisée, celle de climat l'est nettement moins, puisqu'elle dépend essentiellement de la méthode, analytique ou synoptique, utilisée. Toutes deux s'accordent sur le fait que le climat local est « *la somme de temps journaliers pendant l'année* » (Hufty, 2001: 2). Elles diffèrent cependant sur la manière d'obtenir cette somme. La méthode analytique consiste à calculer un temps mensuel moyen à partir des moyennes des éléments météorologiques. Le climat local est ainsi « *l'état moyen des éléments qui constituent l'atmosphère au-dessus d'un lieu, pour une période assez longue* » (Hufty, 2001: 3). Cette méthode a l'avantage de

comparer facilement les stations les unes avec les autres. Par contre, l'usage de moyennes comporte un certain nombre de défauts dont celui de considérer de manière identique une succession de journées très chaudes et très froides et une succession de journées dont les températures sont tièdes. On a ainsi tenté d'améliorer cette méthode en y ajoutant des indices empiriques. Ceux-ci combinent différents éléments climatiques dans le but de rendre compte de l'action du climat sur les végétaux, les animaux ou les êtres humains. D'une méthode « séparative », c'est-à-dire qui analyse séparément chaque élément du climat, on passe à une méthode globale plus proche de la réalité de l'action du temps. Cette méthode sera principalement utilitaire, à savoir qu'elle va « servir, par exemple, à relier le climat à la production végétale, au confort thermique, etc. » (Hufty, 2001: 4).

La méthode synoptique, quant à elle, consiste à calculer les fréquences des fluctuations journalières ramenées à un certains nombres de combinaisons journalières d'éléments (Hufty, 2001). De ce fait, le climat correspond à « l'ambiance atmosphérique constituée par la série des états de l'atmosphère au-dessus d'un lieu dans leur succession habituelle » (Sorre, 1943: 13-14). Plus simplement, il s'agit des « fréquences saisonnières des temps qu'il fait » (Hufty, 2001: 6).

Hufty (2001: 7) propose encore une distinction entre la notion de « climat local », qu'il soit défini par la méthode analytique ou synoptique, et celle de « climat régional ». Ce dernier correspond au regroupement de tous les « lieux qui ont en commun certains traits climatiques, considérés comme importants, et qui dominent les autres ». Par ailleurs, le climat peut également être compris comme un élément de la nature. On parlera ainsi « d'environnement climatique, quand la qualité de l'air est menacée » (Hufty, 2001: 7), par exemple.

Enfin, l'usage professionnel du climat part de deux postulats : d'une part, que le climat existe à n'importe quel moment donné et, d'autre part, qu'il est identique à celui d'un passé récent (Hare, 1985). Pendant longtemps, il a ainsi été admis que le futur proche ressemble au passé récent. Cette définition n'est cependant plus à l'ordre du jour, puisque la terre subit actuellement un changement climatique rapide lié à l'activité humaine; le premier de son histoire (IPCC, 2007a).

2.2.2. Le changement climatique

Nous reprenons de la version française d'IPCC (GIEC) la définition du changement climatique. Celle-ci englobe les deux causes du réchauffement climatique, à savoir la variabilité naturelle et l'activité humaine, qui nous paraissent essentielles. Ainsi,

« le changement climatique s'entend d'une variation de l'état du climat que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Il se rapporte à tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine. Cette définition diffère de celle figurant dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), selon laquelle les changements climatiques désignent des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables » (GIEC, 2007: 30).

Notons encore que

« le réchauffement du système climatique est sans équivoque. On note déjà, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer » (GIEC, 2007: 30).

Enfin,

« les observations effectuées sur tous les continents et dans la plupart des océans montrent qu'une multitude de systèmes naturels sont touchés par les changements climatiques régionaux, en particulier par la hausse des températures » (GIEC, 2007: 31).

2.3. LE TOURISME DE MONTAGNE COMME SECOND OBJET D'ÉTUDE

2.3.1. Esquisse d'une définition du tourisme

Il n'existe à l'heure actuelle aucune définition du tourisme qui soit acceptée par tous. Celle-ci est rendue extrêmement délicate par le fait que les notions mêmes de ses définitions font l'objet de discussions. Dewailly (2006) en propose une réflexion approfondie; nous en retiendrons les trois principales : la durée du déplacement, son motif et la notion d'« environnement habituel » ou d'« ailleurs ». Une porte d'entrée pour en discuter est la définition utilisée par l'organisation mondiale du tourisme (OMT). Cette définition a pour but de déterminer ce qui a trait au tourisme afin que les statistiques mondiales établies par les pays soient comparables. On y retrouve ces trois notions problématiques. Le tourisme, selon l'OMT, recouvre :

« les activités déployées par les personnes au cours de leurs voyages et de leurs séjours dans les lieux situés en dehors de leur environnement habituel pour une période consécutive qui ne dépasse pas une année, à des fins de loisirs, pour affaires et autres motifs non liés à une activité rémunérée dans le lieu visité. L'utilisation de ce concept suffisamment large permet d'identifier aussi bien le tourisme entre différents pays qu'à l'intérieur d'un même pays. Le terme "tourisme" couvre toutes les activités des visiteurs incluant à la fois les "touristes" (visiteurs qui passent la nuit) et les "visiteurs de la journée" (excursionnistes) » (OMT, 1994).

Cette définition a été conçue pour le tourisme international, mais comme le fait remarquer Dewailly (2006: 59) « rien n'empêche de l'appliquer à toutes les échelles du tourisme, national, régional, local ».

La durée du déplacement proposée par l'OMT est large puisqu'elle implique autant les excursionnistes d'une journée que les visiteurs passant aux moins une nuit sur place. La question de passer une nuit ou non a largement fait débat car elle a « de fortes conséquences sur l'aménagement

de l'espace et de l'organisation du territoire » (Dewailly, 2006: 59). Par contre, tout comme la visite d'un excursionniste, elle n'implique pas, de fait, la consommation d'un bien touristique : une visite dans sa famille ou chez des amis n'étant pas exclu de cette définition.

Ceci nous amène au motif du déplacement qui est également très vaste dans la définition retenue par l'OMT. Quasiment tout déplacement serait tourisme s'il n'est pas lié à une activité rémunérée dans le lieu visité. Une possibilité de la restreindre serait d'y ajouter l'idée de temps libre ou de récréation. Mais que faire du tourisme d'affaires, également inclus dans la définition de l'OMT et comptabilisé dans les statistiques des nuitées hôtelières, par exemple? De plus, Dewailly (2006) relève que ces deux notions posent également problème lors de leur propre définition. Boret (2005), quant à lui, propose d'ajouter la notion de découverte. Ceci aurait l'avantage d'exclure les visites chez des amis ou dans la famille. Pourtant, une fois encore on se retrouve dans une impasse puisque comme le fait remarquer Clivaz (2008: 65) « sans que Boret ne soit très explicite sur ce qu'il entend par « découverte », on peut néanmoins en déduire que revenir chaque année passer ses vacances dans le même endroit en y pratiquant les mêmes activités ne relèverait pas du tourisme ». Hoerner (2002; 2003) résout ce problème en définissant le touriste comme étant celui qui consomme les produits de l'industrie touristique. « Ce n'est pas la nuit passée hors de la résidence principale qui est importante, c'est la dépense touristique, quelle que soit sa nature » (Hoerner, 2002: 27). Cette définition à l'avantage de ne pas faire la distinction entre le tourisme d'excursion de celui lié aux nuitées, mais elle pose une autre question : que recouvre l'industrie touristique? Un magasin dans un lieu touristique fait-il partie du secteur touristique de par sa situation géographique ou n'en fait-il partie que lorsque ce sont des visiteurs qui achètent quelque chose mais pas lorsque ce sont des locaux (Clivaz, 2008)? Et comment considérer un excursionniste qui pratique une activité sportive de montagne telle la randonnée sans consommer dans un lieu touristique?

La question de l'environnement habituel est tout aussi vaste. Comment lui poser une limite? Ainsi Clivaz (2008: 66) s'interroge : « un skieur habitant Grenoble ou Innsbruck qui effectue chaque fois qu'il en a l'occasion un déplacement de 20 km pour se rendre dans sa station préférée se trouve-t-il en dehors de son environnement habituel? » La notion de distance fait ainsi son apparition. On la retrouve aussi chez Hoerner (2002: 27) qui se demande s'il ne serait pas plus judicieux de raisonner en terme de « distance des voyages ». Pour ce faire, une limite en miles a été définie dans certains pays anglo-saxons (Grande-Bretagne et Etats-Unis notamment) (Hoerner, 2002). Mais cette notion de distance se heurte à la réalité pratique des statistiques. Que faire d'un villageois qui utilise une infrastructure touristique de son propre village? De plus, si l'on peut comprendre l'usage d'une limite

en miles ou kilomètres dans un but pratique, il ne résout cependant pas l'ensemble des questions posées quant à la définition de ce que recouvre l'environnement habituel ou l'ailleurs.

Afin de passer outre ces questionnements, certains auteurs (Stock et al., 2003) proposent une nouvelle approche qui se base sur les pratiques des touristes et sur le rapport qu'ils entretiennent avec le temps et les lieux. Il s'agit en somme de remettre l'individu – le touriste – au centre de la réflexion. Ainsi un touriste est un individu qui a des pratiques touristiques. Reste à définir ce qu'est une pratique touristique. Fondamentalement, celle-ci se rattache aux pratiques de mobilité tout en s'en distinguant par deux critères : le choix et le hors-quotidien. « *Ainsi entre le déplacement pour un congrès et le tourisme, tous les critères sont communs sauf celui du choix ou de l'obligation, tandis que ce qui différencie le tourisme des loisirs, c'est l'appartenance du tourisme au hors quotidien* » (Stock et al., 2003: 23). Le tourisme ne se réduit cependant pas uniquement aux pratiques des touristes, les lieux géographiques, les entreprises touristiques sont autant d'éléments qui en font partie. Dans le but de comprendre leur fonctionnement, le tourisme peut être envisagé comme un système (cf. chapitre 3). En conséquence de l'usage d'une approche systémique, la définition du tourisme suivante est proposée : « *Le tourisme est un système d'acteurs, de pratiques et d'espaces qui participent de la "recréation" des individus par le déplacement temporaire hors des lieux du quotidien* » (Knafo & Stock, 2003: 931). Le terme récréation étant entendu par ces auteurs comme incluant le repos, le jeu et la découverte. Notons que le tourisme d'affaires n'est pas retenu et que l'idée de hors quotidien est reprise malgré les difficultés à la définir comme nous l'avons démontré précédemment.

De plus, Clivaz (2008: 66) précise que « *baser le tourisme sur une rupture avec le quotidien (les vacances) devient de moins en moins possible, la distinction "quotidien" / "hors quotidien" perdant de sa pertinence* ». En effet, il semble que le tourisme s'avance à l'heure actuelle vers une nouvelle phase (Bourdeau, 2007b; Gaïdo, 2007). Celle-ci se définit par le fait que « *les vacances semblent être – surtout pour la jeune génération – le prolongement élargi et exacerbé (dans le sens de "poussé à son paroxysme") du temps libre urbain* » (Gaïdo, 2007: 198). Cette fusion du temps libre et des vacances est à rapprocher de celle de l'ici et de l'ailleurs (Bourdeau, 2003) ou encore de celle de la nature et de la culture dont nous parlions plus tôt. L'entre-deux est alors préconisé comme nouvelle grille de lecture : « *au-delà du dépassement de la rupture traditionnelle entre les espaces, le temps et les pratiques du quotidien et du hors-quotidien, se joue une hybridation croissante entre enracinement et mobilité, travail et loisirs, fonctions résidentielles, productives et récréatives, tourisme de proximité et de séjour, visiteurs-visités* » (Bourdeau, 2007b: 30). Ce mouvement semble être le signe précurseur d'un « *tourisme de crise* » (lié entre autre au réchauffement climatique ou au

vieillesse de la population) ou « *l'esquisse encore très floue d'un "post-tourisme" porteur de nouvelles valeurs de relocalisation et d'hybridation des pratiques résidentielles et récréatives dans un contexte d'adaptation et de repositionnement à long terme des sociétés contemporaines* » (Bourdeau, 2007b: 30).

Nous venons d'esquisser un bref tour d'horizon de quelques questionnements relatifs à la définition du tourisme. Celui-ci nous a permis de mettre en exergue la difficulté à le définir de manière satisfaisante tant le tourisme « *"est" plusieurs choses à la fois, parfois sans l'être* » (Dewailly, 2006: 62); un concept flou en somme qui a poussé nombre de chercheurs à renoncer à le définir. Pour notre part, nous reprenons la définition de Knafou & Stock (2003), citée plus haut, que nous modifions quelque peu afin, d'une part, d'y inclure le tourisme d'affaires et, d'autre part, de maintenir la distinction entre touristes et excursionnistes proposée par l'OMT. Dès lors,

« le tourisme est un système d'acteurs, de pratiques et d'espaces qui implique le déplacement temporaire des individus hors des lieux du quotidien. Les visiteurs qui passent au minimum une nuit dans le lieu visité sont nommés touristes alors que ceux qui se déplacent à la journée sont nommés excursionnistes. »

La distinction entre loisir et tourisme y est maintenue même si dans la réalité des statistiques de fréquentation, cette distinction n'est pas toujours possible. En effet, un individu qui utilise les remontées mécaniques de son village pratique un loisir puisqu'il se trouve dans le cadre du quotidien; il ne peut cependant être distingué d'un visiteur extérieur. Cette remarque est également valable en ce qui concerne la distinction entre touristes et excursionnistes. On se retrouve une nouvelle fois confronté à toute la difficulté à définir ce qu'est le tourisme. Un concept difficile à cerner disions-nous en préambule...

2.3.2. Une définition de la montagne

La montagne n'est pas moins un concept à géométrie variable que celui de tourisme. Il n'existe ainsi pas une définition de la montagne mais des définitions qui varient en fonction de l'approche disciplinaire dans laquelle elle prend place (Debarbieux, 2001a). La montagne peut être considérée comme un type de paysage, un type de milieu, un ensemble d'écosystèmes, un type de régions

géographiques, un motif (pour les historiens de l'art, par exemple), une figure géographique ou encore une représentation géographique (Debarbieux, 2001a). Au sein même de la géographie, la montagne revêt plusieurs statuts (Debarbieux, 1989b, 2001b). Ce qui pourrait les rassembler c'est l'idée qu'il existe une spécificité montagnarde (Chamussy, 1989), par contre la manière de la comprendre diffère fortement d'un chercheur à l'autre (Debarbieux, 1989a). Une première divergence découle de l'orientation de la recherche : soit le terrain d'étude (dans ce cas la montagne) est privilégié, ce qui induit une problématique et une méthodologie spécifique, soit c'est la problématique et la démarche qui sont prioritaires, la montagne n'est qu'un terrain de recherche possible parmi d'autres (Gumuchian, 1989). Les autres distinctions sont, quant à elles, généralement relatives au courant géographique auquel se rattache le chercheur.

Lors de la mise en place de politiques axées sur les zones de montagne, dans la plupart des pays, c'est l'altitude qui délimite lesdites zones (Nordregio, 2004). La pente y est souvent associée comme c'est le cas pour la définition retenue par le Centre mondial de surveillance de la conservation du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE-WCMC) (Kapos et al., 2000). D'autres critères tels le climat, la topographie ou encore l'accessibilité sont aussi parfois utilisés. Il en est ainsi de la définition des quatre zones de montagne (dénommées zones de montagne I à IV) adoptée par la Suisse dans le cadre de la délimitation des zones agricoles pour l'octroi de subventions. « *Leur délimitation se fait en fonction des trois critères suivants dans l'ordre décroissant de leur importance : a) les conditions climatiques, notamment la durée de la période de végétation; b) les voies de communication, notamment la desserte à partir du village ou du centre le plus proche; c) la configuration du terrain, notamment la part des terrains en pente et en forte pente* » (OFAG, 2011).

Pour cette étude, nous ne retiendrons de la montagne que l'aspect altitudinal, soit en principe tous lieux situés à une altitude supérieure à 800 m. En fonction des besoins, nous pourrions également distinguer la basse montagne que nous fixons aux altitudes comprises entre 800 et 1500 m, la moyenne montagne entre 1500 à 2200 m (qui correspond à peu près à la limite supérieure de la prairie alpine continue (Chardon, 1989)) et la haute montagne au-dessus de 2200 m. Lorsque nous nous intéressons à la recherche de la fraîcheur des montagnes par les touristes lors de grandes chaleurs en plaine (chapitre 6), nous remontons ce seuil à 1000 m, sans pour autant ne plus considérer les régions entre 800 et 1000 m comme appartenant à la montagne. La raison de l'usage de ce seuil est que les régions situées au-dessus de cette altitude ne devraient pas connaître de changement dans le nombre de jours atteignant des températures stressantes pour l'organisme (Matzarakis et al., 2007a).

2.4. L'APPORT DE L'INTER- ET TRANSDISCIPLINARITÉ

2.4.1. L'interdisciplinarité dans l'étude du changement climatique et du tourisme

Que ce soit dans le cadre de l'étude du changement climatique ou de celle du tourisme, l'interdisciplinarité est essentielle, puisque toutes deux sont l'objet de recherches de la part de différentes disciplines scientifiques (géographie, physique, économie, sociologie, etc.). La plupart du temps, il s'agit cependant de pluri- ou multidisciplinarité, « *simple transmission de connaissance d'une discipline à l'autre* » (Clivaz, 2008: 68). Par notre regard de géographe, qui est « *par essence transdisciplinaire* » puisque la géographie peut être définie « *comme étant l'interface de la nature et de la culture dans l'ordre spatial* » (Péguy, 1989: 205), nous dépassons la multidisciplinarité. Mais plus que de transdisciplinarité, nous parlerons ici d'interdisciplinarité qui implique l'interaction et la collaboration de deux ou plusieurs disciplines scientifiques lors de l'analyse d'un objet. En effet, la transdisciplinarité recouvre une perspective trop large pour la majeure partie de cette étude étant donné qu'elle associe les acteurs externes au domaine scientifique dans le mécanisme de construction des connaissances ou, si l'on se réfère à une définition plus épistémologique et théorique, puisque c'est « *un processus de connaissances qui va au-delà des frontières disciplinaires dans une perspective systémique, globale et intégrée* » (Darbelley & Paulsen, 2008: 4). Nous y faisons cependant une incursion lors de la réflexion autour du concept de sécurité d'enneigement (chapitre 5), car la construction de notre analyse se base en partie sur des connaissances acquises auprès des experts externes au domaine scientifique.

Si nous prôtons l'interdisciplinarité pour l'étude du changement climatique et du tourisme, c'est que nous pensons que ni l'une ni l'autre ne peut être considérée comme appartenant à une discipline scientifique propre. Ceci n'est pas contesté en ce qui concerne l'étude du changement climatique qui est traitée par de nombreuses disciplines (physique, sciences de l'atmosphère, géographie, climatologie, etc.). Il en va tout autrement pour le tourisme. Depuis les années 1960, le débat de savoir s'il serait judicieux ou non de créer une science du tourisme est régulièrement relancé (Clivaz, 2001, 2008). Mais, selon Clivaz (2008: 70-71), c'est surtout « *la volonté de la part de certains chercheurs de faire reconnaître leur champ d'étude au sein du monde académique* » qui les poussent

à revendiquer le tourisme comme une discipline scientifique propre. Toujours selon cet auteur, le défi actuel pour la recherche sur le tourisme est de passer de la pluridisciplinarité à l'interdisciplinarité. Nous partageons ce constat. L'approche systémique du tourisme proposée dès les années 1980 a permis de s'en approcher mais le chemin est encore long puisqu'aucun modèle global du tourisme n'est à l'heure actuelle accepté par tous (Clivaz, 2008). La difficulté à définir ce qu'est le tourisme en est peut-être la cause.

2.4.2. La climatologie touristique : une approche interdisciplinaire à l'interface des sciences naturelles et humaines

Nous venons d'esquisser que, de par notre formation, notre regard sur nos deux objets d'étude est géographique; tantôt rattaché aux sciences de la nature lorsqu'il s'agit de climatologie, tantôt à celles des sciences humaines lorsqu'il s'agit de tourisme. Notre approche s'intègre ainsi complètement au champ de la climatologie appliquée au tourisme, traditionnellement couverte par les deux branches de la géographie précédemment citées : la géographie du tourisme et la climatologie (Gomez Martin, 2005). Les études dans ce domaine sont généralement regroupées sous le terme générique de climatologie touristique et se sont pour la plupart intéressées à l'impact du climat sur les comportements touristiques. Plusieurs indices climatiques spécifiques au tourisme (p.ex. Tourism Climatic Index (Mieczkowski, 1985)) ont ainsi été élaborés. Les études y faisant référence se rapprochent des recherches en bioclimatologie.

Jusqu'à la fin des années 1990 et contrairement aux autres secteurs d'activités humaines (agriculture notamment), très peu d'études sur le tourisme se sont intéressées aux impacts du changement climatique sur ce secteur d'activités ni aux retombées négatives de celui-ci sur le changement climatique (Goessling & Hall, 2006a; Scott & Becken, 2010; Viner, 2006). C'est seulement à partir de la toute fin du 20^{ème} siècle que cette thématique a réellement été investiguée.

Depuis lors, les études qui s'intéressent aux changements climatiques et au tourisme peuvent être séparées en deux champs principaux (figure 2.4.1). D'une part, il y a les études qui traitent de l'impact du tourisme sur les changements climatiques ou plus précisément des émissions de gaz à effet de serre imputables au tourisme (p. ex. Becken, 2002; Becken et al., 2001; Becken & Simmons, 2002; Becken et al., 2003; Peeters et al., 2006; Perch-Nielsen, 2008; Scott et al., 2010), et, d'autre part, celles qui s'intéressent à l'impact des changements climatiques sur le tourisme. Ce champ

d'études regroupe plusieurs approches. Nous les avons rassemblées en quatre catégories aux limites floues; l'appartenance à l'une ou l'autre de ces catégories n'étant pas toujours nette. La plupart de ces études faisant appel à l'interdisciplinarité, elles mélangent les outils méthodologiques et conceptuels de l'économie, de la géographie et/ou de la sociologie à ceux de la climatologie.

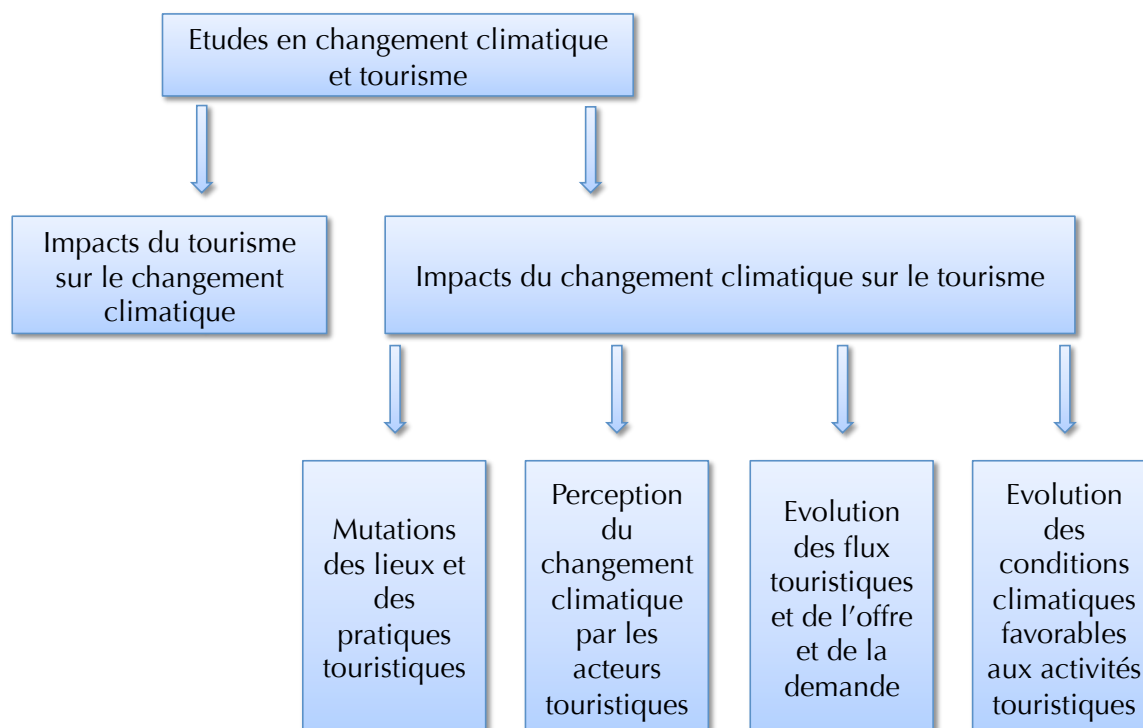


Figure 2.4.1 : Etudes en changement climatique et tourisme

Une première catégorie regroupe les études qui investiguent notamment les mutations des lieux et pratiques touristiques suite au changement climatique (p. ex. Bourdeau, 2007a; Bourdeau, 2009). Celles-ci se rattachent à la géographie culturelle. En deuxième lieu, nous distinguons les études liées à la perception du changement climatique par les acteurs touristiques ou plus généralement aux préférences climatiques des touristes (Goessling et al., 2006; Scott et al., 2007a, 2008). Ces études peuvent également être apparentées à la géographie culturelle ou sociale, ou à la sociologie. Troisièmement, nous distinguons les études qui s'intéressent à l'évolution des flux et/ou de l'offre et de la demande touristique ou encore aux retombées économiques imputables au changement climatique pour le secteur touristique. Pour ce faire, elles empruntent des méthodes provenant des

sciences économiques et politiques (p. ex. Abegg, 1996; Abegg et al., 2007; Bark et al., 2010; Berritella et al., 2006; Buerki, 2000; Buerki et al., 2007; Dawson et al., 2007, 2009; Elsasser & Buerki, 2002; Elsasser & Messerli, 2001; Goessling & Hall, 2006b, c; Gomez Martin, 2006; Gonseth, 2008; Hamilton & Tol, 2007; Hamilton & Lau, 2006; Lise & Tol, 2002; Maddison, 2001; Moen & Fredman, 2007; Noethiger et al., 2006; Perry, 2005; Richardson & Loomis, 2004; Richardson & Loomis, 2005; Scott, 2006; Scott & Dawson, 2007; Scott et al., 2007c; Scott & McBoyle, 2007; Scott et al., 2003; Scott et al., 2007d; Scott et al., 2006; Toeglhofer et al., 2011). La quatrième catégorie, est liée aux recherches en climatologie appliquée et en utilise les méthodes. Elle s'intéresse ainsi à l'évolution des conditions climatiques favorables à la pratique des activités touristiques (p. ex. Amelung & Viner, 2006; Matzarakis, 2007; Matzarakis & Endler, 2010; Matzarakis et al., 2007a; Matzarakis et al., 2007b; Moen & Fredman, 2007; Perch-Nielsen et al., 2010; Pickering & Buckley, 2010; Ruttly & Scott, 2010; Scott et al., 2007b; Scott et al., 2004; Steiger, 2007, 2010; Steiger & Mayer, 2008; Yu et al., 2009). C'est à cette catégorie que nous nous rattachons.

Quelle que soit l'approche à laquelle appartient telle ou telle recherche, les saisons touristiques étudiées sont, à quelques rares exceptions près, l'été pour les régions balnéaires et l'hiver pour les régions de montagne. Enfin, toutes ces études analysent les conditions passées ou actuelles, ou proposent des scénarios pour le futur.

Les études qui se sont intéressées aux impacts potentiels du changement climatique sur le tourisme de montagne peuvent grossièrement être classées en deux catégories liées à la saison (hivernale ou estivale). Cependant, c'est essentiellement l'hiver qui a retenu l'attention des chercheurs (notamment Abegg, 1996; Abegg et al., 2007; Bark et al., 2010; Bourdeau, 2007a; Buerki, 2000; Buerki et al., 2007; Dawson et al., 2007, 2009; Elsasser & Buerki, 2002; Elsasser & Messerli, 2001; Gonseth, 2008; Moen & Fredman, 2007; Richardson & Loomis, 2005; Scott, 2006; Scott & Dawson, 2007; Scott et al., 2007c; Scott & McBoyle, 2007; Scott et al., 2003; Scott et al., 2007d; Scott et al., 2006; Steiger, 2007, 2010; Steiger & Mayer, 2008; Toeglhofer et al., 2011). Ces derniers se sont prioritairement penchés sur l'impact d'une diminution de l'enneigement sur les retombées économiques du secteur touristique hivernal, soit essentiellement sur la pratique du ski alpin. Les principales régions concernées par celui-ci (Alpes, Amérique du Nord, pays scandinaves, Australie et Nouvelle-Zélande) ont ainsi été étudiées. Par extension, les études récentes se sont penchées sur les possibilités offertes par l'enneigement artificiel.

Les études (Bourdeau, 2009; Matzarakis et al., 2007a; Scott et al., 2007b) qui se sont uniquement intéressées aux impacts potentiels du changement climatique sur le tourisme estival de montagne sont nettement moins nombreuses que celles concernant le tourisme hivernal. Quelques études

(Amelung & Viner, 2006; Hamilton et al., 2005; Perch-Nielsen, 2008; Perch-Nielsen et al., 2010; Perry, 2005; Rutty & Scott, 2010), qui s'intéressent à l'évolution climatique favorable aux pratiques touristiques estivales à l'échelle européenne et aux grandes mutations que cela pourrait engendrer, abordent également brièvement cet aspect.

2.5. LES QUESTIONNEMENTS ACTUELS CONCERNANT LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TOURISME DE MONTAGNE

2.5.1. Bref état des lieux des connaissances actuelles concernant le changement climatique en Suisse

Certaines variables climatiques subissent actuellement une évolution rapide liée au changement climatique (IPCC, 2007a). Ces changements auront des conséquences sur les sociétés humaines et la pratique de diverses activités dont le tourisme. Les questionnements actuels des chercheurs s'orientent vers l'évolution passée et future de ces variables.

Evolution passée et actuelle du climat

On sait que durant le 20^{ème} siècle, les températures annuelles moyennes ont augmenté de 0,8 °C en Europe (IPCC, 2007b). Pour la période 1979 à 2005, cette augmentation est même plus importante puisqu'elle a atteint 0,41 °C par décennie (IPCC, 2007b; Jones & Moberg, 2003). En Suisse, on observe un schéma identique mais avec une augmentation plus importante durant le 20^{ème} siècle, entre 0,9 °C / 100 ans et 1,1 °C / 100 ans pour les stations au nord des Alpes (Begert et al., 2005).

Depuis les années 1970, cet accroissement s'est fait dans des proportions encore plus élevées avec 0,57 °C par décennie en moyenne suisse (Rebetez & Reinhard, 2008). Il est à noter que cette tendance à la hausse des températures a été plus marquée au printemps et en été et s'est montrée la plus faible en automne (Rebetez & Reinhard, 2008).

En hiver, tout comme pour les valeurs annuelles, une augmentation plus importante des températures s'est produite depuis la fin des années 1970. Le dernier hiver extrêmement froid survenu en Suisse date de 1963. D'autre part, les périodes les plus froides sont devenues rares. L'augmentation des températures est plus importante pour les jours les plus froids que pour les jours les plus chauds (Rebetez, 2011). Par ailleurs, l'isotherme 0 °C se situe actuellement en moyenne aux environs de 900 m d'altitude. Depuis les années 1960, il est ainsi monté de 300 m (Scherrer & Appenzeller, 2006).

En été, l'augmentation des températures implique également l'augmentation du nombre de jours caniculaires (Della-Marta et al., 2007a; Della-Marta et al., 2007b; Rebetez, 2004; Rebetez et al., 2006; Schaer et al., 2004; Seneviratne et al., 2006; Stott et al., 2004). Cela se voit déjà dans les stations de plaine telle Neuchâtel (figure 2.5.1). La figure 2.5.1 met clairement en évidence l'augmentation des périodes caniculaires depuis le milieu des années 1970. Le nombre maximal de jours très chauds du début du 20^{ème} siècle est inférieur au nombre minimal de jours très chauds des années de la fin de ce même siècle. Sur le flanc nord des Alpes, la fréquence des mois anormalement chauds (température de plus de 2 °C au-dessus de la moyenne à long terme) a de ce fait déjà augmenté d'environ 70% (OcCC-ProClim, 2007).

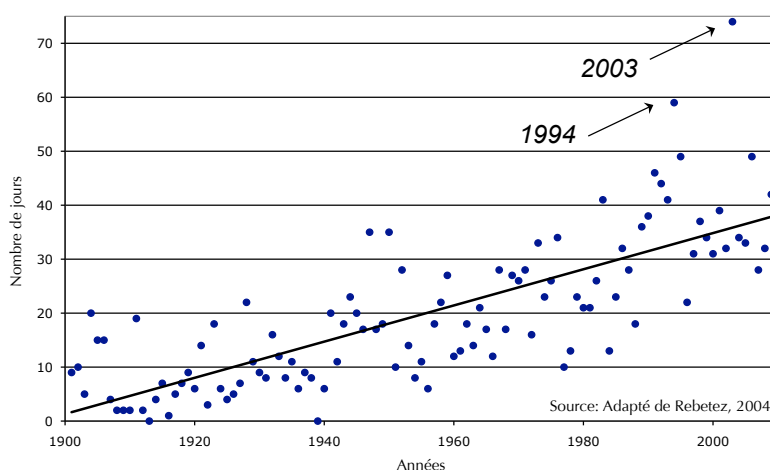


Figure 2.5.1 : Evolution passée du nombre de jours très chauds ($T_{min} >$ percentile 80) pour l'été (juin - juillet - août) de la station MétéoSuisse de Neuchâtel (adapté de Rebetez, 2004)

En ce qui concerne les précipitations, on sait qu'elles varient fortement d'une année à l'autre en Suisse. Cette forte variabilité fait qu'il est difficile de déterminer un changement significatif durant le siècle dernier et que les résultats obtenus doivent être pris avec précaution (North et al., 2007). En plaine, les hivers doux reçoivent généralement plus de précipitations. En montagne, c'est l'inverse qui se produit : plus il fait doux, moins il y a de précipitations. En été, cette distinction n'existe pas, quel que soit le lieu, les étés les plus frais sont les plus arrosés (Rebetez, 1996). Les précipitations actuelles sont plus abondantes en été qu'en hiver pour la plupart des régions en Suisse et devraient continuer à l'être même si les scénarios qui prévoient une diminution en été et une augmentation en hiver se confirment. Ce qui a surtout augmenté dans la plupart des régions du plateau et de la bordure nord des Alpes c'est la fréquence des fortes précipitations journalières et ce particulièrement en automne et en hiver avec une augmentation de 15 à 70% (North et al., 2007; OcCC-ProClim, 2007; Schmidli & Frei, 2005).

En Suisse, l'enneigement, tout comme les précipitations, varie fortement d'une année à l'autre mais également d'un mois à l'autre. Par ailleurs, en hiver, à basse et moyenne altitude, les précipitations sous forme de neige dépendent essentiellement de la température qu'il fait. Au-dessus de 2500 m par contre, il est rare que les précipitations ne tombent pas sous forme de neige, vu que les températures hivernales n'y dépassent pratiquement jamais l'isotherme 0 °C (Rebetez, 2011).

L'étude de l'évolution de l'enneigement nécessite la prise en compte de deux paramètres : les précipitations neigeuses mesurées en hauteur de neige fraîche et la couverture neigeuse qui correspond à la hauteur de la neige mesurée au sol. Les précipitations neigeuses sont dépendantes de la quantité de précipitations et de la température de l'air au moment où la neige tombe. L'enneigement, quant à lui, dépend de multiples facteurs: quantité de précipitations, température de l'air au moment des précipitations, température de l'air durant toute la période d'enneigement, rayonnement solaire, vitesse et direction du vent, etc. (Rebetez, 2011).

On sait actuellement que l'enneigement a diminué durant le 20^{ème} siècle (IPCC, 2007a). En Suisse, si l'on analyse les 30 dernières années, cette diminution est déjà nettement visible pour les sites jusqu'à 1300 m (figure 2.5.2).

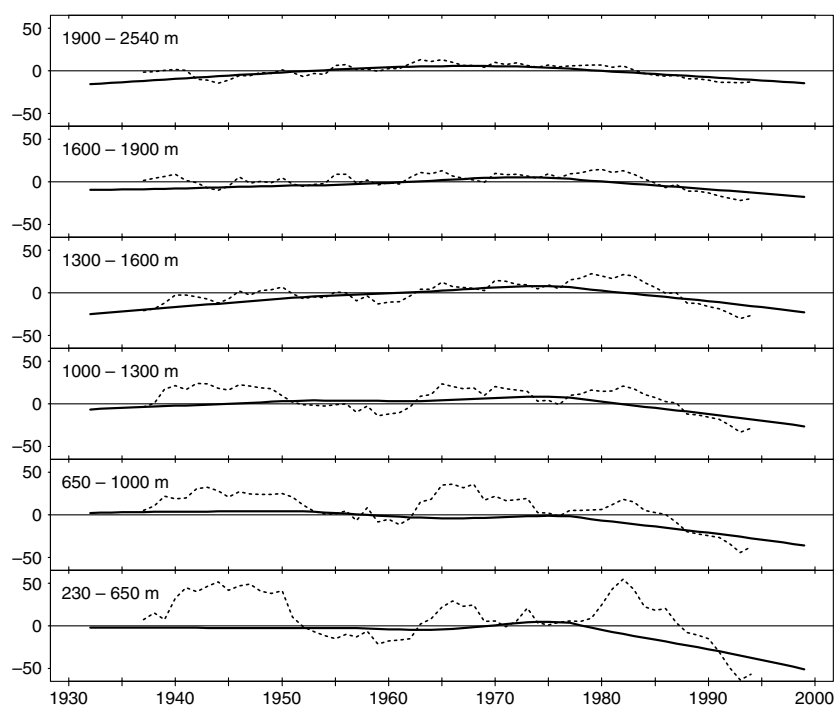


Figure 2.5.2 : Déviation relative [%] de la hauteur de neige moyenne hivernale (novembre à avril) par rapport à la moyenne à long terme. La ligne pointillée représente la moyenne mobile sur 11 ans et la ligne pleine la tendance à long terme. Les données (1932-1999) couvrent toutes les régions des Alpes suisses pour différentes altitudes (Latenser & Schneebeli, 2003).

On possède actuellement peu de résultats concernant l'ensoleillement et la couverture nuageuse. On sait cependant que l'ensoleillement a augmenté de 1 à 5% entre 1961 et 2010 et de 3 à 7% entre 1981 et 2010 en plaine (Scherrer et al., 2011). Il n'y a pas d'évolution significative dans les autres régions pour ces périodes. Baeriswyl et al. (1997) avaient toutefois mesuré une augmentation de l'ensoleillement hivernal dans certaines stations de montagne pour la période 1931-1994. En ce qui concerne la couverture nuageuse, suite à l'assèchement des marais, notamment de la plaine de l'Orbe, on a évalué une diminution du brouillard hivernal allant jusqu'à 2,5% durant la saison froide (octobre à mars) et jusqu'à 5% durant la saison chaude (avril à septembre) (Schneider & Eugster, 2007). On manque cependant encore d'études en ce domaine.

Enfin, l'évolution du vent est difficile à prévoir. Certains événements extrêmes survenus à la fin du 20^{ème} siècle (les ouragans Vivian et Lothar notamment) ont soulevé la question d'une augmentation de leur fréquence. Au niveau mondial, les modèles prévoient de manière probable une augmentation de l'intensité des cyclones tropicaux. Par contre, des incertitudes demeurent quant à leur fréquence (IPCC, 2007a). Il en est de même pour les prévisions concernant la Suisse et les régions situées aux latitudes similaires (Rebetez, 2011).

Projections futures

La modélisation du climat d'ici à la fin du 21^{ème} siècle se base, d'une part, sur des modèles climatiques et, d'autre part, sur des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Ces derniers ont été construits à l'aide d'hypothèses concernant notamment l'évolution démographique globale, les choix énergétiques potentiels et le développement de nouvelles technologies (IPCC, 2007a). La quantité d'émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique émise selon chacun de ces scénarios varie ainsi en fonction des hypothèses retenues.

Quels que soient les scénarios choisis, les modèles climatiques prévoient la poursuite de l'accroissement des températures globales pour les prochaines décennies (IPCC, 2007a). La teneur de cette augmentation reste cependant incertaine puisqu'elle dépendra de la quantité de gaz à effet de serre qui sera réellement émise dans l'atmosphère.

En Suisse, les résultats des projections des changements de température les plus récents se basent sur trois scénarios : A2, A1B et RCP3PD (figure 2.5.3, gauche) (CH2011, 2011). Le scénario RCP3PD est un scénario qui prévoit une diminution d'ici à 2050 de 50 % des gaz à effet de serre par rapport à 1990. Les deux autres scénarios sont considérés comme non-interventionnistes mais divergent notamment sur les avancées technologiques et le développement démographique. Quel que soit le scénario retenu, les modèles projettent une augmentation des températures. En cas de diminution drastique des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050 (scénario RCP3PD), on peut s'attendre à une augmentation de 1,4 °C pour la Suisse d'ici à la fin du 21^{ème} siècle. Lorsque les modèles se basent sur les deux autres scénarios, l'augmentation projetées pourraient même être multipliée par deux ou trois, que ce soit en moyenne suisse (figure 2.5.3, droite) ou au niveau des régions (figure 2.5.4) (CH2011, 2011).

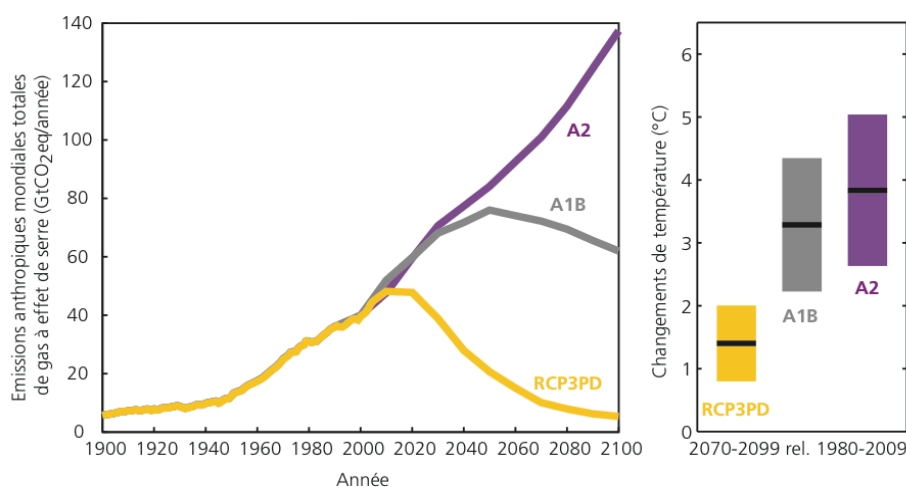


Figure 2.5.3 : Schéma d'évolution des trois scénarios d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre passés et futures, ainsi que les changements de température projetés pour la Suisse (valeur moyenne sur une période de 30 ans (2070–2099) centrée en 2085). «CO₂eq» est une unité de référence qui permet d'exprimer les autres gaz à effet de serre (comme le CH₄) en unités de CO₂ (CH2011, 2011: 9).

L'évolution des précipitations est nettement plus difficile à modéliser car la compréhension de ce phénomène météorologique est extrêmement complexe. A l'échelle européenne, les modèles projettent une augmentation des précipitations estivales en Europe du Nord et une diminution en Europe du Sud, alors que c'est l'inverse qui devrait se produire en hiver (CH2011, 2011). La Suisse devrait suivre cette tendance en ce qui concerne l'été; les modèles projetant une diminution des précipitations comprise entre 18 et 24% avec les scénarios A2 et A1B d'ici à la fin du siècle (CH2011, 2011), l'essentiel de la diminution étant attendue après 2050. De plus, la Suisse méridionale pourrait connaître une augmentation des précipitations en hiver. Par contre, de par son positionnement au milieu de l'Europe notamment, les projections concernant les autres saisons, et l'hiver pour la Suisse occidentale et nord-est, sont particulièrement incertaines. Aucune tendance nette ne ressort (figure 2.5.5) (CH2011, 2011). En d'autres termes, pour ces saisons, les précipitations pourraient augmenter, diminuer ou ne subir aucun changement.

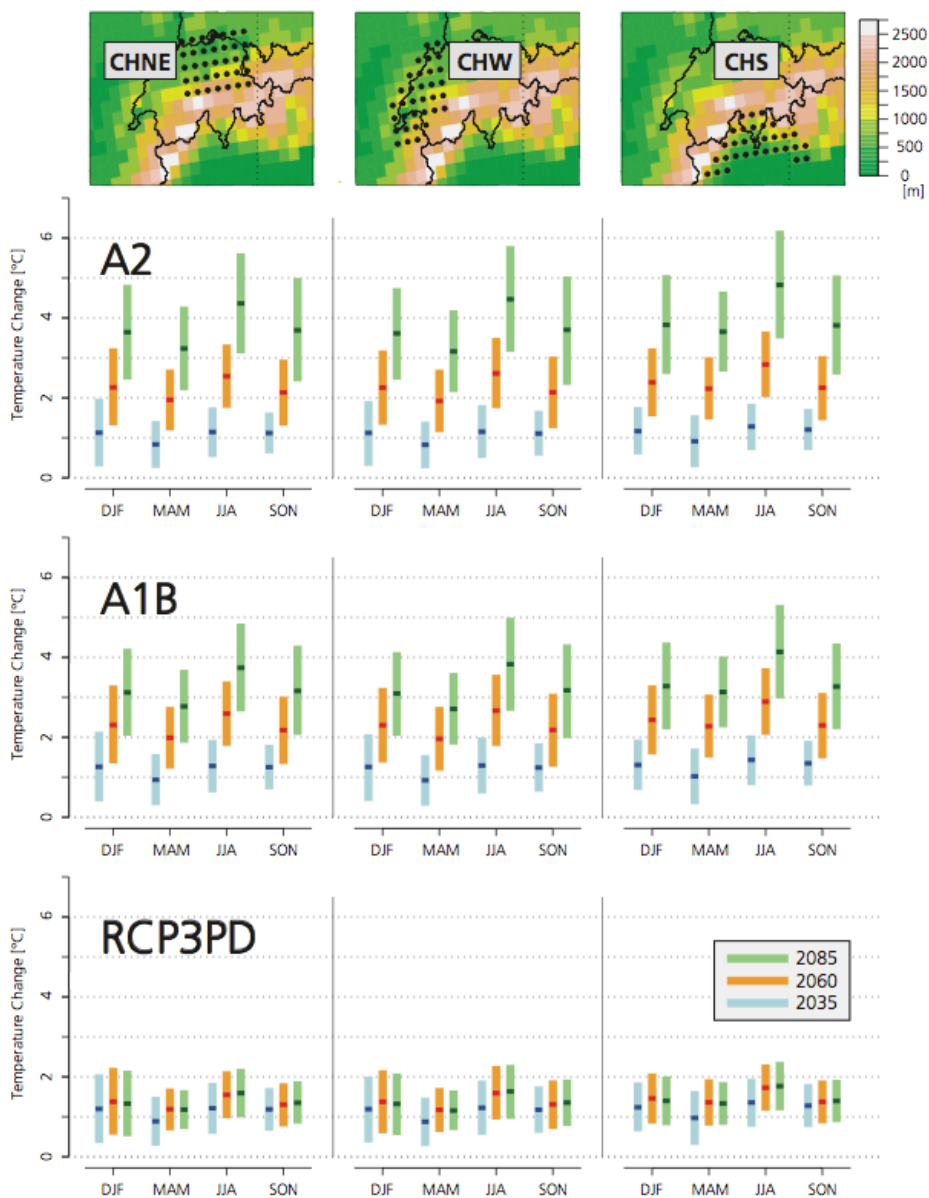


Figure 2.5.4 : Projections futures des changements de température [°C] pour toutes les saisons (hiver : DJF = décembre-février, printemps : MAM = mars-mai, été : JJA = juin-août, automne : SON = septembre-novembre) et pour trois régions de Suisse (CHNE= Suisse nord-est, CHW = Suisse occidentale, CHS = Suisse méridionale) par rapport à la période de référence 1980 à 2009 et selon trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A2, A1B et RCP3PD) (CH2011, 2011: 33).

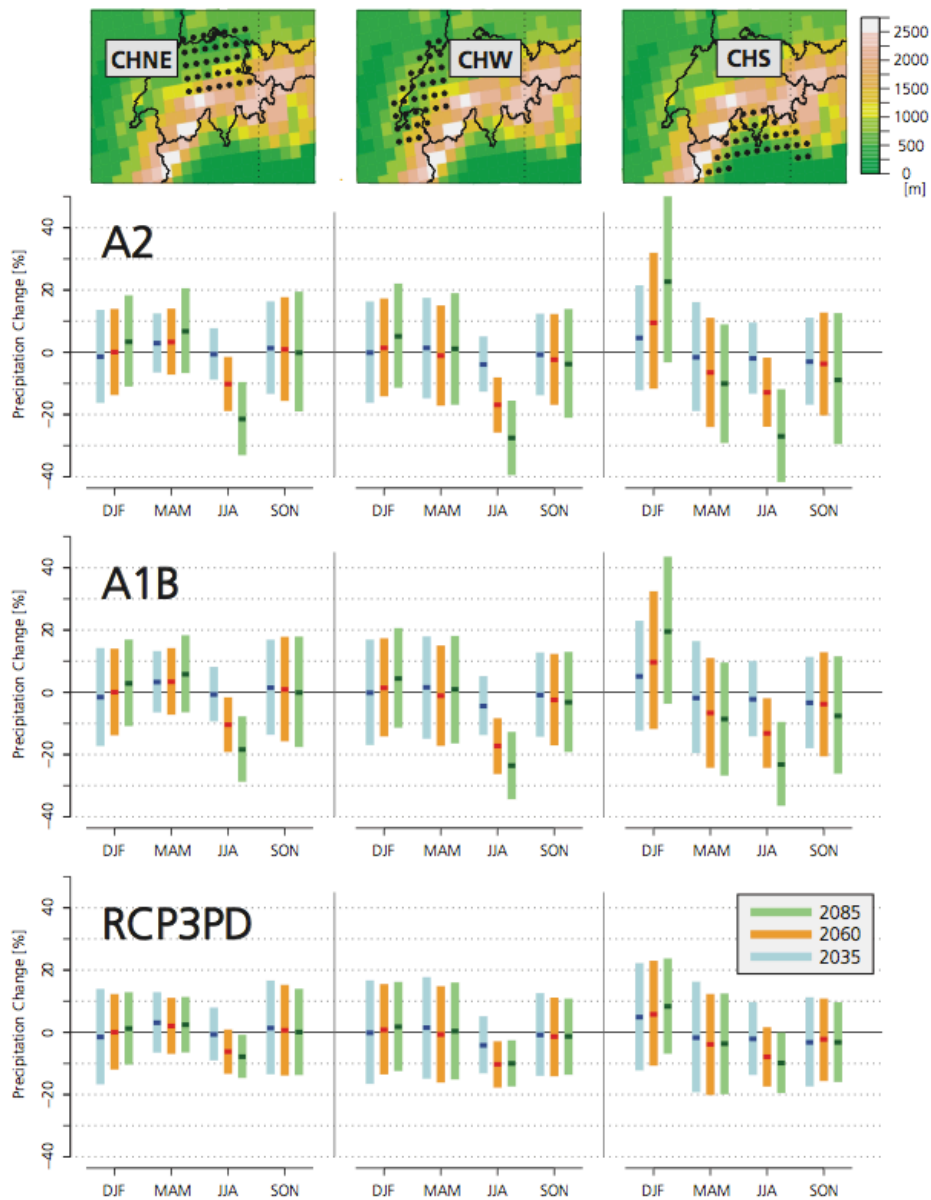


Figure 2.5.5 : Projections futures des changements de précipitations [%] pour toutes les saisons (hiver : DJF = décembre-février, printemps : MAM = mars-mai, été : JJA = juin-août, automne : SON = septembre-novembre) pour trois régions de Suisse (CHNE= Suisse nord-est, CHW = Suisse occidentale, CHS = Suisse méridionale) par rapport à la période de référence 1980 à 2009 et selon trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A2, A1B et RCP3PD) (CH2011, 2011: 37).

Par contre, on prévoit de manière probable une tendance à la hausse des événements extrêmes. D'ici à la fin du siècle, la Suisse devrait ainsi connaître plus de précipitations extrêmes et de jours de sécheresse (CH2011, 2011). Ceci risque de se traduire par davantage de longues périodes de sécheresse et d'épisodes de précipitations intenses.

En ce qui concerne l'enneigement, tous les scénarios IPCC (IPCC, 2007a) projettent une diminution de la couverture neigeuse particulièrement à basse altitude. De plus, à moyenne altitude (700 m) en Europe, les modèles prévoient une diminution de la durée de la couverture neigeuse de 30 jours pour chaque °C d'augmentation de température (Hantel & Hirtl-Wielke, 2007; IPCC, 2007b). D'ici 2050, l'isotherme 0 °C pourrait monter jusqu'à des altitudes comprises entre 1020 et 1520 m suivant la quantité de gaz à effet de serre émis (Occc-ProClim, 2007). Ceci aura pour corolaire d'augmenter d'autant la limite des chutes de neige.

En résumé, on sait actuellement que :

- La température moyenne en Suisse a augmenté durant le 20^{ème} siècle entre 0,9 °C / 100 ans et 1,1 °C / 100 ans pour les stations du nord des Alpes.
- Les projections futures prévoient la poursuite de l'augmentation des températures en Suisse durant le 21^{ème} siècle quel que soit le scénario d'émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique retenu.
- L'évolution passée et future des précipitations est moins claire que celle de la température; seul l'été présente une tendance future claire allant vers une diminution des précipitations pour toutes les régions de Suisse.
- On a cependant constaté une augmentation des événements extrêmes (précipitations intenses et période de sécheresse). Il est par ailleurs prévu que cette tendance se poursuive dans le futur.
- L'enneigement a diminué durant le 20^{ème} siècle à basse et moyenne altitude suite à l'élévation en altitude de l'isotherme 0 °C qui correspond à peu près à la limite des chutes de neige.
- Avec la poursuite de l'accroissement des températures, l'isotherme 0 °C continuera à s'élever en altitude ce qui aura pour corolaire d'augmenter d'autant la limite des chutes de neige.
- On a encore peu de connaissances concernant les autres paramètres météorologiques.

2.5.2. Connaissances actuelles concernant les conséquences du changement climatique sur le tourisme

Les résultats qui précèdent montrent qu'en hiver c'est essentiellement la diminution de l'enneigement qui pose et posera problème pour le tourisme. Une quantité suffisante d'enneigement durant la saison hivernale est un des principaux facteurs de sa réussite pour la majorité des prestataires touristiques et notamment pour les remontées mécaniques. Avec l'augmentation des températures ces dernières années et la diminution de l'enneigement depuis la fin des années 1980, un enneigement suffisant n'a pas été garanti chaque année aux altitudes les plus basses et risque de l'être de moins en moins dans les années à venir. Les questionnements actuels des chercheurs s'orientent ainsi en grande partie sur la viabilité des domaines skiables et les possibilités d'adaptation des stations qui dépendent dans une large mesure du ski alpin.

Afin de calculer la viabilité d'un domaine skiable, il est d'usage de modéliser la fiabilité de son enneigement (aussi nommé sécurité d'enneigement) ou de définir une ligne de fiabilité de l'enneigement. La première consiste à définir le nombre minimal de jours avec une quantité de neige suffisante pour assurer la viabilité des remontées mécaniques alors que le second définit l'altitude à partir de laquelle l'enneigement requis est suffisant. Les résultats des études récentes sont sensiblement tous les mêmes car toutes considèrent qu'il faut au minimum 100 jours du 1^{er} décembre au 15 avril avec un enneigement minimal de 30 cm pour qu'un domaine soit viable (Abegg, 1996; Abegg et al., 2007; Buerki, 2000; Elsasser & Buerki, 2002; Koenig & Abegg, 1997; Mueller & Weber, 2008; OcCC-ProClim, 2007). Elles diffèrent surtout par le nombre de domaines skiables retenus lors de l'analyse; certaines études ne prenant pas en considération les domaines de petites tailles soit de moins de trois installations de transport et de 5 km de pistes. La limite de la fiabilité d'enneigement a ainsi été calculée pour les années 2000 à 1200 m pour le nord des Alpes suisses ou 1500 m pour le sud. Les stations qui ont certaines ou toutes leurs pistes en dessous de ces seuils sont déjà en difficulté. Il s'agit pour les montagnes suisses essentiellement de la région du Jura et des Préalpes (table 2.5.1). Dans d'autres régions des Alpes, ce seuil altitudinal peut être différent.

Region	Number of ski resorts	Snow-reliability					
		1200 masl		1500 masl		1800 masl	
		No.	%	No.	%	No.	%
Jura	15	4	27	1	7	0	0
Alps (Vaud + Frib.)	19	16	84	7	37	4	21
Valais	54	54	100	52	96	40	74
Bern (ex. Jura)	35	30	86	20	57	12	34
Central Switzerland	35	26	74	13	37	7	20
Ticino	8	8	100	3	38	2	25
Eastern Switzerland	18	11	61	6	33	3	17
Grisons	46	46	100	42	91	33	72
Switzerland	230	195	85	144	63	101	44

Table 2.5.1 : Nombre de stations de ski suisses avec une fiabilité de l'enneigement pour l'année 2000 (Abegg, 1996; Buerki, 2000; Koenig & Abegg, 1997)

Dans les régions où la limite se situe actuellement à 1200 m, elle passera à 1350 m avec une augmentation des températures de 1 °C et à 1500 m avec une augmentation de 2 °C soit les prévisions pour approximativement 2050 (Abegg et al., 2007). De nombreux domaines risquent ainsi de ne plus avoir leur enneigement naturel assuré; seuls les domaines des Grisons et du Valais, qui sont situés à de plus hautes altitudes, ne devraient pas subir de grand changement (table 2.5.2).

Sécurité d'enneigement dans les domaines skiables suisses									
Région	Nombre de domaines skiables	Réchauffement							
		Aujourd'hui		+ 1°C*		+ 2°C*		+ 4°C*	
		Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%
Alpes VD+FR	17	17	100	11	64.7	9	52.9	1	5.9
Valais	49	49	100	49	100	49	100	39	79.6
Berne (sans Jura)	26	25	96.2	22	84.6	16	61.5	3	11.5
Suisse centrale	20	18	90	15	75	11	55	4	20
Tessin	4	4	100	3	75	2	50	0	0
Suisse orientale	12	10	83.3	7	58.3	7	58.3	1	8.3
Grisons	36	36	100	35	97.2	35	97.2	30	83.3
Suisse	164	159	97	142	86.6	129	78.7	78	47.6

* Horizon temporel: +1 °C: années 2020 env.; +2 °C: années 2050 env.; +4 °C: vers la fin du siècle.

Table 2.5.2 : Sécurité d'enneigement dans les domaines skiables suisses (Abegg et al., 2007)

Ces études présentent cependant certaines lacunes dont notamment celles de ne pas tenir compte des différences géomorphologiques et climatiques régionales, ni de prendre en compte l'enneigement artificiel (cf. chapitre 5). Pourtant, même si les résultats des tables 2.5.1 et 2.5.2 sont à reconsidérer, il est clair que la tendance générale est à l'augmentation des températures et à la diminution de l'enneigement des stations de ski de basse et moyenne altitudes.

Actuellement, en hiver l'attractivité de nombreuses stations de montagne est liée aux remontées mécaniques. Si celles-ci venaient à ne plus être viables, une partie des autres prestataires touristiques de la station en pâtiraient. Dès lors, plusieurs chercheurs préconisent la mise en place de mesures d'adaptation pour les stations de montagne fortement dépendantes du ski alpin (figure 2.5.6) (Abegg, 2011; Elsasser & Buerki, 2002; Elsasser & Messerli, 2001). Deux options ressortent, celles proposant le maintien du ski et celles suggérant son remplacement par d'autres activités hivernales et/ou par un développement plus important des autres saisons.



Figure 2.5.6 : Stratégies d'adaptation des stations de ski (adapté d'après Elsasser & Buerki, 2002)

L'enneigement artificiel est, à l'heure actuelle, la mesure d'adaptation la plus répandue dans les stations des Alpes suisses (Gonseth, 2008). Durant l'hiver 2009-2010, le pourcentage de la longueur totale des pistes de ski suisses enneigées artificiellement s'est élevé à près de 36% (figure 2.5.7) (RMS, 2010). Comme mentionné précédemment, les études qui se sont intéressées à la viabilité des domaines skiables suisses n'ont pas pris en compte ce facteur dans leurs analyses. Il en a été de même dans d'autres régions du monde, ce qui a eu pour conséquence que les pronostics de viabilité

des domaines skiables ont pu être revus à la hausse une fois l'enneigement artificiel inclus dans les analyses (Scott et al., 2006).

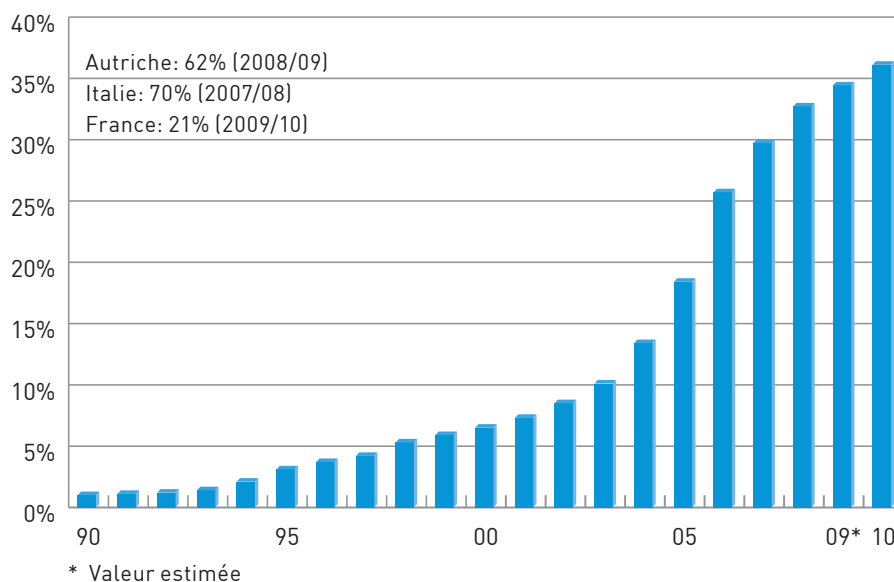


Figure 2.5.7 : Part des pistes enneigées techniquement sur l'ensemble de la surface de pistes préparées en Suisse (RMS, 2010)

Actuellement, l'enneigement artificiel est garanti sous nos latitudes aux altitudes supérieures à 1000 m de décembre à février pour 90% des hivers (Steiger & Mayer, 2008). Avec l'augmentation prévue des températures, le nombre de jours potentiels favorables à la production de la neige artificielle diminuera (Hennessy et al., 2008; Pickering & Buckley, 2010; Scott & Dawson, 2007; Scott et al., 2007c; Scott & McBoyle, 2007; Scott et al., 2003; Scott et al., 2007d; Scott et al., 2006; Steiger, 2007; Steiger & Mayer, 2008; Teich et al., 2007). Le problème se posera essentiellement pour le début de saison qui est la période pendant laquelle on a recours au maximum aux canons à neige. Avec une augmentation de 2 °C (soit approximativement pour 2050), on estime que le nombre de jours potentiels de fabrication de l'enneigement artificiel devrait diminuer d'environ 1/3 en novembre aux altitudes supérieures à 2000 m et dans les mêmes proportions en décembre aux altitudes comprises entre 1000 et 1500 m (Steiger & Mayer, 2008). Cependant, il est fort probable que ce qui sera le plus problématique pour les domaines skiables sera l'augmentation des coûts liés à

la production de neige artificielle (Pickering & Buckley, 2010; Scott et al., 2007d; Steiger, 2010; Steiger & Mayer, 2008). Ceci dépendra toutefois des progrès techniques accomplis dans ce domaine. En effet, des canons à neige plus performants, consommant moins d'énergie et pouvant produire de la neige artificielle à des températures plus élevées continuent à être développés. La disponibilité des ressources en eau pourrait également devenir un frein à l'enneigement mécanique pour les stations qui voit déjà leur demande en eau croître avec l'arrivée des touristes. En effet, avec l'augmentation des températures, les responsables des remontées mécaniques pourraient accroître l'usage des canons à neige et ainsi des ressources en eau, avec pour conséquence un risque de conflits d'usage de l'eau pour les stations (Badré et al., 2009).

En ce qui concerne la saison estivale, avec une augmentation générale des températures et du nombre de journées caniculaires, plusieurs études (Amelung & Viner, 2006; Ceron & Dubois, 2000; Hamilton & Tol, 2007; Hamilton et al., 2005; Maddison, 2001; Perch-Nielsen et al., 2010; Ruttu & Scott, 2010) prévoient une réorientation des destinations des touristes lors des grandes chaleurs (juin - juillet - août). Deux approches ont été proposées : celle analysant les conditions climatiques favorables à la pratiques des activités touristiques estivales (Amelung & Viner, 2006; Perch-Nielsen et al., 2010; Ruttu & Scott, 2010) et celles modélisant l'évolution des flux de touristes dans différentes régions du monde en lien avec le changement climatique (Hamilton & Tol, 2007; Hamilton et al., 2005; Maddison, 2001). Toutes deux arrivent aux mêmes conclusions, soit que le changement climatique devrait apporter une modification dans les destinations préférées des touristes. Les destinations les plus prisées devraient ainsi se situer plus au nord et plus en altitude. En effet, les températures caniculaires rendront les abords de la Méditerranée de plus en plus rédhibitoires (figure 2.5.8). Le tourisme mondial continuera cependant à croître à cause de l'augmentation de la population mondiale et de la croissance économique. Au niveau mondial, les conséquences liées au changement climatique devraient être moins importantes que celles relatives à ces deux facteurs (Hamilton et al., 2005).

Les résultats de ces études sont cependant très critiqués, notamment en raison de la faiblesse des modèles utilisés : insuffisances des bases de données statistiques, température considérée comme le plus important facteur climatique, importance des autres paramètres climatiques fortement inconnue, rôle des conditions météorologiques extrêmes inconnu, rôle de l'information lors de la prise de décision d'un voyage et des autres paramètres non climatiques peu clair, etc. (Goessling & Hall, 2006b, c). De plus, aucune étude n'avait jusqu'ici analysé si ce phénomène s'était déjà produit lors des périodes caniculaires que l'Europe a connues durant les étés des années 2000, ni même quantifié ce dernier.

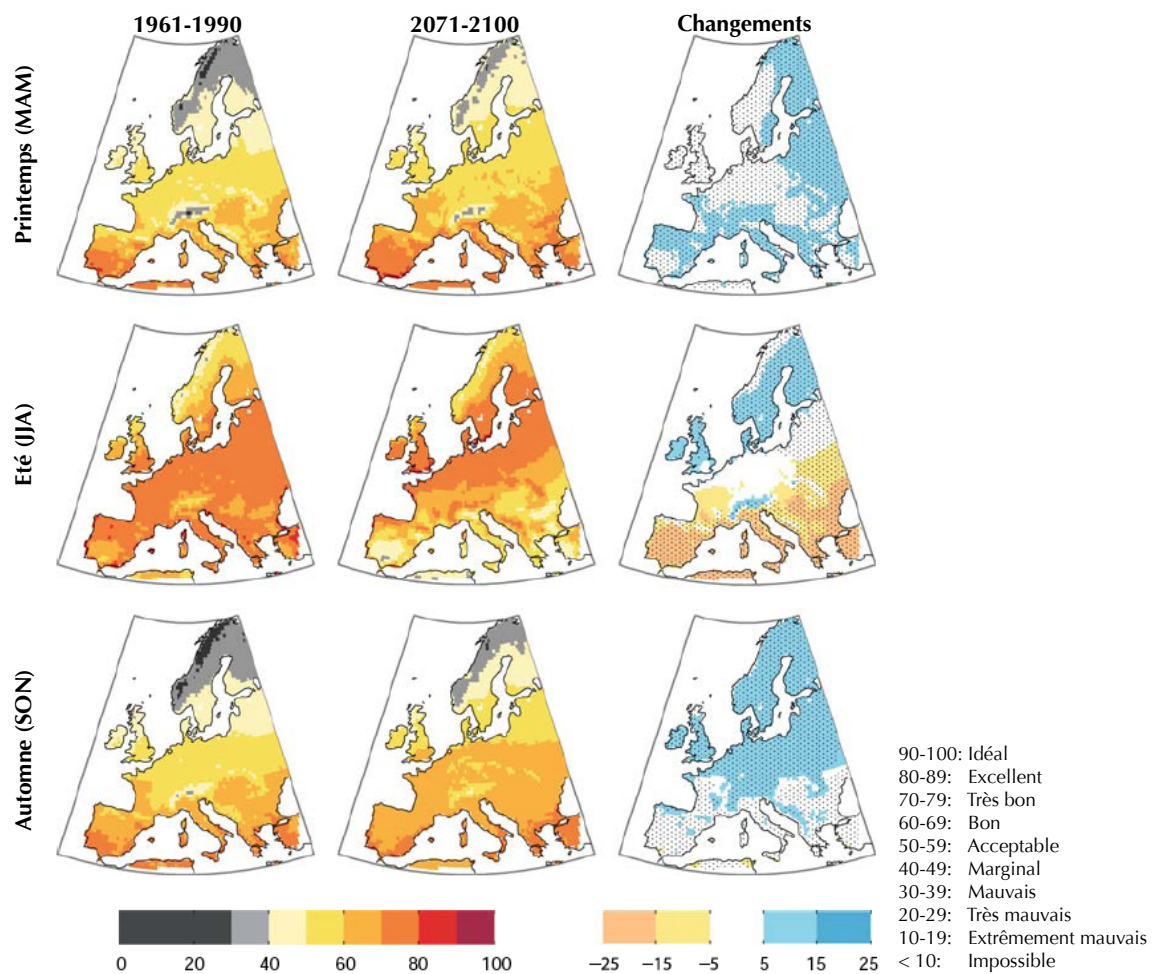


Figure 2.5.8 : Evolution des conditions climatiques favorables aux pratiques touristiques estivales en Europe et en Afrique du Nord (Perch-Nielsen et al., 2010). Pour chaque saison (printemps (mars - avril - mai), été (juin - juillet - août), automne (septembre - octobre - novembre)), la situation de référence actuelle (1961-1990, à gauche) des conditions climatiques favorables aux pratiques touristiques estivales (en orange et rouge) est comparée à celle de la fin du siècle (2071-2100, au milieu). La différence (à droite) montre les régions qui bénéficieront de meilleures conditions à la fin du 21^{ème} siècle (en bleu), ne subiront pas de modifications significatives (en blanc) ou verront leurs conditions se dégrader (en jaune ou orange).

D'autres études (Dubois et al., 2009; Goessling et al., 2006; Gomez Martin, 2006; Hamilton & Lau, 2006; Lohmann & Kaim, 1999; Scott et al., 2008) se sont attelées à l'analyse des conditions météorologiques estivales considérées comme favorables par les touristes, ainsi qu'aux informations météorologiques qu'ils consultent avant leur séjour. Celles-ci ne sont pas directement liées au changement climatique mais elles permettent de poser les bases des futurs scénarios d'évolution des flux et de la demande touristiques. Cependant, les divergences dans les résultats obtenus nous poussent à dire qu'il est extrêmement difficile de déterminer les variables qui ont le plus d'importance pour la pratique des activités touristiques. Ainsi, lorsque ce sont des touristes allemands qui sont interrogés, il ressort que le climat arrive en première position des facteurs influençant le choix d'une destination (table 2.5.3).

	<i>1st position value = 3</i>	<i>2nd position value = 2</i>	<i>3rd position value = 1</i>	<i>Not chosen value = 0</i>	<i>Total chosen</i>	<i>Mean</i>
Climate	91	65	40	174	196	1.20
Nature/landscape	62	58	36	214	156	0.91
Cultural/historical/attractions	60	50	33	227	143	0.85
Access to the sea/lakes	53	79	56	182	188	1.01
Price	17	61	48	244	126	0.60
Hospitality	17	38	35	280	90	0.44
Accommodation	14	33	22	301	69	0.35
Sport and leisure activities	8	22	19	321	49	0.24
Ease of access	3	22	23	322	48	0.21
Cuisine	2	12	10	346	24	0.11

Table 2.5.3 : Résultats pour les touristes allemands de l'importance des attributs des destinations touristiques (d'après Hamilton & Lau, 2006: 241)

Par contre, lorsque ce sont des touristes français que l'on interroge, le climat descend à la quatrième position (figure 2.5.9). Les auteurs mentionnent le fait que la distribution du questionnaire en pleine crise économique pourrait expliquer la première position du coût financier (Dubois et al., 2009).

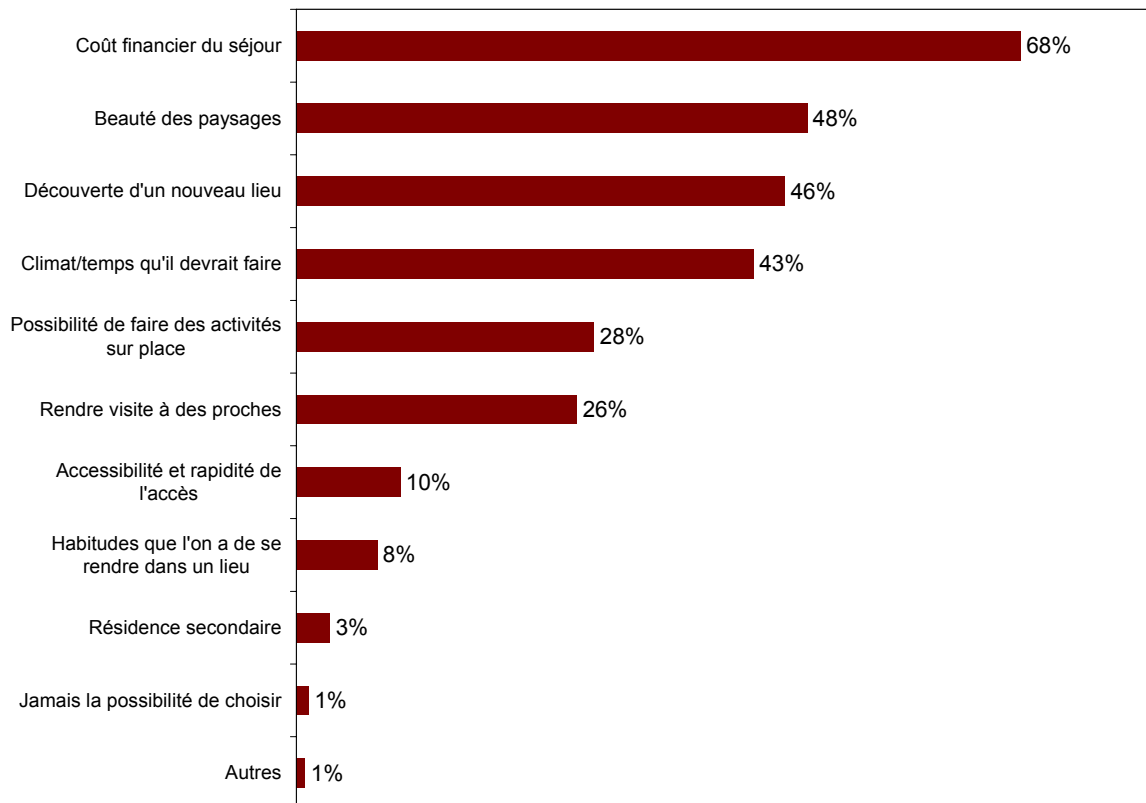


Figure 2.5.9: Résultats pour les touristes français de l'importance des attributs pour des destinations touristiques (Dubois et al., 2009: 30)

Les résultats concernant les variables climatiques susceptibles de nuire le plus à la réussite du futur séjour ne sont, eux non plus, pas identiques d'une étude à l'autre. Ainsi, c'est par exemple un temps pluvieux qui sort en première position pour les touristes français (figure 2.5.10). Par contre, les touristes Canadiens, Néo-Zélandais et Suédois, ne considèrent le temps pluvieux comme problématique que pour la montagne (table 2.5.4).

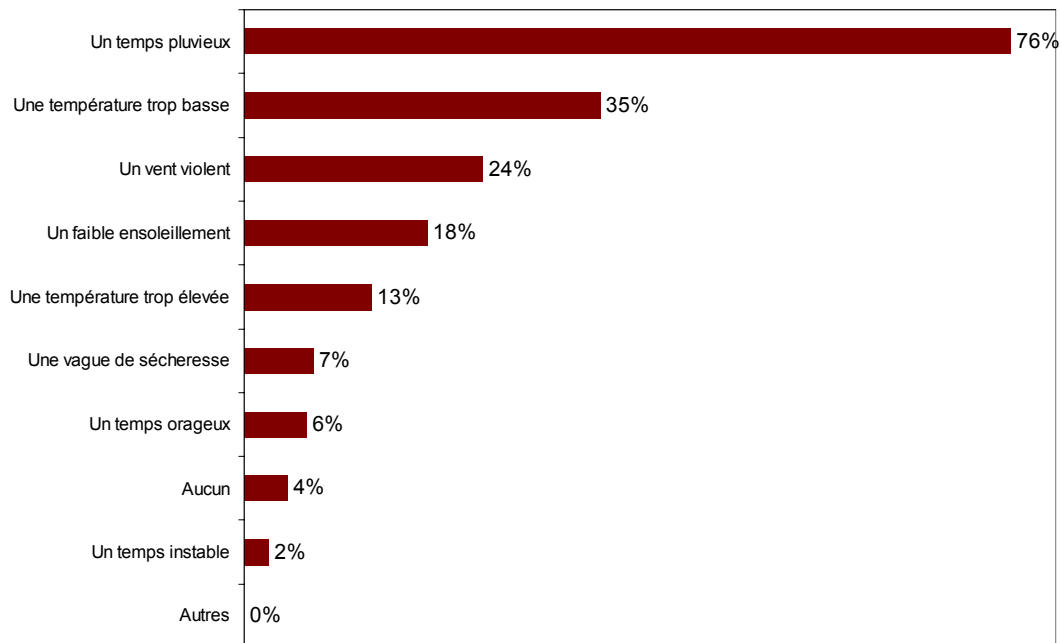


Figure 2.5.10: Eléments du climat susceptibles de nuire le plus à la réussite du futur séjour pour les touristes français (3 réponses possibles) (Dubois et al., 2009: 34)

	Rang selon l'importance			
	1	2	3	4
Plage	Soleil	Temp	Pluie	Vent
<i>Moyenne</i>	6.14	6.11	5.87	5.13
Ville	Temp	Pluie	Soleil	Vent
<i>Moyenne</i>	5.98	5.77	5.14	4.75
Montagne	Pluie	Temp	Soleil	Vent
<i>Moyenne</i>	6.04	5.84	5.55	5.41

Table 2.5.4 : Importance des variables météorologiques pour différents environnements touristiques pour les touristes Canadiens, Néo-Zélandais et Suédois. « Temp » : température confortable, « Pluie » : absence de pluie, « Vent » : absence de fort vent, « Soleil » : présence de soleil. La moyenne donne l'importance relative de chaque variable (de 1 = pas important à 7 = extrêmement important) (d'après Scott et al., 2008: 68).

Les divergences entre ces résultats sont peut-être dues aux méthodes utilisées pour recueillir les données, puisque celles-ci, ainsi que les questions posées, ne sont pas exactement identiques d'une étude à l'autre. La taille du groupe de touristes consultés et la période durant laquelle a eu lieu l'enquête pourraient également avoir une influence. Notons toutefois que le climat reste parmi les facteurs les plus cités par les touristes lorsqu'ils choisissent une destination.

En conclusion de ce chapitre, rappelons que les études sur le changement climatique et le tourisme de montagne ont actuellement pour principale orientation de recherche les conséquences de la diminution de l'enneigement sur le secteur touristique. Le développement potentiel du tourisme estival en montagne, dû à l'augmentation des périodes caniculaires en plaine et aux abords de la Méditerranée, constitue un second axe de recherche. Jusqu'à présent, il est cependant resté secondaire, puisqu'abordé en marge de recherches qui n'ont pas pour objet d'étude le tourisme des régions de montagne.

Les résultats actuels laissent toutefois penser que le changement climatique pourrait avoir des conséquences négatives pour le tourisme de montagne en hiver alors qu'elles seraient positives en été. Bourdeau (2009) voit dans cette évolution un retour potentiel à la saisonnalité des destinations qui prévalait au milieu du 19^{ème} siècle, soit qu'en été les destinations préférées des touristes pourraient se situer en montagne et en hiver au bord de la mer, alors que c'est l'inverse qui se produit majoritairement actuellement en Europe (figure 2.5.11).

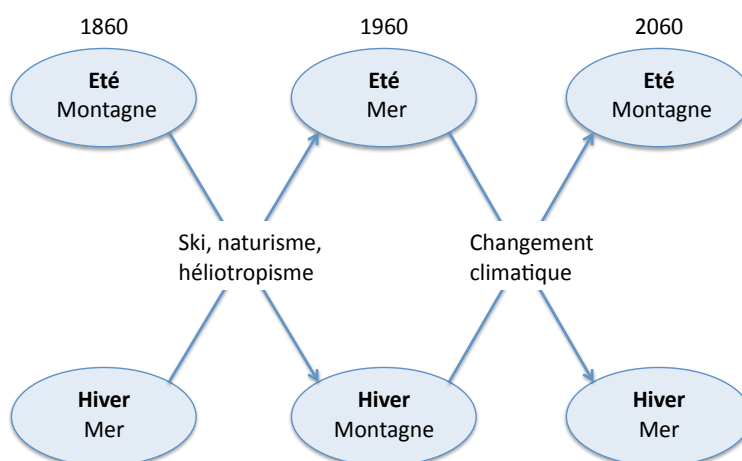


Figure 2.5.11 : Vers un renversement saisonnier de la polarité du tourisme? (Adapté de Bourdeau, 2009)

Ceci reste toutefois de l'ordre de l'hypothèse puisqu'il est extrêmement difficile de prévoir la demande touristique future. Celle-ci dépend en effet de bien d'autres facteurs que le climat, comme le montrent la table 2.5.3 et la figure 2.5.9 présentées ci-dessus. De plus, la capacité d'adaptation des touristes aux conditions climatiques futures est difficile à anticiper (cf. chapitre 2.8.4.).

2.6. PROBLÉMATIQUE

Au chapitre précédent, nous avons mentionné que les études actuelles concernant les conséquences du changement climatique sur le tourisme de montagne se sont essentiellement focalisées sur les conséquences de la diminution de l'enneigement pour le tourisme hivernal. Par ailleurs, en marge d'études de modélisation des flux touristiques européens futurs ou des conditions climatiques favorables au tourisme à l'échelle européenne, l'évolution touristique estivale potentielle des régions de montagne a été abordée. De nombreuses questions restent cependant encore sans réponse. Il manque notamment toujours d'études à l'échelle locale concernant l'évolution des paramètres climatiques susceptibles d'avoir un impact sur le tourisme de montagne en lien avec le changement climatique.

La problématique de notre recherche relève de ces questionnements. Nous les abordons en analysant l'évolution de l'enneigement à travers l'étude des précipitations neigeuses, ainsi que les facteurs qui influencent l'enneigement des zones d'activités touristiques telles les pistes de ski. Un second volet de cette étude a trait à la saison d'été et étudie l'impact actuel de l'augmentation des températures sur le tourisme estival domestique suisse.

Ces axes particuliers de notre recherche font partie intégrante d'une analyse plus large de l'évolution des variables climatiques imputables au changement climatique et des conséquences du changement climatique sur les sociétés humaines. Ainsi, si l'on prend encore de la hauteur, c'est à la question des relations qu'entretiennent les sociétés humaines avec leur environnement que la problématique de notre thèse se rattache.

2.7. QUESTIONS DE RECHERCHE ET OBJECTIFS

2.7.1. Questions de départ et de recherche

Quelles sont les conséquences du changement climatique sur l'évolution des variables météorologiques permettant ou favorisant la pratique des activités touristiques extérieures en montagne en Suisse?

Afin de répondre à cette question, nous analysons successivement les saisons hivernale et estivale. En ce qui concerne la saison hivernale, notre étude répond aux questions de recherche suivantes :

1. Quelle est l'évolution des précipitations neigeuses et quelles sont ses conséquences potentielles pour les activités extérieures hivernales?
2. Quels sont les critères d'évaluation de la fiabilité de l'enneigement des pistes de ski à retenir lors de l'étude de la viabilité des domaines skiables?

L'analyse de la saison estivale répond à la question de recherche suivante :

Les conséquences prévues du changement climatique sur le tourisme de montagne en Suisse sont-elles déjà perceptibles?

2.7.2. Objectifs de recherche

Hiver

1. *Etude de l'évolution passée et future des précipitations sous forme de neige.*

Cette partie a pour but d'évaluer l'impact du changement de température sur les précipitations neigeuses en minimisant l'effet de la variabilité existant dans la fréquence et l'intensité des précipitations. Elle analyse l'évolution passée des précipitations neigeuses de

76 stations réparties sur tout le territoire suisse et propose un modèle empirique d'évolution future.

2. *Réflexion autour des critères d'évaluation de la fiabilité de l'enneigement pour la pratique du ski alpin.*

L'objectif de cette réflexion est de répondre à notre deuxième question de recherche, soit essentiellement à la question du seuil retenu lors des prévisions concernant la viabilité des domaines skiables. Les prévisions récentes se basent sur un seuil unique de hauteur de neige et ne prennent pas en compte d'autres facteurs climatiques, géomorphologiques ou humains pour définir la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables. A l'aide d'une étude des facteurs qui influencent l'enneigement des pistes de ski alpin, nous rediscutons le seuil et les critères retenus.

Eté

1. *Etude de l'impact des périodes caniculaires sur la fréquentation hôtelière en montagne.*

L'objectif de cette partie est de déterminer si, aujourd'hui déjà, les périodes de grandes chaleurs ont une influence sur la fréquentation touristique de montagne. Nous analysons la relation entre le nombre de jours au-dessus de certains seuils de température et d'ensoleillement et le nombre relatif de nuitées hôtelières domestiques de 40 stations touristiques des Alpes suisses.

2.8. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Ce chapitre présente l'ensemble des méthodes et variables utilisées dans les quatre articles qui composent cette thèse. Pour une présentation plus précise, nous renvoyons le lecteur aux méthodes figurant au début de chaque article.

2.8.1. Méthodes utilisées

En fonction de l'analyse menée, la démarche a été soit quantitative, soit qualitative. Nous avons ainsi opté pour une triangulation méthodologique, méthode qui nous a permis de combiner plusieurs approches. Il s'agit de la recherche documentaire, de l'analyse statistique et des entretiens semi-directifs.

Les résultats de l'article 1 du chapitre 4 ont été obtenus en utilisant des régressions linéaires alors que pour l'article 2 nous avons opté pour des régressions logistiques. L'usage de régressions linéaires dans le premier article pourrait être sujet à discussion; les données utilisées étant bornées (entre 0 et 1) et discrètes. La grande quantité de résultats possibles limite cependant le côté discret des données ce qui permet également l'usage d'une régression linéaire. De plus, pour notre analyse, les résultats obtenus suite à une régression linéaire ou suite à une régression logistique sont très proches.

Afin d'identifier les facteurs influençant l'enneigement des pistes de ski présentés au chapitre 5 (article 3), nous avons mené des entretiens semi-directifs auprès des responsables techniques, des responsables administratifs et/ou des directeurs des remontées mécaniques des Alpes et du Jura vaudois, en Suisse. Au total 11 spécialistes ont été rencontrés (annexe 2). Lors de ces entretiens, nous avons utilisé, en plus d'une grille d'entretien, une grille d'analyse comportant différents paramètres liés à l'enneigement d'une piste de ski (annexe 3). Les résultats de la table 5.2.1, qui présentent les besoins minimaux en neige damée [cm] et leur correspondance en neige fraîche à -3 °C pour différents types de sols, sont ainsi la synthèse des réponses données par les acteurs interrogés. Ces résultats ont ensuite été validés par trois spécialistes des remontées mécaniques des Alpes vaudoises.

Les résultats des tables 6.2.2 et 6.2.3 du chapitre 6 ont été obtenus à l'aide de régressions linéaires. Nous avons ensuite fait une régression multiple ANOVA (table 6.2.5) afin de proposer une explication aux différents résultats des corrélations obtenus dans la table 6.2.2. Un modèle économétrique aurait pu être plus adapté. C'est pourquoi, en collaboration avec des spécialistes de la modélisation économétrique, nous sommes en train de travailler sur une nouvelle analyse utilisant cette méthode.

2.8.2. Choix et sources des variables météorologiques

En hiver, l'enneigement est la variable la plus importante parmi celles qui ont une influence sur la pratique des activités touristiques extérieures. Sans neige, il est impossible de pratiquer le ski et les autres activités liées à la neige qui, à l'heure actuelle, sont encore largement prédominantes dans les montagnes suisses en hiver. Avec les nouvelles possibilités d'enneigement artificiel, la quantité de neige naturelle au sol mesurée dans les stations météorologiques n'est plus nécessairement la variable la plus pertinente à étudier. Par ailleurs, son évolution est déjà passablement documentée (Hantel & Hirtl-Wielke, 2007; Laternser & Schneebeli, 2003; Marty, 2008; Scherrer & Appenzeller, 2006; Scherrer et al., 2004; Wielke et al., 2004). En revanche, l'évolution des précipitations neigeuses est encore largement méconnue. Nous les avons comparées aux précipitations totales dans le but d'évaluer l'impact du changement de température sur les précipitations neigeuses en minimisant l'effet de la variabilité dans la fréquence et l'intensité des précipitations. Cette analyse est novatrice et permet d'affiner les connaissances concernant l'évolution du manteau neigeux qu'il soit artificiel ou naturel. Trois variables (nouvelle neige, précipitations et température) ont ainsi été retenues pour l'hiver :

Nouvelle neige

Deux sources principales ont été utilisées afin d'obtenir un grand nombre de stations et des séries de données les plus complètes possibles.

1. MeteoSuisse : hauteur de neige fraîche de 5h40 (UTC) du jour précédent à 5h40 (UTC) du jour même, inscrite pour le jour d'avant le relevé.
2. WSL-SLF : hauteur de neige fraîche de 5h40 (UTC) du jour précédent à 5h40 (UTC) du jour même, inscrite pour le jour même du relevé.

En règle générale, les données retenues pour chaque station ont été les données les plus anciennes possibles qui présentent une série avec au maximum 10% de données manquantes sur toute la période.

Les données d'enneigement sont susceptibles de présenter certains biais. Premièrement, les stations de mesures peuvent avoir été déplacées durant la période analysée. Deuxièmement, la hauteur de neige de nombreuses stations est encore relevée par un observateur. Seules certaines stations sont automatiques et ce uniquement pour les périodes récentes. Les données provenant

des stations avec observateur peuvent ainsi comporter un certains nombres de biais. L'heure réelle du relevé peut par exemple ne pas toujours correspondre à l'heure officielle du relevé. De plus, il peut y avoir des erreurs lors du report de la quantité de neige mesurée. Enfin, suivant où sont situées les stations, elles peuvent recueillir de la nouvelle neige alors qu'il n'y a pas eu de précipitations. Ceci est dû au vent qui, en déplaçant la neige, en ajoute sur la table de mesure.

Précipitations

Les données proviennent de MeteoSuisse. Il s'agit de la hauteur en mm des précipitations tombées durant les 24 heures précédentes et mesurées à 5h40 (UTC) du matin. Ces données peuvent présenter certains biais si les stations de mesures ont été déplacées. En hiver, elles peuvent également être biaisées si les quantités de neige recueillies dans le pluviomètre le sont à cause du vent.

Température

Les données proviennent de MeteoSuisse. La température maximale (T_{max}) mensuelle a été utilisée. Il s'agit de la moyenne des températures maximales mesurées durant un mois. Tout comme les données d'enneigement et de précipitations, ces données peuvent présenter des biais si les stations ont été déplacées. Les stations non déplacées qui se trouvaient à la campagne au moment de leur mise en place peuvent également présenter des biais si, suite à l'urbanisation, elles se sont petit à petit situées aux abords puis dans une agglomération; une zone urbaine étant plus chaude qu'une zone en campagne. Dans cette étude, la période utilisée pour les données de température couvrant 11 années seulement, nous considérons que ces biais peuvent être négligés.

En ce qui concerne l'été, plusieurs recherches prévoient un déplacement des touristes plus au nord et en montagne lors des périodes caniculaires (Amelung & Viner, 2006; Ceron & Dubois, 2000; Hamilton & Tol, 2007; Hamilton et al., 2005; Maddison, 2001; Perch-Nielsen et al., 2010; Rutty & Scott, 2010). Cependant, aucune n'avait jusqu'ici étudié si ce phénomène s'était déjà produit. C'est ce que nous faisons dans notre analyse de l'impact potentiel des journées chaudes sur la fréquentation hôtelière domestique en montagne. Notre étude étant novatrice et exploratoire, nous

avons également comparé cet impact avec celui de l'ensoleillement en montagne. Ainsi les variables retenues pour l'été sont :

Température

Les données proviennent de MeteoSuisse. La température maximale (T_{\max}) quotidienne a été utilisée. Les biais potentiels pour les données de température estivale sont les mêmes que ceux présentés ci-dessus pour les données de température hivernale. La période analysée couvrant 11 années seulement, nous considérons que ces biais peuvent être négligés.

Ensoleillement

Les données proviennent de MeteoSuisse. L'ensoleillement relatif quotidien a été utilisé. Celui-ci correspond à l'ensoleillement mesuré en % de l'ensoleillement total possible pour la journée concernée. Les données utilisées pour notre analyse peuvent être considérées comme fiables puisqu'elles couvrent 11 années et qu'il n'y a pas eu de déplacements des stations de mesures durant cette période.

2.8.3. Choix et source des variables touristiques

Afin de déterminer s'il existe une relation entre les journées chaudes et la fréquentation en montagne, nous avons utilisé les nuitées hôtelières.

Nuitées hôtelières domestiques

Les nuitées hôtelières domestiques proviennent de l'office fédéral de la statistique (OFS). Elles sont disponibles uniquement par mois. Cette variable touristique a été préférée à d'autres car elle existe pour toutes les stations touristiques de montagne et ce depuis de nombreuses années (à l'exception de 2004). Nous avons ensuite calculé le nombre relatif de nuitées de la station par rapport au nombre mensuel de lits disponibles dans la station afin de diminuer l'impact de la mise à disposition

(ou du retrait) de nouveaux lits. Ces données peuvent présenter certains biais. En effet, étant transmises par les hôteliers à l'OFS, il peut arriver qu'il y ait des erreurs. Une autre option aurait été d'utiliser les taxes de séjour. Ces données présentent cependant les mêmes biais que les nuitées domestiques puisqu'elles dépendent du nombre de nuitées déclarées par les hôteliers.

Nombre de lits

Le nombre de lits disponibles provient de l'OFS. Celui-ci nous a permis de calculer le nombre relatif de nuitées hôtelières. Ces données peuvent être biaisées si les hôteliers omettent d'annoncer une fluctuation du nombre de lits disponibles dans leur établissement.

Deux variables explicatives de la relation entre nuitées hôtelières et journées chaudes ont été retenues. Il s'agit, d'une part, du séjour moyen et, d'autre part, de la distance entre chaque station touristique et le bassin de population le plus proche.

Séjour moyen

Le séjour moyen mensuel provient de l'OFS. Nous l'avons calculé en divisant le nombre mensuel de nuitées domestiques par le nombre mensuel d'arrivées domestiques. Nous avons ensuite utilisé la moyenne de la période étudiée (1997-2007) pour chaque mois. Ces données peuvent présenter les mêmes biais que ceux des nuitées hôtelières.

Distance au bassin de population le plus proche

La distance entre chaque station touristique et le bassin de population le plus proche provient de www.mappy.ch. Elle a été calculée en kilomètres et en heures. Ces données présentent une certaine subjectivité puisque nous avons utilisé le centre du bassin de population et le centre de la station proposés par mappy.ch. La distance en heure est calculée par mappy.ch. Celle-ci peut présenter des biais puisqu'elle ne tient notamment pas compte du trafic, ni des éventuels ralentissements le long du trajet.

2.8.4. Une approche par les seuils

Un seuil climatique est une limite fixée à une ou plusieurs variables climatiques. Par exemple, une journée qui voit sa température maximale dépasser les 25 °C est considérée comme une journée d'été, celle dépassant les 30 °C comme une journée caniculaire selon le barème de MétéoSuisse. Les seuils climatiques sont le fil rouge méthodologique de cette étude soit dans leur mise en évidence soit dans leur usage.

L'usage des seuils climatiques appliqué aux sciences humaines fait cependant débat (Bigano et al., 2006; Goessling & Hall, 2006b, c; Meze-Hausken, 2008). En effet, si l'importance du climat dans la prise de décision lors d'un séjour touristique est assez largement admise, la question se pose de savoir si une différence de température de 1 à 2 °C fait une différence. Ceci tout particulièrement lors de la prévision des flux touristiques (Goessling & Hall, 2006b, c). De plus, il n'est pas certain que l'être humain ne s'adaptera pas à l'évolution des températures (Meze-Hausken, 2008).

Cette étude n'est que partiellement concernée par ces critiques puisque les seuils utilisés y sont de trois types :

1. uniquement climatique, soit lors de l'analyse du comportement d'une variable climatique, lorsqu'une autre variable atteint un certain seuil (chapitre 4),
2. en lien avec une activité touristique extérieure, mais non liée à un comportement, soit dans le cas de la réflexion sur l'enneigement minimal requis pour la pratique du ski alpin (chapitre 5),
3. en lien avec un comportement (fréquentation hôtelière) passé (chapitre 6). Dans ce cas, nous avons posé arbitrairement deux seuils climatiques généralement admis (25 °C pour définir une journée chaude et 70% d'ensoleillement pour une journée ensoleillée).

Le troisième type, soit la pose arbitraire d'un seuil climatique, peut être sujet à discussion. Afin d'y pallier nous avons posé deux autres seuils (percentile 80) et utilisé différentes méthodes d'analyse (nombre de jours au-dessus du seuil et somme des degrés, respectivement somme des pourcentages au-dessus du seuil).

3. QUELQUES NOTIONS THÉORIQUES

3.1. SYSTÈMES, THÉORIES DE LA COMPLEXITÉ ET DU CHAOS

3.1.1. Représenter l'univers organisé par des systèmes

Lorsque l'on souhaite représenter l'univers organisé ou une partie de celui-ci, il est généralement admis de le faire sous forme d'un ou plusieurs systèmes. En effet, que ce soit en sciences naturelles ou humaines, le système revêt une grande importance puisque dès lors que l'on pense de manière associative ou globale, on y a généralement recours. Morin (1977: 99) le résume bien :

« tous les objets clés de la physique, de la biologie, de la sociologie, de l'astronomie, atomes, molécules, cellules, organismes, sociétés, astres, galaxies constituent des systèmes. Hors systèmes, il n'y a que la dispersion particulière. Notre monde organisé est un archipel de systèmes dans l'océan du désordre. (...) On trouve dans la nature des amas, des agrégats de systèmes, des flux inorganisés d'objets organisés. Mais ce qui est remarquable, c'est le caractère polysystémique de l'univers organisé. Celui-ci est une étonnante architecture de systèmes s'édifiant les uns sur les autres, les uns entre les autres, les uns contre les autres, s'impliquant et s'imbriquant les uns les autres, avec un grand jeu d'amas, plasmas, fluides de micro-systèmes circulant, flottant, enveloppant les architectures de systèmes. Ainsi l'être humain fait partie d'un système social au sein d'un éco-système naturel, lequel est au sein d'un système solaire, lequel est au sein d'un système galactique : il est constitué de systèmes cellulaires, lesquels sont constitués de systèmes moléculaires, lesquels sont constitués de systèmes atomiques. »

La notion de système connaît de nombreuses définitions qui, jusqu'au début du 20^{ème} siècle, comportaient deux aspects principaux : l'interrelation des éléments et l'unité globale constituée par

ces éléments en interrelation (Morin, 1977). Morin (1977: 102) y ajoute la notion d'organisation et, dès lors, définit le système « *comme une unité globale organisée d'interrelations entre éléments, actions ou individus* ». De Rosnay (de Rosnay, 1975), quant à lui, introduit l'idée qu'un système a une finalité (but du système) : « *un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but* ». C'est cette dernière définition que nous retenons.

Un système peut être fermé ou ouvert. S'il est ouvert cela signifie qu'il est en relation constante avec son environnement en échangeant matière, énergie et information par des entrées (inputs) et des sorties (outputs). Il en va ainsi des deux systèmes qui nous intéressent pour cette étude.

Tout système, qu'il soit ouvert ou fermé, est composé de deux groupes de traits caractéristiques qui se rapportent, pour le premier, à leur aspect structural et, pour le second, à leur aspect fonctionnel (de Rosnay, 1975). Les aspects structuraux sont la limite ou frontière du système, les éléments qui le composent, les réservoirs dans lesquels sont conservés de la matière, de l'énergie et de l'information ainsi que des réseaux d'information qui rendent possible l'échange de ces matière, énergie et information. Plus les réseaux sont importants, plus le système devient complexe. Ainsi, tout élément d'un système peut être en interrelation avec n'importe quel autre élément de ce même système, et ce, de 18 façons (figure 3.1.1). Lorsqu'il s'agit d'un système complexe, les interactions entre les éléments sont non linéaires (de Rosnay, 1975).

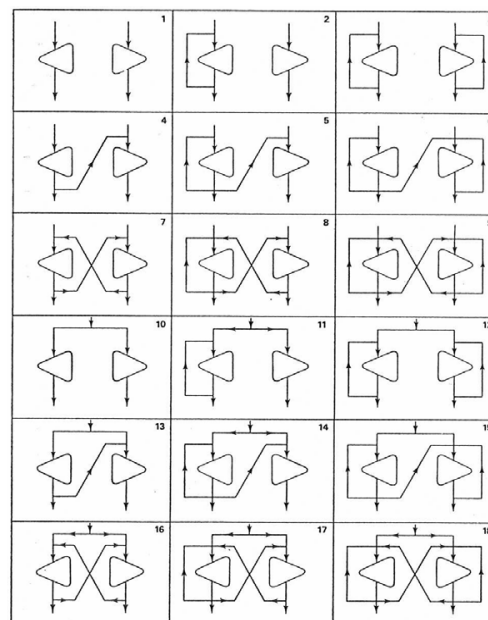


Figure 3.1.1 : Représentations des 18 interrelations possibles entre deux éléments d'un système (sur un même flux) (Le Moigne, 2006: 109)

Les principaux traits fonctionnels d'un système, quant à eux, sont de l'ordre des processus, soit des phénomènes rattachés au temps. Il s'agit des flux d'énergie, de matière, d'éléments ou d'information qui circulent entre les différents réservoirs, des vannes ou centres de décisions qui contrôlent le débit des flux, des délais qui découlent de la variation des vitesses de circulation des flux ou encore du temps de stockage dans les réservoirs et, finalement, des boucles de rétroaction. Ces dernières peuvent être positives ou négatives. Les boucles de rétroaction positives permettent la croissance et l'évolution d'un système, soit sa dynamique, alors que les boucles de rétroaction négatives régulent et stabilisent un système. Par ailleurs, les délais jouent un rôle important puisqu'ils amplifient ou reportent voire même empêchent l'apparition de certains phénomènes (de Rosnay, 1975). Enfin, chaque système peut-être composé de sous-systèmes (figure 3.1.2).

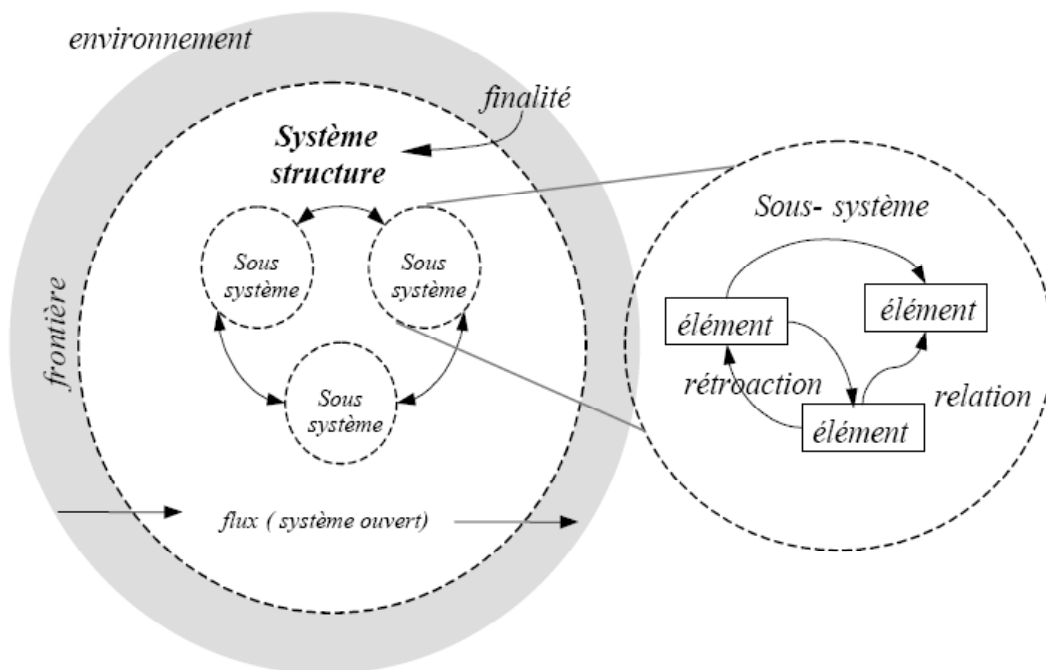


Figure 3.1.2 : Représentation (par Camus et al., 2010: 260) de la forme canonique du système général de Le Moigne (1990)

3.1.2. L'apport de la théorie de la complexité

La théorie de la complexité ou science de la complexité a apporté de nouveaux éléments facilitant la compréhension de certains types de systèmes : les systèmes dits complexes. Dans ce contexte, complexe ne doit pas être réduit à compliqué (Baggio, 2008). Un système compliqué est un système généralement composé d'un grand nombre d'éléments et dont l'action collective est la somme de leurs actions. Il est donc prévisible et linéaire. Comme mentionné précédemment, une des caractéristiques d'un système complexe réside dans sa non linéarité, donc sa non prévisibilité, même si l'on connaît le fonctionnement de chacun de ses éléments.

Par ailleurs, Morin (1977) place la complexité d'un système dans le fait qu'on ne peut réduire le tout aux parties, ni les parties au tout. Ceci s'explique par l'émergence de qualités nouvelles inhérentes à tout état global. Plus précisément « *on peut appeler émergences les qualités ou propriétés d'un système qui présentent un caractère de nouveauté par rapport aux qualités ou propriétés des composants considérés isolément ou agencés différemment dans un autre type de système. Tout état global présente des qualités émergentes* » (Morin, 1977: 106-107). Ainsi le tout est plus que la somme des parties. Le tout est cependant également moins que la somme des parties car des « *qualités des propriétés attachées aux parties considérées isolément, disparaissent au sein du système* » (Morin, 1977: 112). Dès lors,

« le système est à la fois plus, moins, autre que la somme des parties. Les parties elles-mêmes sont moins, éventuellement plus, de toute façon autres que ce qu'elles étaient ou seraient hors système. Cette formulation paradoxale nous montre tout d'abord l'absurdité qu'il y aurait à réduire la description du système en termes quantitatifs. Elle nous signifie, non seulement que la description doit être aussi qualitative, mais surtout qu'elle doit être complexe. Cette formulation paradoxale nous montre en même temps qu'un système est un tout qui prend forme en même temps que ses éléments se transforment » (Morin, 1977: 115).

Cela a pour conséquence qu'il est impossible de décomposer un système complexe dans le but de comprendre son fonctionnement. Par ailleurs, de par l'émergence de qualités nouvelles on peut considérer qu'un système complexe s'auto-organise.

D'autre part, certains auteurs (Butler, 1980; Farrell & Twining-Ward, 2004; Holling & Gunderson, 2002) postulent qu'un système suit une évolution qui représente le cycle de vie du système. Cette idée empruntée à la biologie, et plus particulièrement aux écosystèmes, est désormais également

appliquée à la compréhension des systèmes représentant les activités humaines tel le tourisme (Butler, 1980). Ainsi, un système suit généralement cinq phases, selon une courbe en forme de S : exploration, implication, développement, consolidation et stagnation (figure 3.1.3).

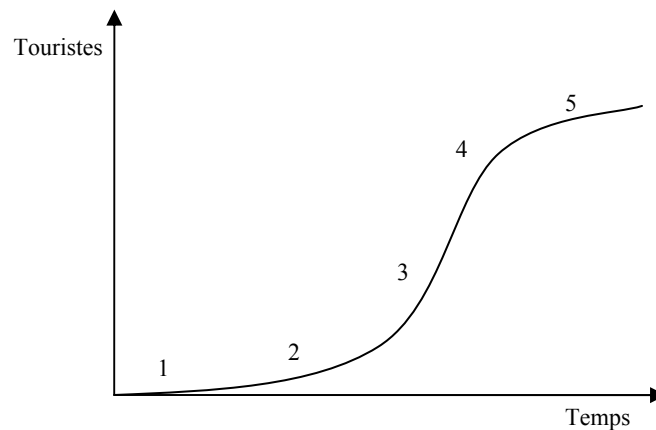


Figure 3.1.3 : Modèle du cycle de vie appliqué au tourisme (d'après Butler, 1980). 1) phase d'exploration, 2) phase d'implication, 3) phase du développement, 4) phase de la consolidation, 5) phase de la stagnation.

D'autres auteurs (Farrell & Twining-Ward, 2004; Holling & Gunderson, 2002) y ont ajouté les notions d'adaptation et de résilience, soit le fait qu'un système, une fois arrivé au terme de son cycle, décline puis recommence un nouveau cycle (figure 3.1.4). Plus précisément, tout système commence par une phase de développement pour arriver à une phase de conservation des acquis et de stabilisation. De par son côté conservatif, cette phase présente une grande fragilité et vulnérabilité face à aux événements imprévus (« surprise ») et un bas niveau de « résilience » (Farrell & Twining-Ward, 2004). La résilience représente le degré de perturbation qu'un système peut endurer sans devoir modifier les variables qui déterminent son comportement (Holling, 1996). Si un événement imprévu survient (pour le cas du tourisme par exemple : un tremblement de terre, un tsunami, un attentat terroriste, etc.), le système entre dans une phase d'oscillations. Le système décline ou s'effondre brutalement. Une fois cette phase passée, le système se réorganise tout en prenant cependant une autre forme que le système précédent (Farrell & Twining-Ward, 2004).

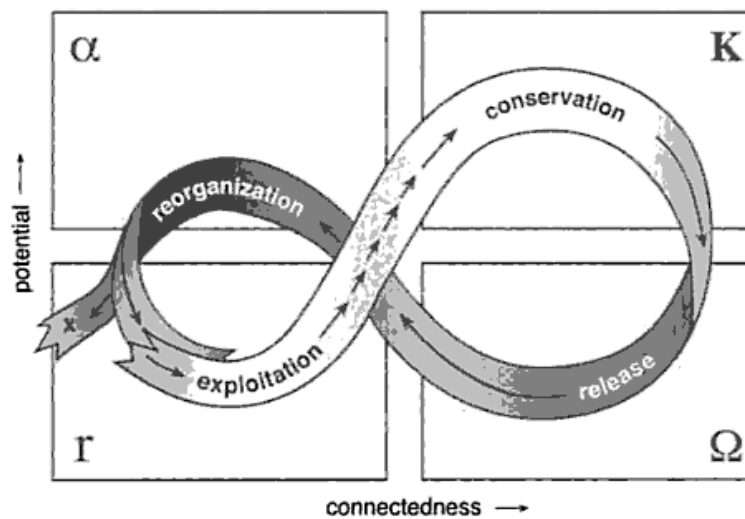


Figure 3.1.4 : Représentation du cycle d'adaptation d'un écosystème (Holling & Gunderson, 2002: 34)

3.1.3. La théorie du chaos pour comprendre le fonctionnement de certains systèmes

La théorie de la complexité ne permet cependant pas de rendre exactement compte de l'évolution des systèmes non linéaires. C'est grâce à la théorie du chaos, qui appartient aux théories mathématiques, que cela est désormais possible. Jusqu'alors, deux modèles permettaient d'expliquer l'évolution d'un phénomène : le modèle stochastique et le modèle déterministe. Un phénomène stochastique dépend entièrement du hasard, soit d'une sorte de tirage au sort souvent illustré par le jeu des dés. On fait alors appel à la théorie de la probabilité pour tenter de comprendre le phénomène. Avant l'avènement de la théorie du chaos, tout phénomène aléatoire était considéré comme stochastique, soit relevant du hasard ou de manière plus imagée d'un « lanceur de dés ». La théorie du chaos a ouvert de nouvelles perspectives dans la compréhension des phénomènes aléatoires. Elle permet l'idée d'un modèle déterministe, mais chaotique (Ekeland, 1995). Le déterminisme stipule que si l'on connaît toutes les valeurs de tous les éléments d'un système, on doit pouvoir prévoir son évolution. Ainsi deux états initiaux identiques évoluent de la même manière. Dès lors, « *pour connaître la trajectoire d'un système déterministe, il suffit de connaître sa position*

initiale; à deux positions initiales différentes correspondront deux trajectoires différentes. Un système est chaotique s'il amplifie, si peu que ce soit, les écarts initiaux : si la distance est d au départ, elle devient $10 d$ au bout d'un certain temps T , caractéristique du système » (Ekeland, 1995: 28). L'amplification de l'écart se fera ensuite de manière exponentielle. « Plus le temps caractéristique du système est court, plus le système amplifie rapidement, plus il sera chaotique » (Ekeland, 1995: 28). Ceci pourrait a priori paraître contradictoire avec le déterminisme qui postule la prévisibilité de l'évolution d'un système. En fait, c'est par le fait qu'il est impossible de reproduire à l'identique les états initiaux que l'on n'arrive pas à prédire l'évolution du système, puisqu'après un certain temps T , l'amplification des écarts initiaux devient importante. Pour les distances inférieures à T , il est tout à fait possible de suivre le système par le calcul, donc de faire une prévision. C'est le temps caractéristique T , qui pose une borne aux possibilités de prévisions. On sait par exemple que le système solaire est stable et régulier à l'échelle du million d'années, donc qu'il suit un modèle déterministe non chaotique. Il est chaotique à l'échelle de cent millions d'années (Ekeland, 1995). Quand au système atmosphérique terrestre, aux connaissances actuelles, l'horizon théorique de prévisibilité maximum des conditions météorologiques d'un lieu donné est envisageable pour deux semaines. Dans la pratique, il se rapproche plus généralement de trois à cinq jours (Lurçat, 2002). De plus,

« proposer pour l'univers un modèle déterministe, c'est affirmer qu'il est soumis à des lois strictes, qui contraignent son évolution pour tout le temps qu'il a à vivre; il ne doit pas quitter son attracteur étrange (nous revenons sur cette notion ci-dessous). Du point de vue physique, cela veut dire que tous les états théoriquement possibles de son évolution ne sont pas pratiquement réalisables, et que les états naturels, ceux qui peuvent apparaître au cours de l'évolution de l'univers, doivent avoir des propriétés très particulières » (Ekeland, 1995: 102).

Seuls les systèmes déterministes, dynamiques et non linéaires peuvent être chaotiques (Williams, 1997). Un système dynamique change, bouge ou évolue dans le temps. Pour rappel, s'il le fait de manière non linéaire cela veut dire que les entrées ne sont pas proportionnelles aux sorties ou qu'un changement d'une variable ne produit pas un changement proportionnel. En d'autres termes, les valeurs d'un système à un moment donné ne sont pas proportionnelles aux valeurs de ce même système plus tard dans le temps (Williams, 1997).

Malgré l'évolution chaotique d'un système et sa non prévisibilité, ses trajectoires d'évolution sont confinées dans un espace fixe. Ainsi, si l'on représente les évolutions possibles d'un système

chaotique dans un espace donné, seuls certains points seront atteints; représentée visuellement, une forme à deux anses apparaît (figure 3.1.5). Elle est appelée attracteur de Lorenz du nom de son inventeur (Gleick, 1987) ou attracteur étrange suite à l'apport d'autres recherches (Lurçat, 2002). Ekeland (1995: 59-61) en donne une bonne explication :

« Alors que chaque point de l'espace à trois dimensions représente un état théoriquement possible (de l'état d'un système à un moment donné de son évolution), seuls certains d'entre eux sont naturels, en ce sens que l'évolution naturelle du système peut y conduire. Ces états naturels occupent une partie beaucoup plus restreinte de l'espace, représentée par l'attracteur de Lorenz. (...) Il (l'attracteur de Lorenz) attire les trajectoires, toutes les trajectoires quelles que soient leur point de départ. D'où qu'elles partent, elles se dirigent inmanquablement vers cette étroite région de l'espace qui contient l'attracteur et leurs évolutions y restent confinées. (...) De tout l'espace mis à sa disposition, le mouvement n'explore qu'une infime partie, toujours la même. Ainsi l'attracteur de Lorenz est comme une cristallisation de la nécessité, une représentation géométrique de celle-ci. Mais une fois arrivé sur celui-ci, le système se rappelle qu'il est chaotique, et c'est le hasard qui prend le dessus. Les trajectoires restent confinées sur l'attracteur, mais le mécanisme d'amplification des petits écarts rentre en action, et le mouvement devient aléatoire. (...) L'existence de l'attracteur traduit donc une distinction fondamentale à opérer entre l'immense majorité des situations, par lesquelles le système ne passera jamais de lui-même, et les quelques situations naturelles, par lesquelles le système repassera indéfiniment, quoique irrégulièrement. »

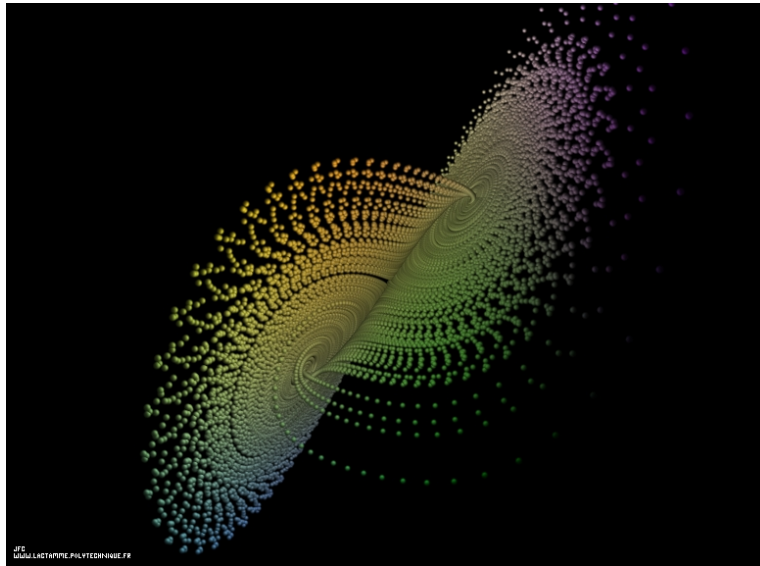
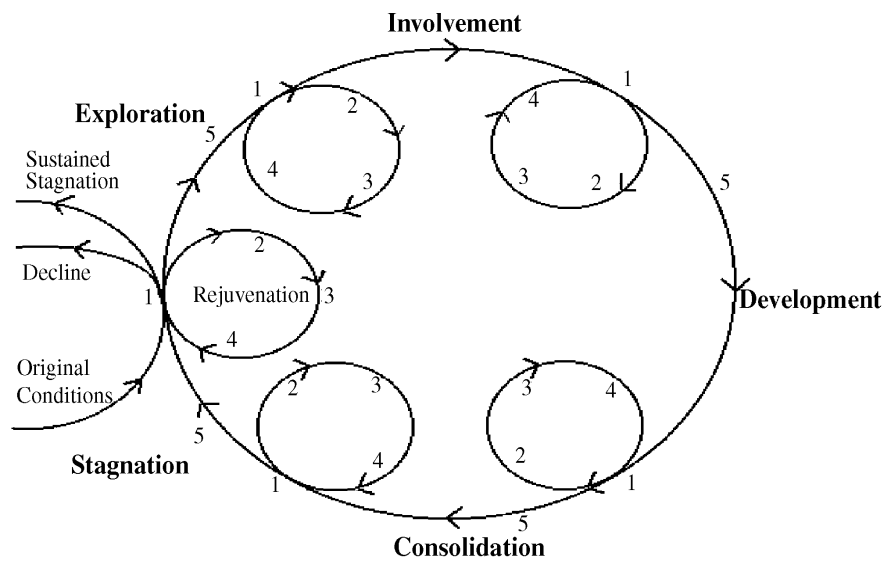


Figure 3.1.5 : Représentation de l'attracteur de Lorenz (Colonna, 2004)

Le système, quel que soit son état initial, passera d'une anse à l'autre de manière aléatoire, sans qu'il soit possible de prévoir à quel moment il basculera sur l'autre anse. La zone médiane entre les deux anses est une sorte de croisement, d'où partent plusieurs routes, les unes vers l'anse de gauche, les autres vers celle de droite. Celles-ci sont complètement entremêlées, formant un réseau inextricable, ainsi la moindre différence, si minime soit-elle, pousse à prendre une route plutôt qu'une autre, à se diriger à gauche plutôt qu'à droite ou inversement.

En résumé, « *les systèmes chaotiques sont fondamentalement instables : de petits écarts initiaux conduisent rapidement à de grandes déviations* » (Ekeland, 1995: 69). C'est la conséquence de ce que l'on appelle l'effet papillon.

Si l'on reprend les principes du cycle de vie et d'adaptation d'un système et que l'on y ajoute ceux du chaos, on a constaté qu'un système passe par des phases supplémentaires lors de son évolution (figure 3.1.6). La théorie du chaos permet ainsi d'affiner la compréhension des phases d'évolution des systèmes complexes et de ce fait chaotiques.



1. Triggering circumstances, disequilibrium; 2. Deregulated chaos; 3. Positive feedback, self healing-enablers;
4. Transition to a new phase that reflects the old; 5. Regulated chaos renewed tenuous conditional equilibrium

Figure 3.1.6 : Evolution d'un système selon les principes du cycle de vie et de la théorie du chaos
(Russel & Faulkner, 2004: 563)

Dès lors, on peut définir un système complexe et chaotique comme étant un système :

- ouvert,
- formé d'un grand nombre et d'une importante variété d'éléments généralement organisés en niveaux hiérarchiques internes,
- à la fois plus, moins, autre que la somme des parties,
- dont les interactions entre les éléments sont d'une haute densité et non linéaires,
- composé de boucles de rétroaction,
- qui permet l'émergence de propriétés nouvelles non prévisibles,
- auto-organisé,
- dynamique,
- fondamentalement instable,
- déterministe, soit qui a une histoire : le comportement futur dépend du passé, mais dont l'évolution est non linéaire et chaotique.

3.2. SYSTÈMES CLIMATIQUE ET TOURISTIQUE : ENTRE COMPLEXITÉ ET CHAOS

3.2.1. Le système climatique

Le système climatique est un système dynamique, chaotique en équilibre et extrêmement complexe puisqu'il comprend l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère (la neige et la glace), la lithosphère et la biosphère (sociétés humaines incluses). Comme dans tout système, ces éléments interagissent entre eux. Ce système est ouvert : il reçoit donc des éléments externes influents dont le plus important fournisseur est le soleil. Depuis les débuts de l'histoire de la terre, le système climatique connaît des variations. Celles-ci sont dues aux fluctuations de l'apport du rayonnement solaire (facteurs externes) et aux changements intervenus dans les différentes sphères (facteurs internes). Les facteurs externes, soit les fluctuations du rayonnement solaire, sont liés aux variations des paramètres orbitaux (cycles de Milankovitch) et à la quantité d'énergie émise par le soleil. Les facteurs naturels internes sont le fait du volcanisme et des océans. Les volcans en éruptions émettent des poussières dans l'atmosphère qui réduisent la quantité d'énergie solaire et qui modifient la composition de l'atmosphère. Il en résulte une diminution des températures. Les océans, quant à eux, régulent les températures en absorbant et restituant l'énergie. De plus, ils absorbent de grandes quantités de CO₂. A une échelle régionale, d'autres facteurs naturels internes influencent le climat : glaciers, lacs, forêts, etc.

Depuis la révolution industrielle, une nouvelle cause interne de variations du climat mondial est apparue : les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines. Ces émissions, en augmentant la teneur des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, augmentent aussi la température mondiale de la terre, ce qui a des répercussions sur les autres éléments du système climatique (figure 3.2.1).

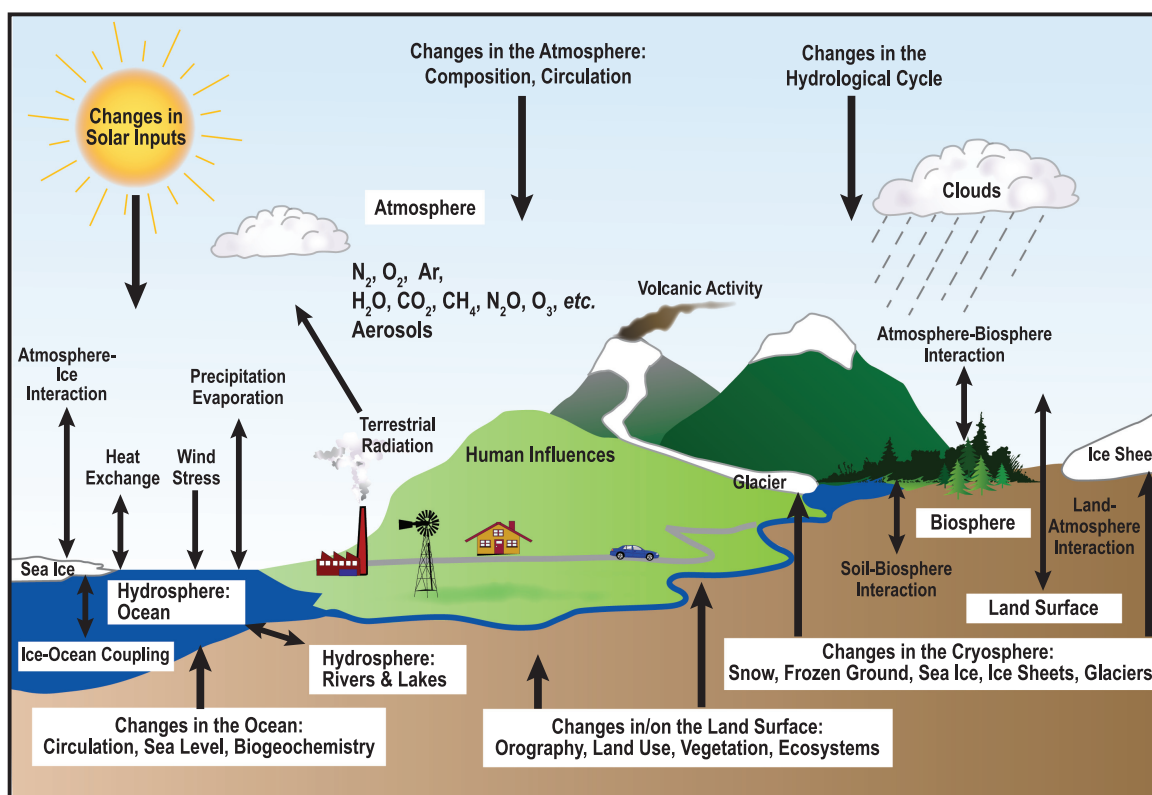


Figure 3.2.1 : Contributions des activités humaines au changement climatique (IPCC, 2007a)

En raison de son fonctionnement complexe et chaotique, il est difficile de prévoir de manière précise toutes les conséquences de cette augmentation. Cependant, il est certain que le réchauffement mondial actuel du système climatique est le premier de son histoire à connaître une croissance aussi rapide (IPCC, 2007a). Certaines conséquences se font d'ailleurs déjà ressentir : fonte rapide des glaciers et de la calotte glaciaire, augmentation des périodes de sécheresse et de précipitations intenses, augmentation du niveau des océans, etc. Ces effets ont ou auront des conséquences pour les sociétés humaines (migrations suite à l'immersion de certaines côtes ou îles, suite aux catastrophes naturelles ou encore liées aux problèmes de ressources en eau, etc.). De plus, il est probable qu'à partir d'un certain seuil d'augmentation des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère et, de ce fait, de la température, le système « s'emballe », puisque le système climatique est un système chaotique. Il en résulterait un accroissement brutal des conséquences

citées ci-dessus. C'est pourquoi, on estime qu'il ne faut pas dépasser 2 °C d'augmentation des températures si on veut pouvoir faire face aux transformations induites par le changement climatique (Richardson et al., 2009).

3.2.2. Le système touristique

Afin d'appréhender le fonctionnement du tourisme, dès les années 1980, plusieurs auteurs ont proposé l'usage de la systémique (Gunn, 1979; Leiper, 1979; McIntosh et al., 1994; Mill & Morrison, 1985; Murphy, 1985; Pearce, 1989; Sessa, 1988). Ces premiers modèles partent du postulat que (McKercher, 1999: 426) :

- « 1. *tourism can be controlled;*
2. *disparate tourism players function in a formally, coordinated manner to form a unified whole;*
3. *tourism is organised and that the organisation can be controlled by a top down management approach;*
4. *individual tourism business function to achieve a set of common, mutually agreed upon goals;*
5. *tourism is the sum of its constituent parts, and*
6. *by understanding how each part works, an understanding of how tourism works as a whole will emerge. »*

Plusieurs manières de présenter le système touristique ont dès lors été proposées. Suivant l'approche retenue, ses composants diffèrent. Leiper (1979: 404), par exemple, en proposant cinq : « *tourists, generating regions, transit routes, destination regions and a tourist industry* ». D'autres auteurs (p. ex. Clivaz, 2001; Mill & Morrison, 1985) abordent le système touristique sous l'angle de l'offre et de la demande. Mill & Morrison (1985) propose ainsi un modèle macro présentant quatre éléments principaux : demande, marketing (ou offre), destinations et voyages (qui se focalisent sur les flux).

Clivaz (2001), quant à lui, propose onze éléments principaux de la demande touristique (figure 3.2.2) et cinq de l'offre touristique, eux-mêmes scindés en plusieurs sous-éléments (figure 3.2.3).

Demande	Types d'activités
Nature	se promener, faire des excursions, visiter des parcs naturels, admirer de beaux paysages, etc.
Attraction	visiter des parcs à thème, des zoos, faire un safari, etc.
Culture	visiter des monuments historiques (châteaux, églises,...), des musées, etc.
Sport	participer à une activité sportive extérieure (golf, ski, voile,...) ou intérieure (tennis, badminton, curling,...)
Divertissement	aller au cinéma, au théâtre, au restaurant, en discothèque, etc.
Relaxation	bronzer, lire, se reposer, etc.
Santé	aller au sauna, au jacuzzi, se faire masser, suivre un traitement médical ("wellness"), etc.
Spiritualité	pèlerinages, voyages "initiatiqes", religieux, etc.
Achats	faire les magasins, les boutiques de souvenirs, acheter des cadeaux, etc.
Liens sociaux	visiter des parents ou des amis
Affaires	participer à des congrès, des foires, etc.

Figure 3.2.2 : Principaux éléments de la demande touristique (Clivaz, 2001: 100; adapté de Hunter & Green, 1995)

Offre originelle	Facteurs naturels	climat
		paysage
		faune et flore
		air et eau
Infrastructure générale		équipement de base (approvisionnement, transport, etc.)
		installations répondant aux besoins quotidiens (magasins, hôpitaux, etc.)
Facteurs culturels		culture (tradition, mentalité, accueil)
		patrimoine bâti
Offre dérivée	Infrastructure touristique	installations de transports touristiques
		installations sportives et culturelles
		services d'information et de prise en charge de la clientèle
Suprastructure touristique		exploitations d'hébergement
		exploitations de restauration

Figure 3.2.3 : Principaux éléments de l'offre touristique (Clivaz, 2001: 105)

Une autre approche de l'étude du système touristique est de s'intéresser à son évolution (p. ex. Butler, 1980; Krippendorf & Mueller, 1987; Weiermair, 1997). On y retrouve l'idée du cycle de vie et de ses cinq phases présentées à la figure 3.1.3. Weiermair (1997), n'en distingue que quatre lorsqu'il résume le développement du tourisme alpin depuis les années 1950 : phase de pionniers, de croissance quantitative, de consolidation et enfin de maturité et de concentration. Le principe est cependant le même.

Enfin, depuis les années 1990, plusieurs auteurs préconisent de considérer le système touristique comme étant complexe (Baggio, 2008; Camus et al., 2010; Farrell & Twining-Ward, 2004, 2005), voire chaotique (Faulkner & Russel, 2003; McKercher, 1999; Russel & Faulkner, 2004; Zahra & Ryan, 2007), avec tout ce que cela implique en terme de difficultés à prévoir son évolution. De la sorte, le modèle chaotique du tourisme présenté par McKercher (1999) propose d'expliquer le fonctionnement du tourisme en termes de relations complexes existant entre les neuf éléments majeurs qui composent le système (figure 3.2.4).

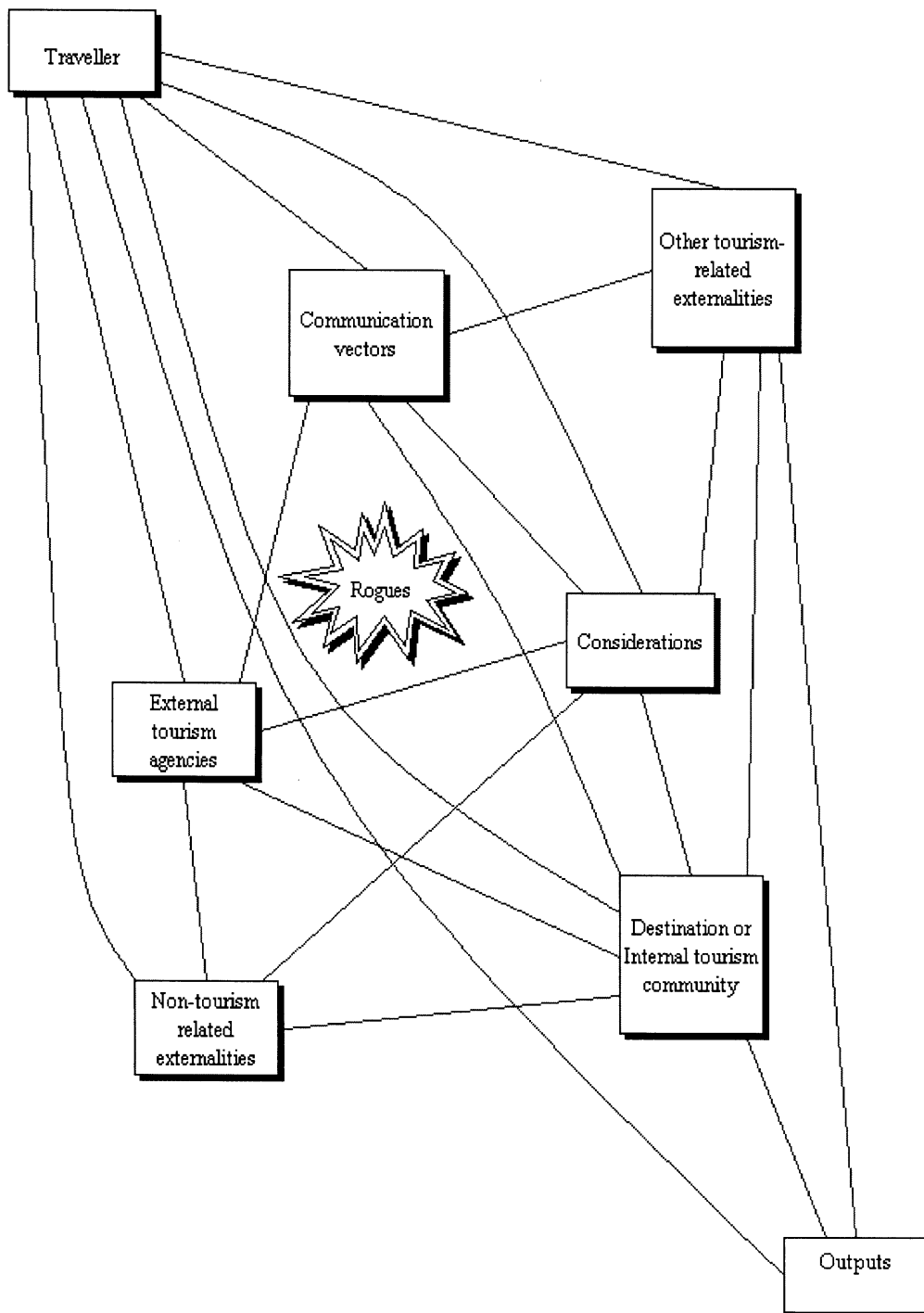


Figure 3.2.4 : Modèle chaotique du tourisme de Mckercher (1999)

Les éléments retenus sont (McKercher, 1999: 429-430) :

- « 1. *The traveller, who is the essential player in tourism, for without people travelling no tourism would occur.*
2. *The Communication vectors used to connect the traveller to the destination.*
3. *The Considerations or factors that influence the effectiveness of the Communication vectors used.*
4. *The Destination or Internal tourism community consisting of all businesses involved in tourism at the destination.*
5. *External tourism agencies (public and private sector) that try to influence tourism.*
5. *Other tourism-related externalities, such as alternative tourism destinations that affect a destination's ability to attract travellers.*
7. *Non-tourism-related externalities, or macro-environmental forces, such as changing political, economic or social conditions, war, natural disaster, that affect people's ability to travel.*
8. *Outputs from the system - both desired and undesired.*
9. *Rogues or Chaos makers who can push a system to the edge of chaos. »*

Considérer le système touristique comme étant chaotique permet de mieux comprendre la variabilité et les difficultés à prévoir l'évolution des flux touristiques. De plus, les discussions sur la complexité et le chaos « *should also raise awareness among professionals in the tourism sector that they cannot control tourism's evolution, nor can they predict with absolute accuracy what might happen as a result of a specific intervention or decision not to act* » (Becken & Hay, 2007: 15).

3.3. INTERACTIONS ENTRE CLIMAT ET TOURISME

3.3.1. Climat et société

Le climat est une contrainte pour l’humanité, même s’il n’a qu’un effet direct faible sur les sociétés humaines actuelles, dans le sens que celles-ci se sont adaptées et ont appris à s’en protéger. Il n’en résulte pas moins de nombreuses relations et des effets indirects (figure 3.3.1) : le climat détermine la végétation, qui agit sur les sols et la biosphère notamment (Hufty, 2001). Pourtant, les contraintes directes pour les sociétés humaines tendent à s’accroître suite à l’accroissement démographique d’une part et au changement climatique d’autre part. En effet, le premier pousse à la colonisation de nouvelles zones plus à risques du point de vue des catastrophes naturelles et le second en augmente le nombre d’occurrences. Par ailleurs, tous deux ont un impact sur les réserves en eau.

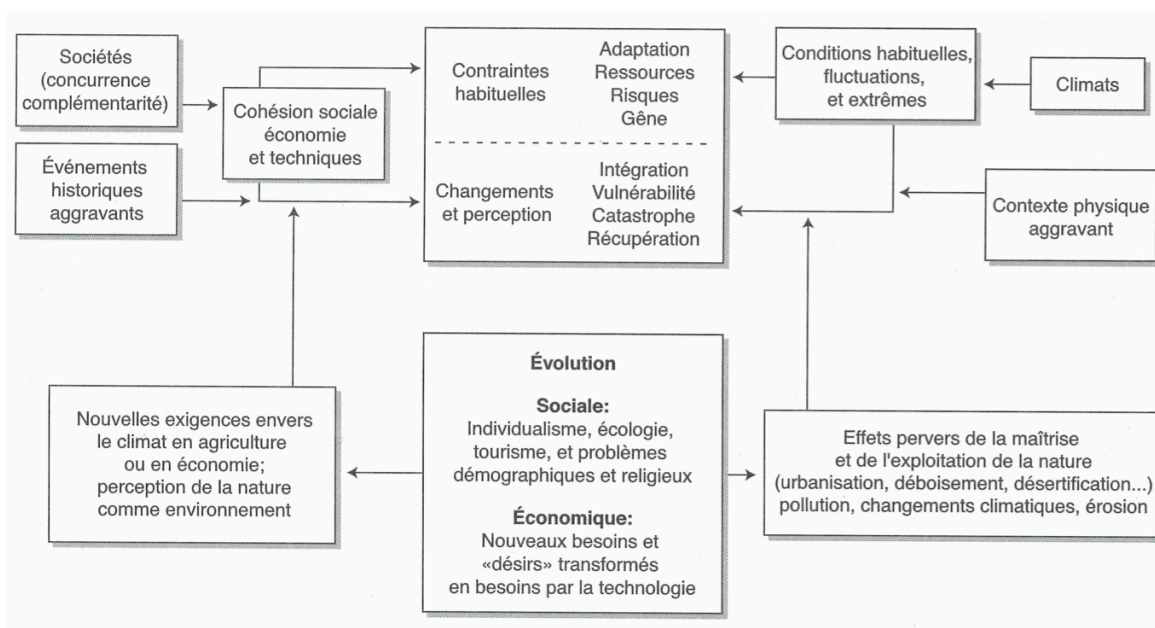


Figure 3.3.1 : Relations qui unissent les sociétés humaines aux climats actuels ou contraintes géoclimatiques (Hufty, 2001: 408)

Traditionnellement, le climat a été considéré par les chercheurs selon quatre visions différentes (Riebsame, 1985). Premièrement, le climat peut être vu comme la base du fonctionnement de tout système biophysique ou socioéconomique. Le climat représente un élément stable de l'environnement terrestre. L'objectif est d'en connaître les normes afin d'optimiser ou de minimiser ses effets. Cette vision est plutôt ancienne.

Une seconde approche postule que le climat détermine l'environnement. Cette vision correspond au déterminisme que l'on retrouve dans d'autres sciences (cf. chapitre 2.1). Le climat est ainsi perçu comme le facteur dominant qui modèle les comportements et développements humains. Cette approche a fait l'objet de critiques et n'influence plus qu'un petit nombre d'études (cf. chapitre 2.1).

La troisième vision envisage le climat comme un risque dont on peut souffrir, auquel on peut s'adapter ou que l'on peut atténuer. Les conséquences des catastrophes climatiques, ainsi que la manière de les prévenir ou d'en atténuer les effets y sont analysées. Elles sont orientées sur la gestion des risques. En ce sens, le climat est une contrainte géoclimatique (Marchand, 1985).

Enfin, la quatrième vision estime que le climat est une ressource naturelle que l'on peut exploiter. Généralement, les chercheurs la considèrent cependant comme étant non marchande (Riebsame, 1985).

En ce qui concerne le tourisme, le climat est à la fois une contrainte géoclimatique et une ressource naturelle (Besancenot, 1989). Dans cette étude, nous ne nous intéressons cependant au climat qu'en tant que ressource permettant une activité touristique (la neige pour le ski) ou favorisant l'attrait touristique des montagnes suisses (la fraîcheur en montagne lors des périodes caniculaires en plaine).

3.3.2. Le climat comme ressource pour le tourisme

Besancenot (1989 : 15) considère la ressource climat comme une richesse naturelle, qui revêt cependant au moins quatre particularités par rapport à d'autres richesses naturelles :

1. Le climat en tant que richesse ou ressource est très inégalement réparti sur la terre et, en un endroit donné, est soumis à une grande variabilité.
2. Ce qui rend la ressource climat unique en son genre c'est qu'elle n'est ni transportable ni stockable.

3. La ressource climat à elle seule ne suffit pas à faire le succès d'une destination. C'est une condition favorable, voire nécessaire suivant le type d'activités recherché, mais en aucun cas une raison suffisante.
4. Il s'agit d'une ressource permanente ou renouvelable, que la consommation ou la fréquentation touristique ne peut détruire.

Nous nuancions ce quatrième argument puisque l'on sait que les flux touristiques participent de manière importante à l'émission des gaz à effet de serre anthropiques (p. ex. Becken, 2002; Becken et al., 2001; Becken & Simmons, 2002; Becken et al., 2003; Peeters et al., 2006; Perch-Nielsen, 2008; Scott et al., 2010) et que leur augmentation dans l'atmosphère est en train de dérégler le climat (IPCC, 2007a). De la sorte, la ressource est affectée, notamment la neige qui n'est plus assurée dans de nombreuses régions alors qu'elle l'était auparavant. Toutefois, le changement climatique étant global, il n'y a pas de lien direct entre la consommation ponctuelle de la ressource en un lieu donné et sa détérioration dans ce même lieu.

Le climat en tant que ressource pour le tourisme agit sur ce dernier de plusieurs manières. La première consiste en l'impact qu'ont les différentes facettes du climat sur les touristes (table 3.3.1). Les aspects esthétiques du climat influencent le plaisir que le touriste a durant son séjour alors que les aspects thermaux déterminent son confort, même si, dans certaines conditions extrêmes (canicule ou période de froid intense par exemple), ils peuvent engendrer un important stress physiologique. Quant aux aspects physiques, ils sont susceptibles de créer une gêne, en cas de fortes pluies, de brouillard ou de vent par exemple, voire un danger (de Freitas, 2003). La plupart de ces facettes peuvent être favorables ou défavorables à la pratique des activités touristiques extérieures, sans généralement les rendre impossibles. Les autres, à l'instar de l'enneigement, sont par contre indispensables. Sans enneigement, qu'il soit artificiel ou non, il est impossible de pratiquer le ski (alpin ou nordique), activité touristique principale que l'on retrouve dans les montagnes suisses en hiver. De plus, certaines activités touristiques sont plus dépendantes des conditions météorologiques que d'autres. Il en est ainsi de la majorité des activités que l'on retrouve dans les montagnes suisses (ski, raquettes à neige, randonnées pédestres, baignades dans les lacs, ainsi que toutes les autres activités extérieures).

Facet of climate	Significance	Impact
Aesthetic		
Sunshine/cloudiness	Quality of experience	Enjoyment, attractiveness of site
Visibility	Quality of experience	Enjoyment, attractiveness of site
Day length	Convenience	Hours of daylight available
Physical		
Wind	Annoyance	Blown belongings, sand, dust...
Rain	Annoyance, charm	Wetting, reduced visibility and enjoyment
Snow	Winter sports/activities	Participation in sports/activities
Ice	Danger	Personal injury, damage to property
Severe weather	Annoyance, danger	All of above
Air quality	Annoyance, danger	Health, physical wellbeing, allergies
Ultraviolet radiation	Danger, attraction	Health, suntan, sunburn
Thermal		
Integrated effects of air temperature, wind, solar radiation, humidity, longwave radiation, metabolic rate	Thermal comfort Therapeutic, restorative	Environmental stress Physiological strain Hypothermia Hyperthermia Potential for recuperation

Table 3.3.1 : Différentes facettes du climat pour le tourisme, leur signification et leur impact (de Freitas, 2003: 49)

Deuxièmement, le climat et les conditions climatiques jouent un rôle important dans le choix des destinations par les touristes (Dubois et al., 2009; Goessling et al., 2006; Hamilton & Lau, 2006; Scott et al., 2008) (cf. chapitre 2.5.2). Le climat est ainsi un facteur attractif.

Enfin, tout comme les vacances scolaires, le climat est un important facteur provoquant la saisonnalité du tourisme (Besancenot, 1989; Yu et al., 2009).

Suite au changement climatique, cette ressource pour le tourisme est et sera affectée de plusieurs manières (cf. chapitre 2.5.2). Le choix des destinations privilégiées par les touristes pourrait ainsi changer, de même que la saisonnalité.

4. IMPACT DE L'ÉVOLUTION DES
PRÉCIPITATIONS NEIGEUSES SUR LA
PRATIQUE DES ACTIVITÉS
TOURISTIQUES HIVERNALES

4.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE

Ce chapitre comprend deux articles scientifiques. Le premier, *“Seasonal Trends and Temperature Dependence of the snowfall/precipitation-Day Ratio In Switzerland”*, a été publié dans *Geophysical Research Letters*¹. Le second, *“Monthly trends and the corresponding altitudinal shift of the snowfall / precipitation-day ratio”*, a été soumis à *International Journal of Climatology*². Tous deux analysent l'évolution de la part des précipitations neigeuses par rapport aux précipitations totales soit par une comparaison entre l'hiver et le printemps soit par l'analyse plus détaillée des mois de novembre à avril.

Nos articles ont pour objectif de mettre en évidence l'impact du changement de température sur les précipitations neigeuses en minimisant l'effet de la variabilité dans la fréquence et l'intensité des précipitations. Au total, 76 stations météorologiques, situées à des altitudes comprises entre 200 et 2700 m, ont été analysées (figure 4.1.1).

Le ratio de nombre de jours avec précipitations neigeuses (SD) par rapport au nombre total de jours de précipitations (PD) pour les saisons d'hiver (décembre, janvier et février) et de printemps (mars et avril) ainsi que celui de chaque mois a été calculé pour toutes les années comprises entre 1961 et 2008.

Le premier article s'intéresse à l'évolution saisonnière de ce ratio, ce dernier a été calculé pour les périodes de 1961-2008 et 1979-2008 (voir également des compléments dans l'annexe 1). Le second article traite ces mêmes données mais de manière mensuelle, ainsi c'est l'évolution du ratio de

¹ Serquet, G., Marty, C., Dulex, J.-P. & Rebetz, M., 2011: Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 38, doi:10.1029/2011GL046976, L07703.

² Serquet, G., Marty, C. & Rebetz, M., Submitted: Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snowfall/precipitation-day ratio.

chaque mois qui a été calculé pour la période 1961-2008. Ensuite, pour chaque station, l'évolution saisonnière et mensuelle du ratio de SD/PD a été mise en relation avec son altitude ainsi qu'avec sa température moyenne au début de la période analysée. D'autre part, le premier article propose, pour la saison hivernale, un modèle empirique de prévisions de l'évolution future du ratio de SD/PD en fonction de différentes températures moyennes de départ.

Afin d'affiner l'influence de l'altitude sur l'évolution des ratios de SD/PD, les stations ont été regroupées en six classes altitudinales. Dans le second article, pour chaque classe d'altitude, la pente de l'évolution durant la période observée ainsi que les ratios mensuels de SD/PD de 1961 et de 2008 prévus par le modèle ont été calculés. Les ratios de 1961 et de 2008 de chaque mois et de chaque classe altitudinale ont ensuite été comparés afin de comprendre leur évolution passée et de prévoir leur évolution future.

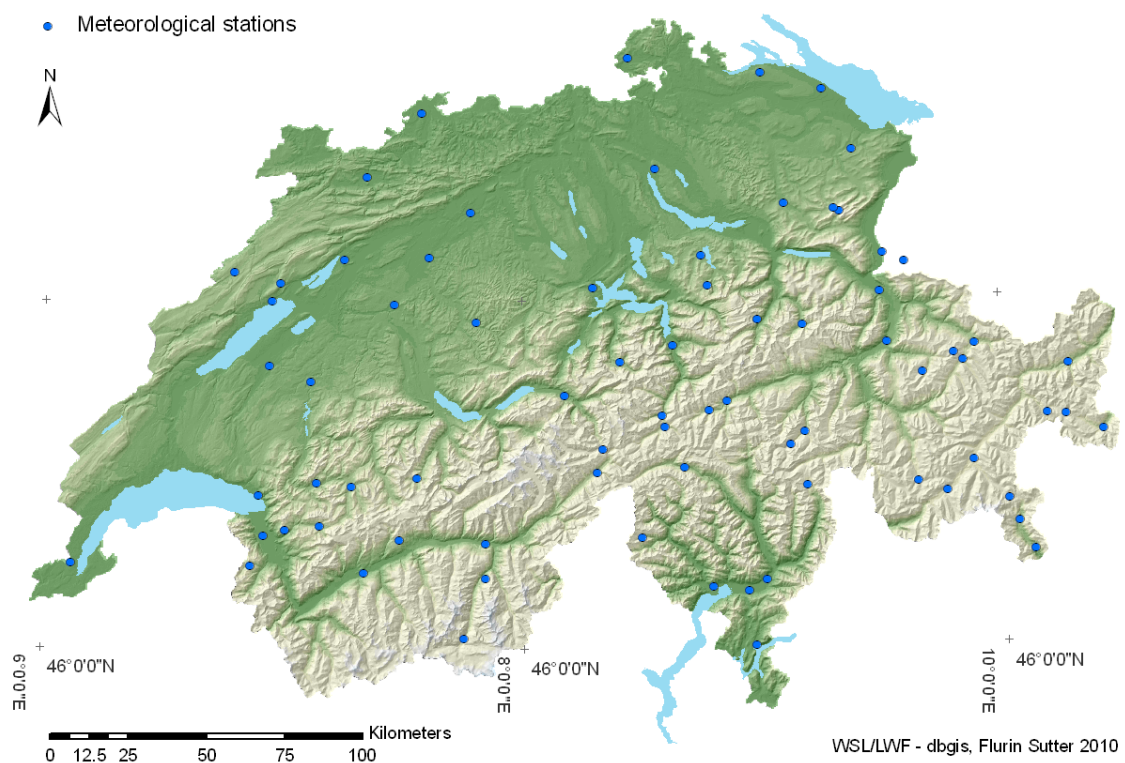


Figure 4.1.1 : Carte des stations météorologiques utilisées

4.2. ARTICLE 1 : SEASONAL TRENDS AND TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE SNOWFALL/PRECIPITATION-DAY RATIO IN SWITZERLAND

Gaëlle Serquet¹, Christoph Marty², Jean-Pierre Dulex¹ and Martine Rebetez¹

¹ WSL Swiss Federal Research Institute, Lausanne, Switzerland

² WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos, Switzerland

4.2.1. Abstract

This paper analyzes the proportion of snowfall days relative to precipitation days, in order to assess the impact of changing temperatures on snowfall, while minimizing the impact of variations in precipitation frequency and intensity. We analyzed the ratio of snowfall days to precipitation days for up to 100 years at 76 meteorological stations, spanning elevations from 200 to 2700 m asl in Switzerland. Our results show clear decreasing trends in snowfall days relative to precipitation days. These decreases are connected to increasing temperatures. The decrease in snowfall days was stronger at lower elevations, i.e. at locations with temperatures closer to the melting point. We observed a baseline seasonal temperature threshold of $-2.7\text{ °C} \pm 0.8\text{ °C}$ in winter and $-3.8\text{ °C} \pm 0.6\text{ °C}$ in spring, above which the decrease in snowfall days grew rapidly. From these observations, we developed an empirical model that can be used to evaluate the impact of future temperature increases on snowfall, independent of changes in the frequency and intensity of precipitation events.

4.2.2. Introduction

A general decreasing trend in snow cover has been clearly demonstrated in the Northern Hemisphere (IPCC, 2007a). It has also been shown for mountain regions (e.g. Ke et al., 2009; Micu, 2009; Morin et al., 2008; Xu et al., 2008), in particular for the European Alps (Hantel & Hirtl-Wielke, 2007; Schoner et al., 2009; Wielke et al., 2004), including the Swiss Alps (Latnser & Schneebeli, 2003; Marty, 2008; Scherrer & Appenzeller, 2006; Scherrer et al., 2004; Wielke et al., 2004). Decreasing trends in the proportion of snow water equivalent to total or extreme precipitation have also been investigated at several locations in the United States and Japan (Feng & Hu, 2007; Huntington et al., 2004; Knowles et al., 2006; Takeuchi et al., 2008). The decrease in snow cover is statistically significant in many locations at least since the early 1980s or late 1970s (Hantel & Hirtl-Wielke, 2007; IPCC, 2007a; Latnser & Schneebeli, 2003). However, particularly in the European Alps, the high interannual variability in precipitation amounts and the impact of the NAO index have created uncertainty (Durand et al., 2009; Marty, 2008; Morin et al., 2008; Scherrer & Appenzeller, 2006; Scherrer et al., 2004; Schoner et al., 2009). The exact impact of changing temperatures is difficult to measure because of the potentially large variation in total precipitation through time. In addition, the impact of increasing temperatures varies, depending on region and altitude (Scherrer & Appenzeller, 2006; Scherrer et al., 2004; Wielke et al., 2004; Xu et al., 2008).

In this paper we seek to isolate the impact of changing temperatures on snowfall from the impact of changes in the frequency and intensity of total precipitation. Our approach is to analyze the proportion of snowfall days compared to precipitation days. This simple measure does not require high-quality snow water equivalent data or estimates of the phase change based on temperature. This day-based snow/precipitation ratio is complementary to other methods that compare the snow water equivalent to total precipitation volume (Feng & Hu, 2007; Jonas et al., 2009; Knowles et al., 2006; Latnser & Schneebeli, 2003). We determine the relative frequency of snowfall, independent of the variability in timing and intensity of precipitation events, in order to isolate the impact of long-term temperature trends on snowfall.

Our method aims to characterize more precisely the impact of increasing temperatures on snowfall frequency stratified by season and elevation. We chose Switzerland for this analysis to take advantage of its particularly dense network of snow and precipitation stations: in just 41,000 sq km of terrain, there are 76 stations with at least 30 years of daily data. This dense observational network has been used to investigate the consequences of climate change in general, and particularly to study the decrease in snow cover through time (Latnser & Schneebeli, 2003; Marty, 2008; Scherrer &

Appenzeller, 2006; Scherrer et al., 2004; Wielke et al., 2004). Here we compute the seasonal trend in the proportion of snowfall days relative to precipitation days during the last 30 to 100 years at elevations up to 2,700 m asl.

4.2.3. Data and methods

We used daily precipitation and snowfall measurements, as well as monthly average temperature data, from 76 Swiss meteorological stations located between 200 m asl and 2700 m asl (Figure 4.1.1). Snowfall was manually measured by the Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology (MeteoSwiss) and the WSL Institute of Snow and Avalanche Research SLF, and compared to nearby precipitation and temperature data collected by MeteoSwiss. We excluded all series that ended before 2005 or that were shorter than 30 years. We also excluded series with more than 10% data missing during the two time intervals that we analyzed (1961 – 2008 and 1979 – 2008). 1961 and 1979 correspond to two thresholds when new series of data became available: 52 and 76 stations respectively.

We computed the monthly sum of precipitation days (PD) and the monthly sum of snowfall days (SD). Following common practice, we chose a threshold of 1 mm of total precipitation to define a PD and 1 cm of snow to define a SD. We considered all days with at least one cm of snow (that is, all SD's) as also being PD's, even in cases where the total precipitation was missing or recorded as less than 1 mm. Thus SD's are a subset of PD's. To examine the evolution of the SD/PD ratio through time (Figure 4.2.1), we grouped the stations into six altitude classes (< 500 m asl, 501 – 800 m asl, 801 – 1100 m asl, 1101 – 1400 m asl, 1401 – 1700, and > 1701 m asl). In Figure 4.2.1, we show the average SD/PD ratio, calculated whenever there were at least three stations per altitude group. We computed the SD/PD ratio of every meteorological station for winter (December – January – February) and for spring (March – April).

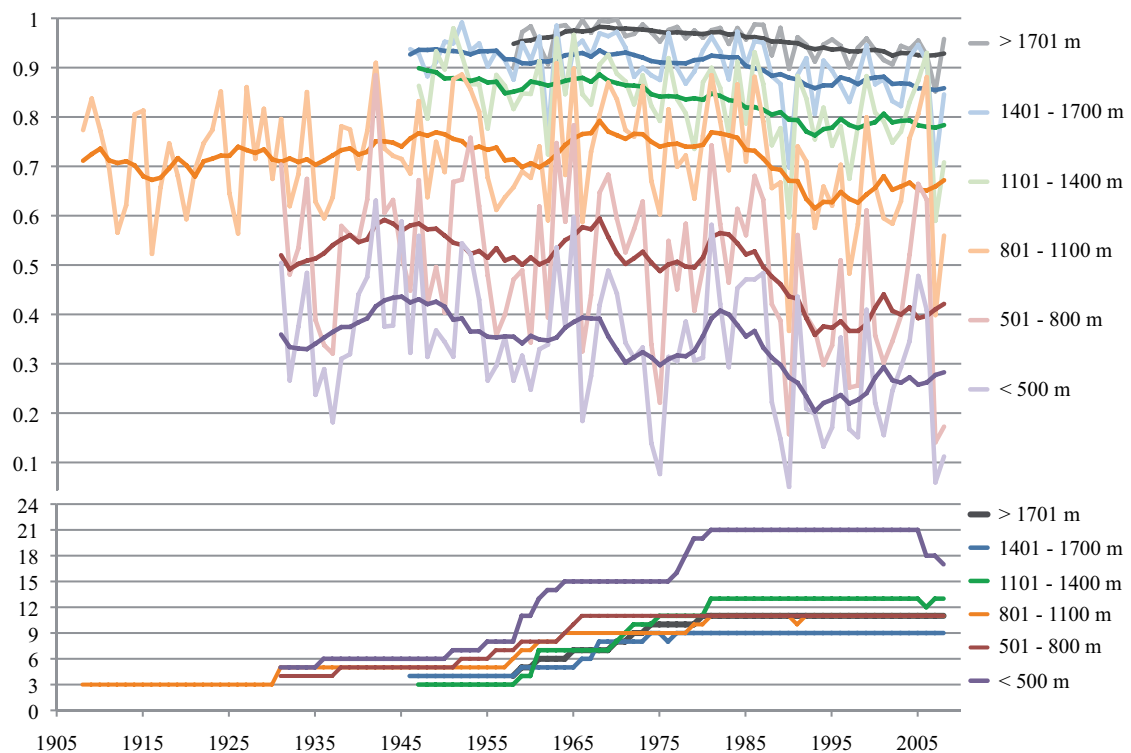


Figure 4.2.1 : Winter (December – January – February) mean ratio of snowfall vs precipitation days (SD/PD) by altitudinal categories from 1908 to 2008. Bold lines are unweighted moving averages with an 11-year window (with uncorrected 5-year edges using the available points). The lower panel shows changes in the number of available stations through time.

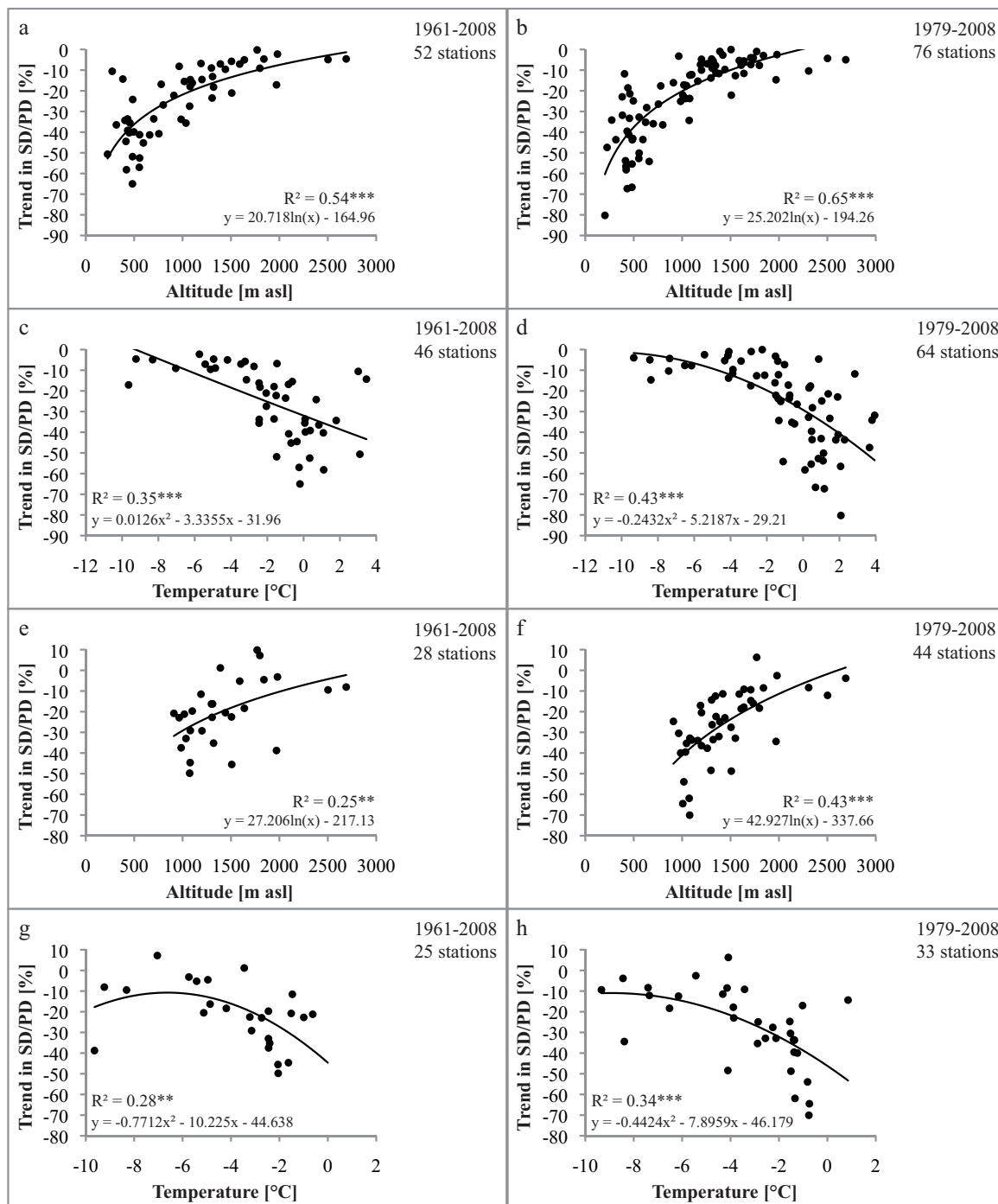
For spring, we eliminated the stations below 900 m asl because they have too few SD's. For each station and each season, we calculated the long-term linear regression trends in the SD/PD over the two analysis periods (1961-2008 and 1979-2008). We then compared the fitted regression values for the beginning and end of each period (1961 and 2008, or 1979 and 2008), to estimate the percentage changes in SD/PD over the two intervals (48 and 30 years, respectively). We correlated the changes in winter and spring SD/PD at each meteorological station with the station's altitude in m asl. We also correlated the SD/PD changes at each station with the seasonal temperature (i.e., winter or spring, as defined above), averaged over a decade surrounding the beginning of each analysis interval (i.e., 1956 to 1965, and 1974 to 1983). We characterized the seasonal baseline

temperature for each station using these decadal averages rather than the individual years 1961 and 1979, in order to minimize the effects of interannual variability in the temperature data. Due to limitations in the available temperature records, these seasonal baseline temperatures could only be defined for a subset of the stations (46 for 1961-2008 and 64 for 1979-2008).

4.2.4. Results

Our data, starting in 1908 for three stations between 800 and 1100 m asl and later at the other elevations, show a general decreasing trend in SD/PD, particularly during the 1980s and 1990s (Figure 4.2.1). The winter SD/PD's decreased over the intervals 1961-2008 and 1979-2008 for all stations at all elevations, with 60% of the trends being statistically significant ($p < 0.05$) for 1961-2008 and 29% for 1979-2008. The spring SD/PD's decreased at 89% of the stations over the interval 1961-2008, and at 98% of the stations over the interval 1979-2008. 46% of the spring trends were significant ($p < 0.05$) for 1961-2008 and 50% for 1979-2008.

The correlations between station altitude and SD/PD changes were significant ($p < 0.01$) or highly significant ($p < 0.001$), both for winter and for spring (Figure 4.2.2). For the two time periods, our results show that the decrease in SD/PD was greater at lower altitude than at higher altitude, and also greater in spring than in winter (Figure 4.2.2 and Table 4.2.1a). The correlations between SD/PD changes and the stations' baseline temperatures were also significant ($p < 0.01$) or highly significant ($p < 0.001$), both in winter and in spring (Figure 4.2.2). For the two time periods and for almost all baseline temperature values, the decrease in SD/PD was greater in spring than in winter. The higher the baseline temperature, the stronger the decrease was in the SD/PD ratio (Table 4.2.1b). For stations with relatively low baseline temperatures, the changes in SD/PD mostly ranged from +10 to -20%, whereas for stations with higher baseline temperatures, the decreases ranged as high as 80% over the period 1979-2008. Results of the quadratic equations show that stations whose SD/PD ratios decreased more than 20% had baseline temperatures at the start of the period that lay above a threshold of $-2.7 \text{ °C} \pm 0.8 \text{ °C}$ in winter and $-3.8 \text{ °C} \pm 0.6 \text{ °C}$ in spring.



** p < 0.01 *** p < 0.001

Figure 4.2.2 : Changes in wintertime SD/PD (a to d) and springtime SD/PD (e to h) during the two study periods [%] as a function of altitude [m asl] (a, b, e and f) and baseline seasonal temperature at the start of each study period (c, d, g and h).

During the two observation periods, the mean annual temperature in Switzerland (calculated from the 12 MeteoSwiss reference stations with homogenized temperature records (Begert et al., 2005; Rebetez & Reinhard, 2008)) has increased by 1.82 K (1961-2008) and 1.48 K (1979-2008), while mean winter temperature has increased by 1.86 K and 1.29 K, respectively, and mean spring temperature has increased by 1.96 K for both periods.

a	Changes in SD/PD [%] for selected station altitudes [m asl]			b	Changes in SD/PD [%] for selected baseline temperatures [°C]			c	Changes in SD/PD [%] expected per 1 K temperature increase		
	Time periods	Altitude [masl]	Winter Spring		Temp [°C]	Winter Spring	Temp [°C]		Winter Spring		
1961-2008	500	-36.2	-48.1	-8	-4.5	-12.2	-8	-2.4	-6.6		
	800	-26.5	-35.3	-6	-11.5	-11.1	-6	-6.2	-5.9		
	1100	-19.9	-26.6	-4	-18.4	-16.1	-4	-9.9	-8.6		
	1400	-14.9	-20.0	-2	-25.2	-27.3	-2	-13.6	-14.7		
	1700	-10.9	-14.8	0	-32.0	-44.6	0	-17.2	-24.0		
	2000	-7.5	-10.3	2	-38.6	-68.2	2	-20.7	-36.7		
	2300	-4.6	-6.5	4	-45.1	-97.9	4	-24.2	-52.6		
1979-2008	500	-37.6	-70.9	-8	-3.0	-11.3	-8	-2.3	-8.8		
	800	-25.8	-50.7	-6	-6.7	-14.7	-6	-5.1	-11.4		
	1100	-17.8	-37.0	-4	-12.2	-21.7	-4	-9.4	-16.7		
	1400	-11.7	-26.7	-2	-19.7	-32.2	-2	-15.3	-24.9		
	1700	-6.8	-18.4	0	-29.2	-46.2	0	-22.6	-35.7		
	2000	-2.7	-11.4	2	-40.6	-63.7	2	-31.4	-49.3		
	2300	0.8	-5.4	4	-54.0	-84.8	4	-41.7	-65.6		

Table 4.2.1 : Changes in SD/PD [%] for selected station altitudes (a), for selected baseline temperatures [°C] (b) and changes in SD/PD [%] expected per 1 K temperature increase for selected baseline temperatures [°C] (c) for the winter and spring seasons during the intervals 1961-2008 and 1979-2008.

We created a simple empirical model for the SD/PD changes in our study region, using the regression curves shown in Figure 4.2.2. We calculated the SD/PD changes predicted by these regression curves for selected altitudes (Table 4.2.1a) and baseline temperatures (Table 4.2.1b). We then normalized these predicted changes for baseline temperatures by the observed national average winter temperature changes over the two study periods (1.86 K and 1.29 K, respectively), to obtain

the corresponding decrease in SD/PD ratio per 1 K, as a function of the starting baseline temperature (Table 4.2.1c). These normalized SD/PD changes allow us to estimate the impact of a future temperature rise on the SD/PD ratio in this region.

4.2.5. Discussion

There was a general decrease in SD/PD, both for winter and spring. This decrease was clearly more pronounced at lower than at higher elevation. This is because the temperature is more frequently close to the melting point at lower elevations. It will be even more so in a warmer climate. SD/PD's would be expected to decrease much less at higher altitudes, where temperatures are generally much lower than the melting point. A general increase in temperature, even by 1.48 or 1.82 K, as observed in the region since the 1960s or 1970s, still leaves higher locations with a temperature generally much lower than the melting point and thus with little or no impact on the snowfall part of precipitation.

The higher decrease in SD/PD observed in spring compared to winter can be attributed in part to higher temperatures, i.e. temperatures more frequently close to the melting point. The higher decrease in SD/PD in springtime may also be attributed to the higher temperature increase observed in spring, compared to winter, during both periods (1961-2008 and from 1979-2008). Our results show that the impact of increasing temperatures was clearly higher for baseline temperatures above a threshold of $-2.7\text{ °C} \pm 0.8\text{ °C}$ in winter and $-3.8\text{ °C} \pm 0.6\text{ °C}$ in spring. These baseline temperature thresholds can be considered as the turning point for decreases in the SD/PD ratio. These thresholds can be compared with the -5 °C threshold observed by Knowles et al. (2006) for wet-day minimum temperature between November and March in the Western United States. The abrupt change in SD/PD at the end of the 1980's for stations below 1100 m asl demonstrates that the decreasing snow cover in the Alps as observed by Marty (2008) and Durand et al. (2009) is at least partly due to a phase change in the precipitation regime.

Our results allow future snowfall decreases to be estimated from predicted temperature increases and current baseline seasonal temperatures (Tables 4.2.1b and 4.2.1c). For instance, for a future temperature rise of 1 K, in locations with a present winter temperature of -8 °C , our empirical model shows a decrease in SD/PD of 2.3 to 2.4%, whereas for a present temperature of -1 °C , we can expect a decrease of 15.4 to 18.7% (Table 4.2.1c). We consider that these estimates should be most

applicable to temperature increases between 1.5 and 2 K, corresponding to the observed increase during our study periods.

4.2.6. Conclusions

Our analysis of trends in snowfall days (SD) relative to precipitation days (PD) over 76 stations between 200 and 2700 m asl in Switzerland shows clear decreasing trends in connection with increasing temperatures during the study periods (1961 to 2008 and 1979 to 2008). SD/PD's decreased both in winter (DJF) and in spring (MA), with even stronger decreases during spring, probably because baseline temperatures were warmer, and temperature increases were greater, during that season. The decrease in SD/PD was clearly greater at lower elevations, i.e. at locations with temperatures closer to the melting point, with a threshold corresponding to baseline temperatures of $-2.7\text{ °C} \pm 0.8\text{ °C}$ in winter and $-3.8\text{ °C} \pm 0.6\text{ °C}$ in spring. Above these thresholds, the decrease in SD/PD ratios could be as high as 80% over the 30 years from 1979 to 2008. Our results form the basis of an empirical model that can be used to evaluate the impact of future temperature increases on snowfall. This model should be most reliable for temperature increases between 1.5 and 2 K. Depending on the present seasonal temperature at one location, we can compute the impact of temperature increases on the incidence of snowfall days, independent of the frequency and intensity of the precipitation events.

4.2.7. Acknowledgements

This work was supported in part by the Forest Investigation Programme, a joint project between the Swiss Federal Office for the Environment and the Swiss Federal Research Institute WSL, and by Canton Vaud, Vaud regional associations (ADAEV, ADNV, ADPE, ARDA, Nyon Region) and OTV, Switzerland. We are grateful to MeteoSwiss for providing the data, to Flurin Sutter for drawing the map and to John Innes and James Kirchner for their useful comments and suggestions.

4.3. ARTICLE 2 : MONTHLY TRENDS AND THE CORRESPONDING ALTITUDINAL SHIFT OF THE SNOWFALL / PRECIPITATION-DAY RATIO

Gaëlle Serquet¹, Christoph Marty² and Martine Rebetez¹

¹ WSL Swiss Federal Research Institute, Lausanne, Switzerland

² WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos, Switzerland

4.3.1. Abstract

The exact impact of changing temperatures on snow amounts is extremely important for the tourism and ski industry in mountain resorts, but it is difficult to measure, particularly at different elevations and at different times of the snow season. Here we analyze the snow days vs precipitation days ratios for each month from November to April in Switzerland and at 52 meteorological stations located between 200 and 2700 m asl over a 48 year time span. Our results show that the present conditions in December, January and February correspond to those measured in the 1960's in November and March. During the whole snow season, the snowfall ratios have been transferred in elevation by at least 300 m from 1961 to 2008.

Keywords

Altitude, Climate change, Ski season, Snow, Snow precipitation, Snowfall, Switzerland, Temperature

4.3.2. Introduction

A decrease in snow precipitation and snow cover, including its seasonal variation, would be extremely important for mountainous regions, not only for hydrological impacts but also for winter tourism and the leisure industry in winter ski resorts. However, the impact of changing temperatures on snowfall amounts is difficult to measure precisely because of the large natural variability of precipitation. In addition, the impact of increasing temperatures varies, depending on region and altitude (Scherrer & Appenzeller, 2006; Scherrer et al., 2004; Wielke et al., 2004; Xu et al., 2008).

A general decreasing trend in snow cover has been clearly demonstrated in the Northern Hemisphere (IPCC, 2007a). It has also been shown for mountain regions (e.g. Ke et al., 2009; Micu, 2009; Morin et al., 2008; Xu et al., 2008), in particular for the European Alps (Hantel & Hirtl-Wielke, 2007; Schoner et al., 2009; Wielke et al., 2004), including the Swiss Alps (Laternser & Schneebeli, 2003; Marty, 2008; Scherrer & Appenzeller, 2006; Scherrer et al., 2004; Wielke et al., 2004). A slight decrease was also observed in the annual maximum snow depth and snowfall (Marty & Blanchet, Submitted). The decrease in snow cover is mostly significant since the early 1980s or late 1970s (Hantel & Hirtl-Wielke, 2007; IPCC, 2007a; Laternser & Schneebeli, 2003). However, particularly in the European Alps, the high interannual variability in precipitation amounts and the impact of the NAO index have created uncertainty (Durand et al., 2009; Marty, 2008; Morin et al., 2008; Scherrer & Appenzeller, 2006; Scherrer et al., 2004; Schoner et al., 2009).

In addition, the impact of the observed increasing trend in temperature has usually been investigated on a seasonal basis only. On a monthly basis, the relationship between this increase in temperature and snowfall is still largely unknown. Of particular concern are the autumn and spring months and variations with altitude. Serquet et al. (2011) have developed a method to analyze the proportion of snowfall days relative to precipitation days. This method can be used to assess the impact of changing temperatures on snowfall while minimizing the impact of variations in precipitation frequency and intensity. It does not require high quality snow water equivalent data or estimates of the phase change based on temperature.

Here we apply the method of Serquet et al. (2011) to characterize more precisely the impact of increasing temperatures on snowfall frequency, stratified by month and elevation. We chose Switzerland for this analysis to take advantage of its particularly dense network of snow, temperature and precipitation stations at various elevations and regions in the Alps.

4.3.3. Data and methods

We used daily snowfall and precipitation data, as well as monthly average temperature values, from 52 Swiss meteorological stations located between 200 and 2700 m asl. Snowfall was manually measured by the Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology (MeteoSwiss) and the WSL Institute of Snow and Avalanche Research SLF, and compared to nearby precipitation and temperature data collected by MeteoSwiss.

We manually checked the data for inhomogeneities, taking meta-data (relocation of stations) into account. When both MeteoSwiss and SLF had snowfall measurements corresponding to the same meteorological station, we chose the series that was closer, that had the fewest missing data, or that was more homogeneous. For some locations we used data from SLF and MeteoSwiss successively. We excluded series with more than 10% data missing during the time interval that we analyzed (1961-2008) or that ended before 2005.

We computed the monthly sum of precipitation days (PD) and the monthly sum of snowfall days (SD). Following common practice, we chose a threshold of 1 mm of total precipitation to define a PD and 1 cm of snow to define a SD. We considered all days with at least one cm of snow (that is, all SD's) as also being PD's, even in cases where the total precipitation was missing or recorded as less than 1 mm. Thus SD's are a subset of PD's.

We computed the SD/PD ratio of every meteorological station for each common snow month from November to April. For each month, we excluded the stations that had a SD/PD average ratio over the analysis period (1961-2008) less than 20% because too frequent zero values prevent a meaningful trend analysis: these only make sense if there is a minimum amount of snowfall over the period.

For each station and each month, we calculated the long-term logistic regression trends in the SD/PD over the analysis period (1961-2008). We chose logistic regression as our data are discrete and bounded. Logistic regression is a special case of a generalization of regression techniques (the generalized linear models (McCullagh & Nelder, 1989). It is appropriate for dealing with number counts (percentages) and probabilities, for which the assumptions of linear regression with uniform variance and Gaussian residuals are not satisfied.

In a first step we then compared the fitted regression values for the beginning and end of the period (1961 and 2008), to calculate the percentage changes in SD/PD over the interval (48 years). In a second step, we analyzed the impact of the ambient temperature on these SD/PD changes. We

correlated the monthly SD/PD changes at each station with the corresponding monthly temperature, averaged over the decade surrounding the beginning of the analysis interval (i.e. 1956 to 1965). We characterized the monthly baseline temperature for each station using this decadal average rather than the individual year 1961 in order to minimize the effects of interannual variability in the temperature data. Due to limitations in the available temperature records, these monthly baseline temperatures could only be defined for 46 of the stations. Additionally we correlated the monthly SD/PD changes at each meteorological station with the station's altitude in m asl.

We grouped the stations into six altitude classes (< 500 m asl, 501-800 m asl, 801-1100 m asl, 1101-1400 m asl, 1401-1700, > 1701 m asl) so that we could examine in more detail the impact of altitude on the SD/PD ratio's evolution for each month. We then computed the linear regression slopes of each altitude class and for each month. We also computed the fitted regression values for the beginning and end of the period (1961 and 2008). We compared the resulting fitted values using two thresholds, i.e. above approximately 90% (corresponding to a month with non-important rainfall) and above approximately 50% (corresponding to a month with a majority of snow days), which enabled us to analyze the evolution of the SD/PD ratio through time.

4.3.4. Results

All months show a general decreasing trend in SD/PD. For each month, the SD/PD's decreased at a minimum of 90% of the stations over the interval 1961-2008, except in February (76%). All regions and all altitudes are affected, with 58% of the trends being statistically significant ($p < 0.05$) in January, 34% in March, 30% in December, 25% in November, 24% in April and 6 % in February.

The correlations between SD/PD changes and the stations' baseline temperatures were all significant ($p < 0.05$) or highly significant ($p < 0.001$), except in April (Figure 4.3.1). February's and November's SD/PD changes show the lowest significance to baseline temperature; baseline temperature only explains 17% (November) and 13% (February) of the SD/PD changes. For the other months with significant correlations, baseline temperature explains 32% (January) to 45% (December) of the changes.

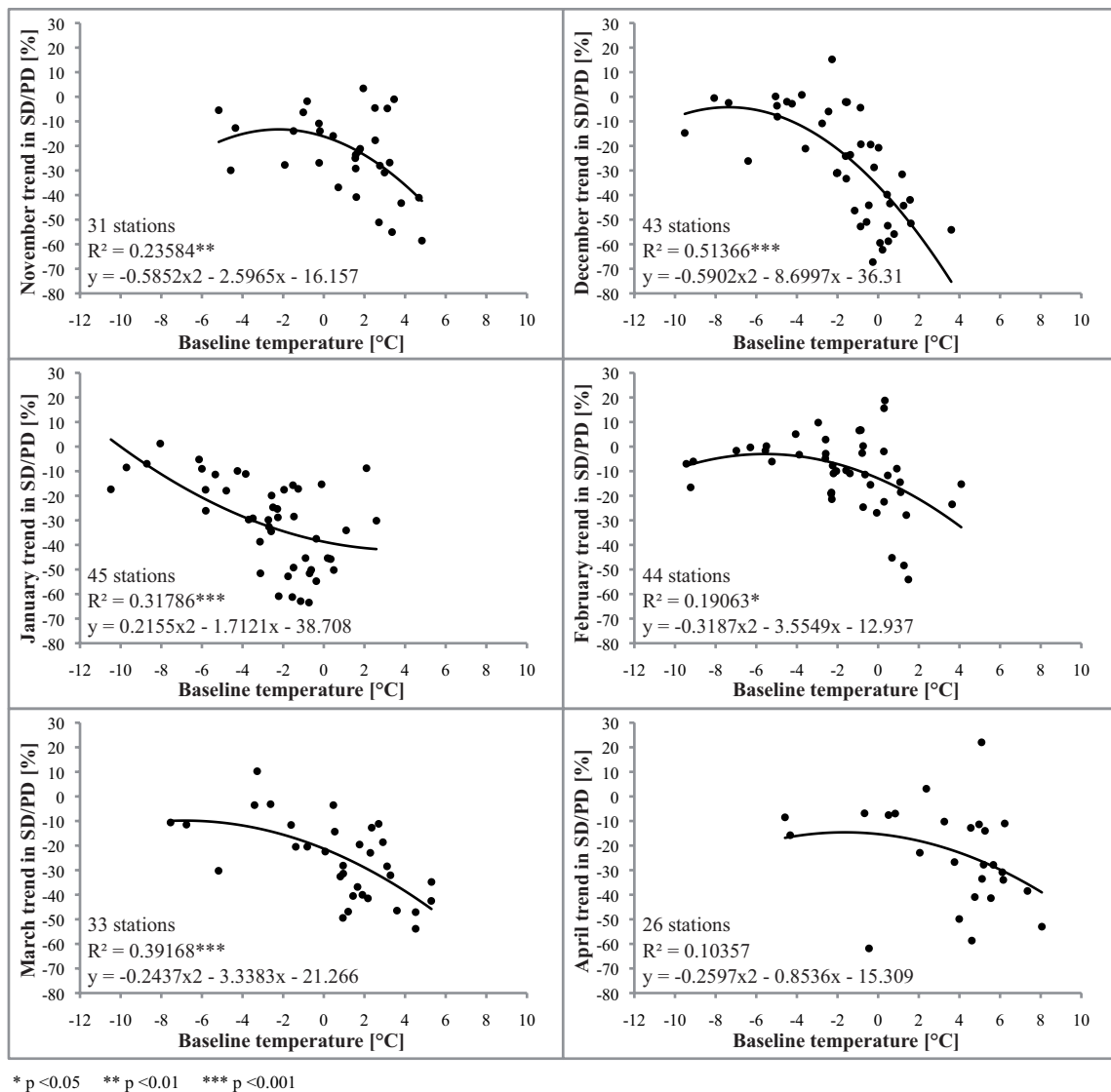


Figure 4.3.1: Changes in monthly SD/PD [%] during the study period 1961-2008 as a function of monthly baseline temperature at the start of the study period

The correlations between SD/PD changes and station altitude were significant ($p < 0.05$) or highly significant ($p < 0.001$) for all months (Figure 4.3.2). The decrease was greater at lower altitudes. February's SD/PD changes show the lowest dependence on altitude; elevation only explains 11% (February) of the SD/PD changes. For the other months, elevation explains 24% (April) to 75% (December) of the changes.

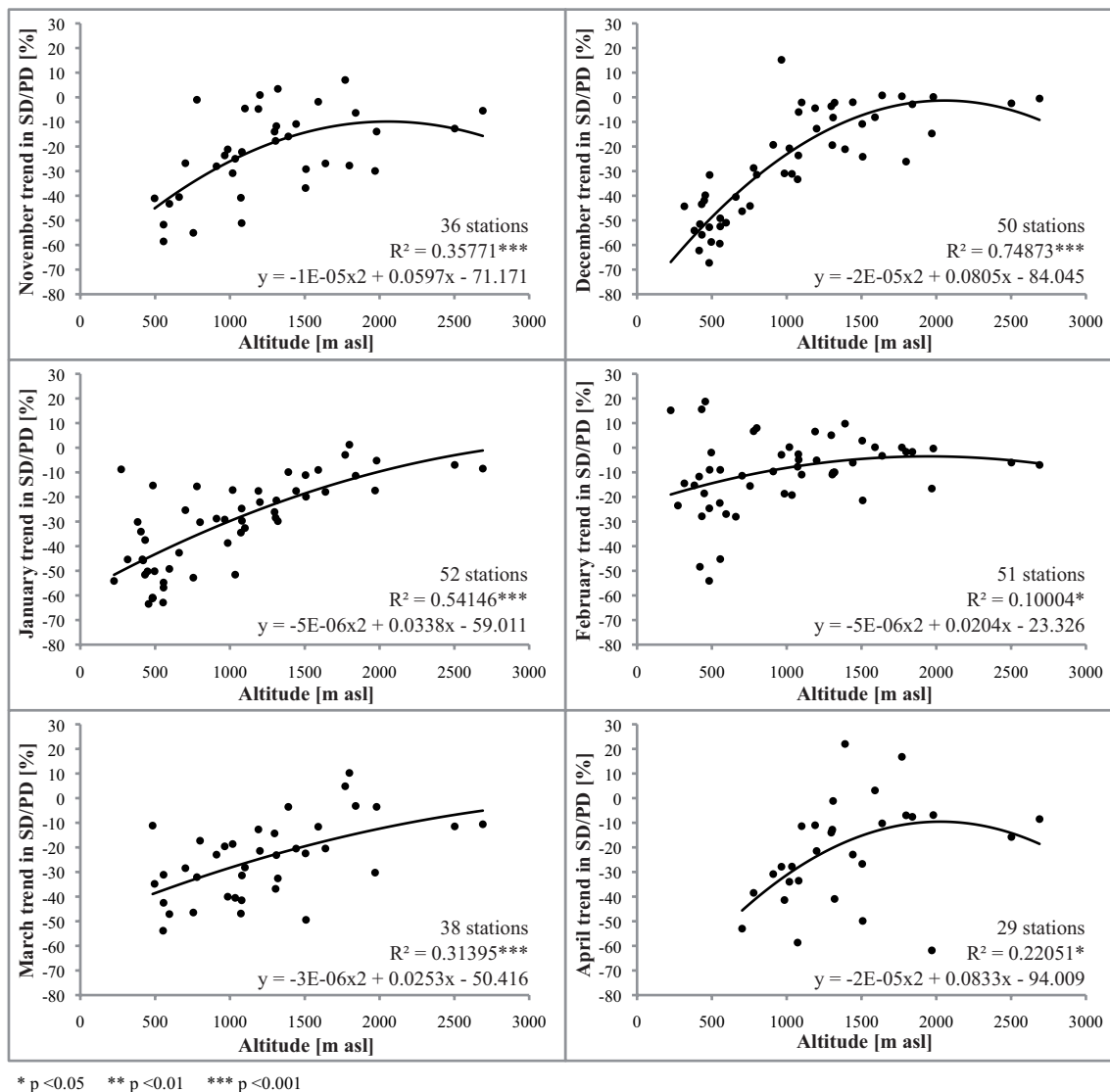


Figure 4.3.2: Changes in monthly SD/PD [%] during the study period 1961-2008 as a function of altitude [m asl]

In Table 4.3.1, we show the slopes of the linear regression of SD/PD ratios over the observed period for each month. 50% of the SD/PD slopes in each altitude class were significant ($p < 0.05$). January was the month with the greatest decreasing slopes (between -1.3 and -6% SD/PD per decade) compared to the other months, and all slopes of each altitude class were significant ($p < 0.05$). In contrast, February shows the smallest slopes (between -0.4 and -2% SD/PD per decade) at all altitude

classes. In November, February and April, the SD/PD slopes are smallest at the altitude class 1101-1400 m asl and in December, January and March at the altitude class > 1701 m asl.

Month	Slopes [%]					
	< 501	501-800	801-1100	1101-1400	1401-1700	> 1700
November		-0.28	-0.30	-0.11	-0.34 *	-0.24 *
December	-0.47 *	-0.53 *	-0.26	-0.18	-0.17	-0.13 *
January	-0.44 *	-0.60 *	-0.57 **	-0.42 ***	-0.30 **	-0.13 ***
February	-0.13	-0.20	-0.15	-0.04	-0.11	-0.09 *
March		-0.31	-0.46 *	-0.35 *	-0.47 **	-0.12
April			-0.31	-0.14	-0.28	-0.26 *

* p < 0.05 ** p < 0.01 *** p < 0.001

Table 4.3.1: Linear regression slopes [% year⁻²] of the evolution in snowfall/precipitation-day ratios from 1961 to 2008 at different altitude classes [m asl].

In 1961, the fitted SD/PD ratios were higher than the threshold of approximately 90% starting from the altitude class 1101-1400 m asl in January, from 1401-1700 m asl in December, February and March, and from 1701 m asl in November and April (Table 4.3.2). In 2008, the fitted SD/PD ratios were higher than the 90% threshold by one or two altitude classes when compared to 1961, except in February.

Month	Fitted ratios [%]											
	< 501 m asl		501-800 m asl		801-1100 m asl		1101-1400 m asl		1401-1700 m asl		> 1700 m asl	
	1961	2008	1961	2008	1961	2008	1961	2008	1961	2008	1961	2008
November			34	20	53	38	62	57	77	61	91	80
December	40	18	56	31	71	59	82	73	89	82	97	91
January	44	23	64	36	84	57	92	73	98	83	99	93
February	36	30	55	45	77	70	85	84	95	89	99	95
March			39	24	67	45	79	62	89	67	96	90
April					46	31	52	45	64	51	90	78

Table 4.3.2: Fitted snowfall/precipitation-day ratios [%] for 1961 and 2008 at different altitude classes.

In 1961, the fitted SD/PD ratios were higher than the threshold of 50% starting from the altitude class 501-800 m asl in December, January and February, from 801-1100 m asl in November and March, and from 1101-1400 m asl in April (Table 4.3.2). In 2008, this trend was evident, but the relationship applied for one altitude class higher than in 1961.

January shows the greatest 1961 fitted SD/PD ratios at all altitude classes and April the smallest compared to the other months. However, the monthly ratios all show very high values above 1700 m asl. In 2008, February shows the greatest values at all altitude classes and April the smallest. The monthly values are generally more homogeneous at higher altitudes.

During the observation period, the mean annual temperature in Switzerland over the interval 1961 to 2008, calculated from the 12 MeteoSwiss reference stations with homogenized temperature records (Begert et al., 2005; Rebetez & Reinhard, 2008) has increased by 1.82 K, while mean November temperature has increased by 0.70 K, December by 2.00 K, January by 2.10 K, February by 1.33 K, March by 2.47 K and April by 1.44 K.

4.3.5. Discussion

There was a general decrease in SD/PD for all months during the interval 1961-2008. The decrease in SD/PD was clearly more pronounced at lower elevations and at higher baseline temperatures. The greatest decrease was observed at the altitude class 501-800 m asl and not below. We suspect that this may be a result of the frequent zero values at the lowest altitude stations, which either prevented the use of some of these or left no potential for a large decrease in SD/PD ratios.

Despite the general increase in observed temperature in the region since the 1960s, higher locations still generally have temperatures much lower than the melting point. As a result, there is little or no impact on the snowfall part of precipitation (Serquet et al., 2011).

At all altitude classes, the decrease was least pronounced in February (between -0.4 and -2% SD/PD per decade). This is probably due mainly to lower baseline temperatures, but also because the mean temperature in February has increased less than in other months. These reasons may also explain the lower dependence of February's SD/PD changes on baseline temperature and altitude. Mean November temperatures have increased even less than in February but as the baseline temperatures are closer to the melting point than in February, the decrease was more pronounced (between -1.1

and -3.4% SD/PD per decade). Consequently, February is currently the month with the highest SD/PD ratios in all altitude classes, whereas at the start of our observation period it was in January. In April, most baseline temperatures were above 4°C, which explains the non-significant correlation.

Snowfall is currently guaranteed (> 90% of SD/PD's) in February at altitudes of 1401-1700 m asl and above. In December, January and March, it is guaranteed above 1700 m asl, whereas in 1961 the same threshold was reached at one or two altitude classes lower. There was also a transfer in elevation of one altitude class for the threshold of approximately 50% of fitted SD/PD ratios for all months. At the altitude class 801-1100 m asl, the 2008 fitted SD/PD ratios for December (59%) and January (57%) now correspond to the 1961 November ratio (53%). Furthermore, the 2008 fitted February SD/PD ratio (70%) now corresponds to the 1961 March ratio (67%) and the 2008 fitted March ratio (45%) to the 1961 April ratio (46%). The same process can be observed at all other altitude classes. This means that the beginning and end of ski season (November and March, respectively April) in the 1960s now corresponds to the situation in the core ski season (December to February, respectively March).

4.3.6. Conclusions

Our results show clear decreasing trends in snowfall days (SD) relative to precipitation days (PD) for all months (November to April) during the study period 1961-2008. This decrease was least pronounced in February, probably because the monthly mean temperatures in February are still mostly below the melting point and because they have increased less than in other months, with the exception of November. Consequently, February is presently the month with the highest SD/PD ratios at all altitude classes, in contrast to five decades ago when January was the month with the highest ratios. In addition, snowfall is currently guaranteed (> 90% of SD/PD's) in February at an altitudinal class of 1401-1700 m asl and above, and 1700 m asl in December, January and March. For these 3 months, the snowfall guarantee transferred upwards by at least one altitude class (i.e.: 300 m) from 1961 to 2008. For all months, the threshold with one out of two precipitation days consisting of rainfall only (i.e. without measurable snowfall) has also increased by one altitude class on average.

Our analysis also shows that the current SD/PD ratios for December, January and February are similar to the 1960's SD/PD ratios for November and March. This means that with an expected

temperature increase during the coming decades at least similar to the temperature rise of recent decades, we can assume another similar altitudinal transfer of SD/PD ratios. The current situation in November and March could thus become the future situation in December, January and February. During the coming decades, the December, January and February SD/PD ratios for the altitude class 1101-1400 m asl would gradually reduce to approximately 50%. For ski resorts with a base below 1400 m asl, December, January and February will be problematic, because at least one out of two precipitation days will consist of rainfall only. The beginning and end of the ski seasons (November, March-April) will also be affected by the transfer in altitude of snowfall, as currently already approximately every second precipitation day consists of rain up to 1400 m asl in November and March and up to 1700 m asl in April.

These SD/PD ratio changes will also result in a decrease in the amount of snow available for water storage and runoff during the spring and summer months, because more and more winter precipitation will directly contribute to runoff. Impacts can also be expected on the alpine vegetation, which will experience a shorter snow season.

4.3.7. Acknowledgements

This work was supported in part by the Forest Investigation Programme, a joint project between the Swiss Federal Office for the Environment and the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), and by Canton Vaud, Vaud regional associations (ADAEV, ADNV, ADPE, ARDA, Nyon Region) and OTV, Switzerland. We are grateful to MeteoSwiss for providing the data and to John Innes for his useful comments and suggestions.

4.4. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Nos analyses de l'évolution du nombre de jours de précipitations neigeuses (SD) par rapport au nombre de jour de précipitations totales (PD) ont permis de mettre en évidence une diminution généralisée des précipitations neigeuses aux altitudes inférieures à 1700 m. La majeure partie des stations de ski ayant tout ou une partie de leur domaine à ces altitudes, sont ainsi fortement concernées. En règle générale, la diminution de SD/PD a été plus prononcée à basse altitude, soit pour les stations avec des températures proches du point de fusion. Elle a également été plus marquée au printemps (mars-avril) qu'en hiver (décembre-janvier-février). Ceci est confirmé par l'analyse mensuelle qui a mis en évidence une diminution de SD/PD plus importante en novembre, mars et avril qu'en décembre, janvier, février. Par ailleurs, les stations dont le ratio de SD/PD diminue de plus de 20% avaient des températures au début de la période analysée (1961 et 1979) situées au-dessus du seuil de $-2.7\text{ °C} \pm 0.8\text{ °C}$ en hiver et $-3.8\text{ °C} \pm 0.6\text{ °C}$ au printemps. Au-dessus de ces seuils, la diminution du ratio de SD/PD peut aller jusqu'à 80% sur 30 ans pour la période 1979 à 2008.

En hiver, le ratio de SD/PD a, par exemple, diminué de 1979 à 2008 pour les altitudes comprises entre 801 et 1100 m de 6 à 13% / 10 ans et entre 1101 et 1400 m de 4 à 10% / 10 ans. De plus, actuellement, c'est seulement en février que les précipitations neigeuses sont encore garanties dès la classe d'altitude 1401-1700 m. Pour les autres mois, elles le sont au-dessus de 1700 m. Dans les années 1960, la garantie des précipitations neigeuses se situait une à deux classes altitudinales au-dessous.

Nos résultats ont également montré que les ratios de SD/PD actuels de décembre, janvier et février correspondent à ceux de novembre et mars des années 1960. Il est fort probable qu'une augmentation au moins similaire des températures durant les prochaines décennies amène un nouveau transfert en altitude des précipitations neigeuses. La situation actuelle de novembre et mars pourrait ainsi devenir la future situation des mois de décembre, janvier et février.

La classe d'altitude 1101-1400 m, qui comprend un nombre important de domaines ou partie de domaines skiabiles, sera ainsi particulièrement touchée; aux altitudes inférieures, les ratio de SD/PD étant déjà inférieures à 60%, à l'exception du mois de février (< 70%). Pour les stations de ski concernées par ces altitudes, les mois de décembre, janvier et février deviendront problématiques puisque les ratios de SD/PD s'approcheront de 50%, voire seront inférieurs à ce seuil. Les débuts et fins de saison (novembre et mars-avril) seront également sensibles puisque les précipitations tombent

déjà sous forme de pluie près d'une fois sur deux à ces altitudes en novembre et mars et jusqu'à la classe d'altitude supérieure à 1700 m en avril.

Enfin, nos résultats forment la base d'un modèle empirique permettant d'évaluer l'impact de l'augmentation future des températures sur les précipitations neigeuses en hiver, par degré °C d'augmentation, indépendamment de la variabilité et de l'intensité des événements de précipitations.

Notre étude apporte ainsi de nouvelles connaissances concernant les possibilités d'enneigement naturel des stations de ski et permet de meilleures prévisions quant à leur enneigement futur.

Il est à noter que les ratios de SD/PD sont un bon exemple de la non-linéarité du système climatique dont nous avons présenté les aspects au chapitre 3. Premièrement, le passage de l'état solide à l'état liquide des précipitations au seuil approximatif de 0 °C amène une rupture dans la linéarité. Deuxièmement, on est confronté à des états « avec précipitations » et « sans précipitations » déterminés par un seuil d'humidité relative fonction de l'humidité absolue, de la pression et de la température. Ainsi, la relation entre la température représentative de la journée et celle du moment où surviennent les précipitations n'est pas forcément corrélée. Dès lors, ces deux sous-systèmes non-linéaires rendent l'étude des précipitations neigeuses particulièrement complexe par rapport à la seule étude des températures par exemple.

Afin d'analyser l'évolution des ratios de SD/PD, nous avons utilisé des modèles de régressions linéaires et logistiques. Pour aller plus loin dans ce type de recherches, il serait probablement judicieux d'explorer d'autres modèles, tels ceux par seuils (step-function). Par ailleurs, des études supplémentaires prenant en compte l'évolution des possibilités d'enneigement artificiel en lien avec le réchauffement des températures ainsi que les conséquences de l'augmentation des précipitations sous forme de pluie sur le manteau neigeux permettraient de compléter nos résultats et d'offrir une vision globale de l'enneigement futur.

5. RÉFLEXION AUTOUR DES CRITÈRES
D'ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ DE
L'ENNEIGEMENT POUR LA PRATIQUE
DU SKI ALPIN

5.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE

Au chapitre 4, nous avons présenté nos résultats concernant l'évolution de l'enneigement et plus particulièrement l'évolution des précipitations neigeuses par rapport aux précipitations totales. Le chapitre 5 s'intéresse, quant à lui, aux facteurs qui influencent l'enneigement et aux quantités minimales requises pour ouvrir des pistes de ski. Il présente les résultats d'un article « Critères d'évaluation de la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables en lien avec le changement climatique »³ soumis à la Revue de géographie alpine⁴.

L'objectif de ce chapitre est d'offrir une meilleure connaissance des besoins en enneigement d'une piste de ski. Il permet ainsi aux études qui s'intéressent à la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables de se baser sur les critères d'enneigement les plus pertinents. Cette question revêt une grande importance puisque la viabilité des domaines skiables dépend en grande partie de la fiabilité de leur enneigement. Cette étude se situe ainsi du côté de l'offre.

Dans une première partie, nous présentons le concept de fiabilité de l'enneigement et l'évolution de sa définition. Les critères et les seuils retenus n'ont en effet pas toujours été les mêmes. Trois aspects ont notamment fait débat : le seuil concernant le nombre de jours minimal avec un enneigement suffisant permettant d'assurer l'enneigement d'un domaine skiable en est un. Certains auteurs (Wanner & Speck, 1975 notamment) ont, par exemple, proposé que le nombre de jours pris en compte soient contigus. Ils ont ainsi utilisé 3 seuils : 30 jours, 60 jours et 90 jours. Ces auteurs justifient cette méthode par le fait que l'attractivité d'une région est meilleure s'il y a de la neige en

³ Serquet, G., Soumis: Critères d'évaluation de la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables en lien avec le changement climatique.

⁴ La Revue de géographie alpine (Journal of Alpine Research) est une revue bilingue; tous les articles y sont publiés en français et en anglais. Notre article a été soumis en français, nous le traduirons en cas d'acceptation ou de soumission dans une autre revue.

continu. Witmer (1986), quant à lui, a proposé de retenir 100 jours non continus durant la saison hivernale. C'est finalement cette dernière solution qui a été retenue dans les études récentes; généralement sous l'appellation « règle des 100 jours ». Le deuxième aspect discuté est le seuil à retenir quant à la hauteur de neige minimale permettant la pratique du ski alpin. Eckel (1938), par exemple, a mis en évidence, suite à son étude de la région de Davos, que dans le fond de la vallée 30-40 cm de neige est suffisant alors que sur les terrains rocheux de plus haute altitude, il faut un minimum de 80-100 cm. Il a dès lors proposé trois seuils à retenir quel que soit le lieu : 30 cm pour des conditions passables, 50 cm pour de bonnes conditions et 70 cm pour de très bonnes conditions. Il a également été mis en avant le fait que la hauteur de neige minimale requise varie suivant les mois. Une nouvelle neige de décembre perd plus de la moitié de sa hauteur lorsqu'elle est tassée alors qu'une vieille neige de janvier ou février sera déjà quasiment tassée lorsqu'elle est mesurée par les observateurs des stations météorologiques (Witmer, 1984). Eckel (1938) a ainsi défini qu'il faut, à la station de mesure, au minimum 50 cm en décembre, 40 cm en janvier et 30 cm en février et mars. Enfin, les critères et les seuils à utiliser pour définir s'il y a sécurité d'enneigement ou non dans un lieu donné ont également été passablement discutés. Des critères tels le climat (précipitations, vent, températures, qualité et maintien du manteau neigeux, etc.) (p. ex. Bezzola, 1975; Moerikoefer, 1948), l'orientation (p. ex. Bezzola, 1975), la qualité des pistes (p. ex. Schoenenberger, 1973), l'altitude (p. ex. Moerikoefer, 1948), le nombre de jours minimal d'enneigement requis (p. ex. Wanner & Speck, 1975), la période concernée (p. ex. Wanner & Speck, 1975) ont notamment été mentionnés. Les deuxième et troisième sujets de discussion du concept de fiabilité de l'enneigement font l'objet de la recherche de l'article présenté ci-dessous.

Dans une seconde partie de notre article, nous présentons les différents facteurs d'enneigement mis en évidence suite à des entretiens avec des spécialistes des remontées mécaniques des Alpes et du Jura vaudois. Enfin, nous proposons les critères et seuils de hauteur de neige à retenir lors de toutes études concernant la fiabilité de l'enneigement de domaines skiables ou, plus largement, leur viabilité.

5.2. ARTICLE 3 : CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ DE L'ENNEIGEMENT DES DOMAINES SKIABLES EN LIEN AVEC LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Gaëlle Serquet¹

¹ *Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Suisse*

5.2.1. Résumé

Suite au changement climatique, le nombre de jours avec un enneigement naturel suffisant pour la pratique du ski alpin diminue à basse et moyenne altitudes. Dès lors, la question de la viabilité de certains domaines skiables suite au manque de fiabilité de leur enneigement se pose. Pour analyser cette dernière, la plupart des recherches récentes ne retiennent qu'un seuil de hauteur de neige permettant l'ouverture des pistes de ski, ce qui accorde une place prépondérante au facteur altitudinal. Cette étude montre qu'au contraire de nombreux facteurs influencent l'enneigement et que de ce fait la hauteur minimale de neige requise est dépendante de la situation de chaque piste. Afin d'identifier ces différents facteurs et seuils, des entretiens semi-directifs auprès de divers acteurs des remontées mécaniques ont été menés. Il en ressort, qu'en plus de l'altitude, les quantités de précipitations régionales, la rugosité du sol, l'orientation et la déclivité de la pente, la fréquentation et la préparation des pistes ainsi que les possibilités d'enneigement artificiel jouent un rôle essentiel dans l'enneigement d'une piste. Par la mise en évidence de leur impact sur celui-ci, cet article permet leur prise en compte dans de futures études concernant la viabilité des domaines skiables. Par ailleurs, il encourage la réalisation d'une cartographie fine des besoins en enneigement des pistes des domaines skiables des montagnes suisses et, plus largement, européennes.

Mots-clés : fiabilité de l'enneigement, domaine skiable, ski alpin, changement climatique, montagne.

5.2.2. D'une définition de la viabilité des domaines skiabiles à l'évaluation de la fiabilité de l'enneigement

Le réchauffement climatique entraîne la diminution globale de l'enneigement (IPCC, 2007b). Ceci se constate en particulier dans les Alpes suisses qui disposent d'un réseau de mesures spécialement dense ayant fait l'objet de plusieurs recherches (Laternser & Schneebeli, 2003; Marty, 2008; Scherrer et al., 2004; Serquet et al., 2011; Serquet et al., Submitted). La diminution de l'enneigement a notamment pour conséquence un abaissement du nombre de jours avec un enneigement naturel suffisant pour la pratique du ski alpin. Les scénarios climatiques futurs prévoient la poursuite de cette diminution (IPCC, 2007b), ce qui pose la question de la viabilité sur le long terme des domaines skiabiles (Agrawala, 2007). Afin d'analyser cette dernière, il est nécessaire de connaître la fiabilité de l'enneigement de chaque domaine étudié. Cette notion, apparue dans les années 1930, a fait l'objet de plusieurs définitions suivant les critères et seuils retenus. Des critères tels que le climat (précipitations, vent, température, qualité et maintien du manteau neigeux, etc.), l'orientation, la qualité des pistes, l'altitude, le nombre minimal de jours d'enneigement requis et la période concernée ont notamment été mentionnés (Abegg, 1996).

Cependant, les seuils et les critères choisis dans les études récentes ont été ramenés au plus simple. Elles postulent ainsi que :

« La fiabilité de l'enneigement d'un domaine skiabable est assurée lorsque, durant au moins 100 jours compris entre le 1^{er} décembre et le 15 avril, il y a au minimum 30 cm de neige pour le ski alpin et ce durant 7 hivers sur 10. »

Cette définition, qui fait désormais référence, a été proposée par Abegg (1996) légèrement modifiée par Buerki (2000), qui y a ajouté un minimum de 50 cm pour les altitudes au-dessus de 1500-2000 m. On constate que quatre critères ont été retenus : un nombre de jour minimal (1), durant une période déterminée (2), avec une quantité minimale de neige au sol (3), durant un nombre d'années déterminé (4). Les trois premiers critères permettent de définir un bon hiver, le quatrième de pallier le problème de la variabilité des précipitations sous nos latitudes. Des seuils altitudinaux de fiabilité d'enneigement ont ainsi pu être défini. Se basant sur la règle des 100 jours, Foehn (1990) a calculé la limite en altitude à partir de laquelle les domaines skiabiles se trouvent dans la zone de sécurité d'enneigement. En 2000, l'enneigement des domaines skiabiles au-dessus de 1200 m était ainsi considéré comme garanti dans les régions situées au Nord des Alpes, en Suisse (Agrawala, 2007). Selon ce modèle, avec une augmentation de 2 °C des températures (soit approximativement pour 2050), celui-ci devrait monter à 1500 m. Les domaines skiabiles au-dessous de ces limites

altitudinales n'ont, respectivement n'auront, plus leur enneigement assuré et sont donc considérés comme n'étant plus viables.

Il paraît assez évident que c'est par souci d'obtenir une définition facilement utilisable et permettant de comparer différentes régions qu'un seuil unique de hauteur de neige a été fixé et que les autres critères climatiques, géomorphologiques ou humains n'ont pas été retenus. Nous pensons cependant que celle-ci a été trop simplifiée. En considérant uniquement le nombre de jours avec un seuil minimal de neige au sol, cette définition est essentiellement basée sur un critère altitudinal. Pourtant, on ne peut subsumer l'ensemble de la réalité des conditions permettant l'enneigement minimal requis pour la pratique du ski alpin sous la seule définition de l'altitude. Ceci a pour conséquence d'apporter des résultats qui peuvent être biaisés. Plusieurs études et rapports suisses et européens se basent cependant uniquement sur les critères et seuils précités (Abegg, 1996; Agrawala, 2007; Buerki, 2000; Elsasser & Buerki, 2002; Elsasser & Messerli, 2001; Koenig & Abegg, 1997; Mueller & Weber, 2008).

Afin d'identifier les facteurs clés qui influencent l'enneigement minimal requis pour ouvrir une piste de ski, nous avons procédé à des entretiens semi-directifs auprès des responsables techniques, des responsables administratifs et/ou des directeurs des remontées mécaniques des Alpes et du Jura vaudois, en Suisse. Au total 11 spécialistes ont été rencontrés. Lors de ces entretiens, une grille d'analyse a été utilisée dans le but d'identifier différents profils de pistes et leur besoin en enneigement minimal. Les Alpes et le Jura vaudois suisses ont été retenus car on y retrouve tous les types de pistes de ski alpin présents dans les montagnes suisses. De plus, ils offrent une grande diversité altitudinale puisque les domaines se situent à des altitudes comprises entre 950 et 3000 m. Nous n'avons rencontré aucune contradiction entre les différentes réponses des acteurs interrogés. Au contraire, tous les intervenants s'accordent sur les points relatifs aux facteurs d'enneigement. C'est pourquoi, dans cet article, nous présentons une synthèse des réponses obtenues auprès de nos interlocuteurs. De plus, nous proposons une réflexion concernant les méthodes d'évaluation de la fiabilité de l'enneigement à retenir lors de futures études.

5.2.3. Facteurs influençant l'enneigement des pistes de ski alpin

Les entretiens que nous avons menés auprès des acteurs clés des domaines skiables des Alpes et du Jura vaudois nous ont permis de mettre en évidence plusieurs facteurs ayant une influence sur

l'enneigement des pistes de ski alpin. Ceux-ci peuvent être regroupés en trois catégories: facteurs climatiques, facteurs géomorphologiques et facteurs liés aux activités humaines.

Parmi les facteurs climatiques, outre l'exposition au vent, dont on arrive aujourd'hui à protéger les pistes à l'aide de barrières à vent, et la température de l'air, principalement influencée par l'altitude, nos interlocuteurs mentionnent que la quantité de précipitations régionales et la qualité de la neige jouent un rôle primordial quant aux disponibilités en neige. En effet, au-delà du fait que le régime des précipitations varie fortement d'une année à l'autre et au cours de la saison dans les montagnes suisses, la région dans laquelle se situe un domaine skiable est, en Suisse, le premier facteur explicatif des différences de régime de précipitations. La topographie, quant à elle, explique certaines des différences entre des stations géographiquement proches, même s'il n'existe pas une relation linéaire forte avec l'altitude (Baeriswyl et al., 1997). Par ailleurs, les Alpes constituent une barrière pour les précipitations. Les différences entre les régions situées de part et d'autre des Alpes sont ainsi importantes. Les versants nord et sud des Alpes ainsi que le Tessin sont les régions les plus fortement arrosées alors que les vallées du Rhône en Valais, du Rhin et de l'Engadine aux Grisons sont celles qui le sont le plus faiblement (figure 5.2.1).

Si les températures sont négatives ou proches de 0 °C, les régions qui bénéficient de quantités de précipitations importantes auront ainsi plus rapidement l'enneigement permettant la pratique du ski. Avec une diminution moyenne des températures maximales de 0,44 °C par 100 m d'altitude en hiver (décembre - janvier - février) (Baeriswyl et al., 1997), les zones d'activités touristiques extérieures hivernales de haute altitude sont ainsi moins exposées à la fonte de la neige ou aux précipitations sous forme de pluie (Serquet et al., 2011; Serquet et al., Submitted). Les quantités de précipitations combinées à la température de l'air, qui dépend en grande partie de l'altitude, sont ainsi les premiers facteurs d'enneigement.

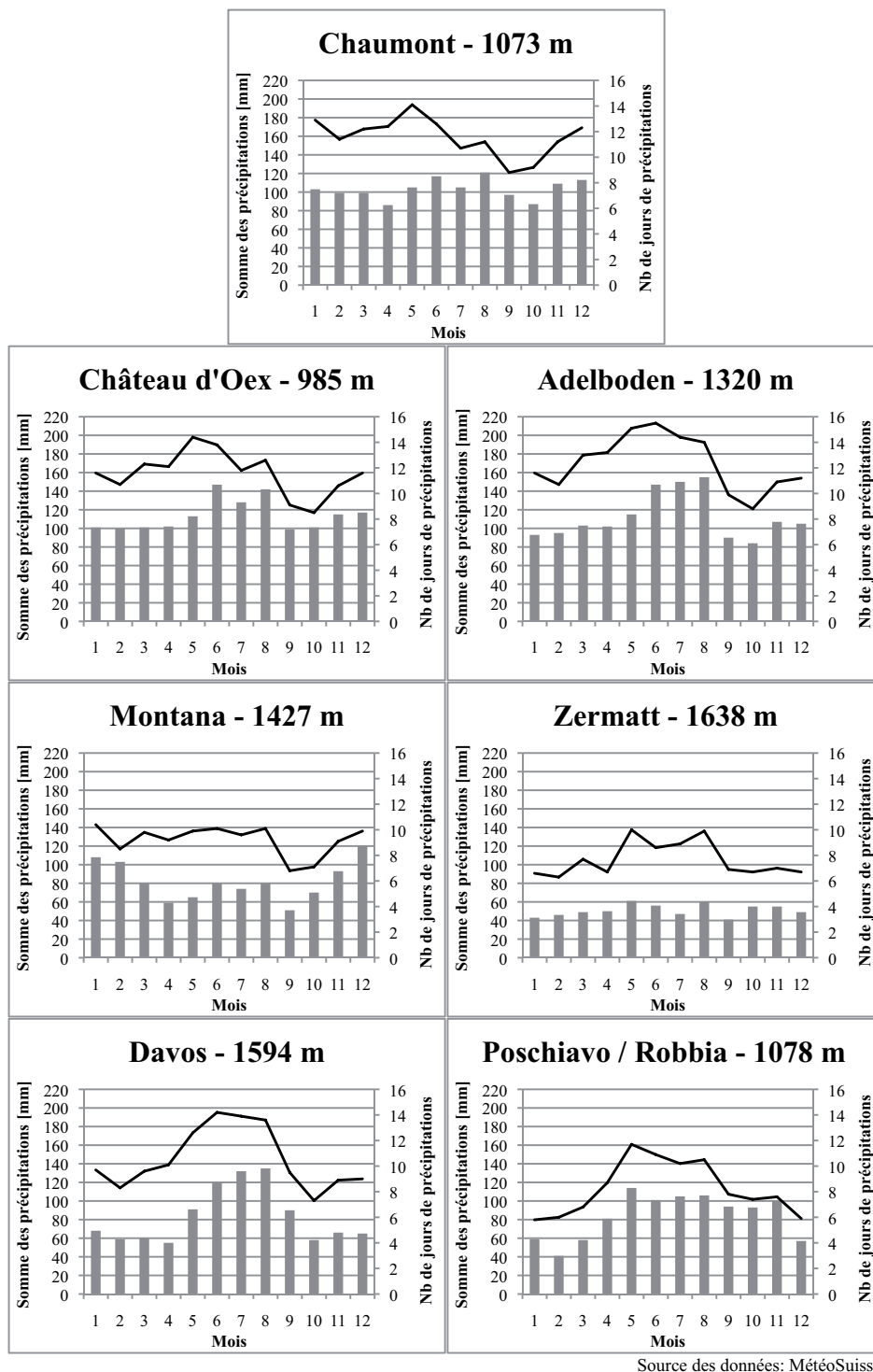


Figure 5.2.1 : Moyenne des précipitations de quelques stations MétéoSuisse des montagnes suisses pour la période de référence 1961-1990. Les barres grises représentent la somme des précipitations [mm]; le trait noir, le nombre de jours de précipitations.

Les spécialistes font tout de même remarquer qu'il existe une multitude de types de neige fraîche qui résulte de la température de l'air au moment des précipitations. Plus l'air est chaud, plus la neige est humide, compacte et lourde. Une neige à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, extrêmement poudreuse, perd 80% de son épaisseur lors du damage. Selon les spécialistes interrogés, la meilleure neige est celle qui a une température de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, entraînant une perte de 50% de son épaisseur suite au damage. Ils mentionnent également que la densité moyenne de la neige d'une piste de ski alpin est différente de celle des neiges fraîche ou artificielle. La première se situe entre 400 et 500 kg/m^3 alors que la seconde varie entre 20 et 300 kg/m^3 avec une moyenne à 100 kg/m^3 . La neige artificielle, quant à elle, a une densité comprise entre 300 et 500 kg/m^3 (Fauve et al., 2002). Les données de neige fournies tous les jours par les stations de mesures d'enneigement indiquent uniquement la neige tombée durant les dernières 24 heures et la neige au sol. Ni la température de la neige, ni sa densité ne sont relevées. L'usage des données de hauteur de neige pose ainsi problème puisque sans ces deux valeurs, il est impossible de connaître la diminution de son épaisseur lors du damage. A ce jour, il n'a cependant pas encore été trouvé d'alternative à l'usage de ces données. Toutes recherches y ayant recours lors de l'estimation de la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables devraient dès lors être conscientes de ce biais. Par ailleurs, à l'avenir des solutions devraient être cherchées pour remédier à cette inadéquation entre les données d'enneigement disponibles d'une part et les données dont on aurait besoin lors de l'analyse de la fiabilité de l'enneigement d'autre part.

Parmi les facteurs géomorphologiques, les spécialistes interrogés mentionnent que la rugosité du sol est le facteur principal influant sur les besoins en enneigement d'une piste. En effet, un pierrier nécessite une couverture neigeuse quatre à six fois plus importante qu'une prairie uniforme. Dès lors, sept sortes de rugosité du sol ont été mises en avant par nos interlocuteurs. Elles se traduisent par différents types de sol que l'on retrouve dans les domaines skiables des montagnes suisses. Pour chacun de ces types, les besoins minimaux en neige damée permettant l'ouverture d'une piste de ski ont pu être spécifiés (table 5.2.1).

Type de sol	Besoin minimal de neige au sol	
	Neige damée [cm]	Neige fraîche à -3 °C [cm]
Marais ou prairie avec < 10% de pente	5 - 7 gelée ou givre	10 - 15
Prairie uniforme et sans pierres	10 - 15	20 - 30
Glacier	15 - 20	30 - 40
Bordure de forêt	15 - 25	30 - 50
Pâturage sans grosses pierres	25 - 40	50 - 80
Pâturage avec grosses pierres	45 - 60	90 - 120
Pierrier	> 60	> 120

Table 5.2.1 : Types de sol et besoins minimaux en neige damée [cm] et correspondance en neige fraîche à -3 °C

La synthèse des réponses des spécialistes consultés montre que plus la rugosité du sol est importante plus il faut de neige pour ouvrir une piste de ski. Ainsi, les marais ou prairies peu pentues avec des pentes inférieures à 10% sont des terrains qui ne nécessitent que peu de neige (5-7 cm de neige tassée) voire pas du tout, puisqu'avec une bonne couche de givre, il est possible d'y skier. La faible pente et le fait qu'ils n'ont pas de pierres en est la raison. Les prairies uniformes et sans pierres sont des terrains qui nécessitent également peu d'enneigement (10-15 cm de neige damée), tout comme les glaciers car, le sol étant gelé, la neige s'y accumule facilement. Par contre, les crevasses ont besoin de grandes quantités de neige pour être comblées. S'il n'y a pas de crevasses et que le glacier est homogène, 15-20 cm de neige tassée suffisent pour skier.

Les bordures de forêt sont des espaces qui présentent une plus importante rugosité lorsque leur terrain est parsemé de troncs coupés ou défrichés. Les zones de forêts où les arbres ont été

dessouchés sont par contre à considérer comme des prairies ou des pâturages. La hauteur des souches influence les besoins minimaux en enneigement. En moyenne, 15-25 cm de neige damée suffisent pour la pratique du ski alpin. Les pâturages, quant à eux, sont à distinguer des prairies car ils ne présentent pas un sol uniforme; le bétail créant de petites terrasses tout au long de la pente. Il en ressort de fortes irrégularités au sol. Les besoins minimaux en enneigement sont donc plus importants. Les pâturages doivent toutefois être séparés en deux catégories suivant leur teneur en pierres. En règle générale, les spécialistes comptent 25-40 cm de neige damée pour skier sur les pâturages sans grosses pierres alors qu'il en faut un minimum de 45-60 cm sur ceux contenant de grosses pierres. Enfin, les pistes sur pierriers sont celles qui nécessitent généralement le plus de neige damée (au minimum 60 cm). Ceci dépendra cependant de la taille des pierres. Ce type de pistes se situe le plus souvent dans les zones de haute altitude.

Le deuxième facteur géomorphologique mis en évidence par les spécialistes interviewés est l'orientation des pistes. Celle-ci joue essentiellement un rôle sur la durée du maintien de l'enneigement tout au long de la saison. Les orientations nord et est ne subissent qu'un faible rayonnement solaire en hiver au contraire des orientations sud et ouest. Par ailleurs, le rayonnement solaire direct hivernal varie suivant les mois de l'année et les heures de la journée. En décembre, il est en moyenne de 83 W/m² et augmente pour atteindre en avril en moyenne 1045 W/m² (Rey, 1986). Il en résulte un apport calorifique bien moins important durant les mois d'hiver qu'au printemps. Si la température de la neige est inférieure à 0 °C, la neige peut ainsi rester poudreuse même si la zone a été ensoleillée toute la journée. De plus, le type de neige joue un rôle sur l'absorption et la réflexion du rayonnement solaire. En effet, une surface couverte de neige fraîche absorbe seulement 5% du rayonnement et, de ce fait, en réfléchit 95%, alors qu'une neige ancienne, respectivement humide, en absorbe jusqu'à 30%, respectivement 50% (Fauve et al., 2002).

Enfin, nos interlocuteurs attirent notre attention sur le fait que le degré de déclivité d'une pente a un effet sur le rayonnement direct du soleil qui atteindra une piste de ski. En effet, durant le mois de décembre, par exemple, une piste située sur un versant sud avec une déclivité de 30° recevra un rayonnement presque deux fois et demie plus important qu'une surface horizontale (Fauve et al., 2002). De plus, selon les responsables des pistes interrogés, les pentes qui présentent une déclivité supérieure à 25%, soit les pistes rouges et noires, nécessitent plus de neige car celle-ci est fortement poussée vers l'aval par les skieurs qui y font généralement davantage de virages. Afin que l'enneigement soit assuré tout au long d'une journée de ski, le minimum de neige requis sera plus important que sur une piste ayant une déclivité moindre. La largeur de la pente a également un effet sur la poussée de la neige. Ainsi, les pistes étroites subissent une abrasion de leur neige plus

importante; les skieurs se répartissant sur un espace réduit. Dans cette situation, même les pistes qui présentent une déclivité inférieure à 25% (pistes bleues) subissent une poussée de leur neige vers l'aval. En définitive, plus une piste est raide et étroite, plus il faut de neige. Si les quantités de neige sont faibles, les spécialistes précisent qu'il est nécessaire de remonter, tous les soirs, la neige poussée vers l'aval par les skieurs. Le nombre de skieurs fréquentant une piste a également un effet sur son usure, une zone fortement fréquentée étant rapidement usée. Les professionnels rencontrés s'accordent sur le fait qu'une piste avec deux fois plus de skieurs nécessite deux fois plus de neige à remonter avec les dameuses.

Les progrès en matière de préparation des pistes ayant énormément évolué ces dernières années suite à l'usage généralisé des dameuses, l'impact de ces deux facteurs humains sur l'usure de leur enneigement a fortement diminué. Grâce à l'utilisation de câbles permettant de treuiller les dameuses, afin qu'elles puissent remonter la neige poussée en aval des pentes raides, il est désormais possible aux spécialistes d'ouvrir les pistes avec moins de neige qu'auparavant. Enfin, l'utilisation de plus en plus fréquente du GPS, dans le but de déterminer les besoins en enneigement précis de chaque zone de pistes, permet l'optimisation au maximum de l'usage de la neige disponible.

Outre les progrès en matière de préparation des pistes, l'enneigement artificiel a permis d'adapter les domaines skiables au réchauffement climatique. Il est d'ailleurs la mesure d'adaptation la plus répandue dans les Alpes suisses (Gonseth, 2008). Les acteurs interrogés mentionnent plusieurs raisons qui les ont poussés à opter pour l'enneigement mécanique : 1) créer une couche de fond; 2) garantir de la neige aux périodes clés (début de saison, vacances de Noël et de février); 3) garantir de la neige jusqu'à la station ou sur des pistes qui font la jonction avec d'autres parties du domaine; 4) enneiger des zones de pistes qui manquent régulièrement de neige à cause du type de sol, de l'orientation ou pour d'autres raisons.

Enfin, nos interlocuteurs signalent qu'une piste peut présenter différents types d'un même facteur (rugosité, orientation, déclivité, largeur de pente, altitude, etc.) le long de sa pente.

5.2.4. Pour une redéfinition des méthodes d'évaluation de la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables

Nos résultats montrent que de multiples facteurs, qu'ils soient climatiques, géomorphologiques ou humains, influencent l'enneigement des pistes de ski. De plus, au niveau d'un même domaine skiable, la hauteur minimale d'enneigement requis varie, puisque les pistes ne sont pas homogènes (différence d'altitude, d'orientation, de rugosité, etc.). Dès lors, définir la fiabilité de l'enneigement uniquement à l'aide d'un seuil minimal identique pour tous les domaines étudiés réduit considérablement les réalités du terrain. Afin de connaître de manière fine les besoins en enneigement d'un domaine skiable, il serait utile de cartographier, à l'aide des systèmes d'informations géographiques (SIG) par exemple, les besoins en enneigement de chaque piste. Une cartographie fine permettrait de fournir des modèles de prévisions extrêmement précis des zones problématiques actuelles et futures liées à la diminution de l'enneigement.

Lors d'une étude macro-régionale de la fiabilité de l'enneigement ou de la viabilité de domaines skiables, ce travail est de grande envergure. C'est pourquoi, seuls certains facteurs peuvent être retenus s'il n'existe pas de cartographie précise. Nous recommandons ainsi de prendre au minimum en compte, en plus de la hauteur de neige au sol et l'altitude des domaines, les quantités de précipitations, le pourcentage de chaque type de sol par tranches d'altitude et les possibilités en enneigement artificiel. A l'aide de la table 5.2.1, des seuils d'enneigement pourront ainsi être définis. L'usage de ces variables est particulièrement important puisque, comme le montrent certaines études nord-américaines, les pronostics concernant la viabilité des domaines skiables ont été revus à la hausse depuis que l'enneigement artificiel a été intégré dans leurs modèles de prévision (Scott et al., 2006).

Les possibilités en enneigement artificiel doivent cependant considérer le changement climatique lors des prévisions à long terme puisque celui-ci l'affectera directement de quatre manières au moins (Scott et al., 2006) : 1) Afin de combler le manque de neige naturelle, il faudra un recours accru à l'enneigement artificiel. 2) Une augmentation de la fonte de la neige, due à l'augmentation des températures, nécessitera également un recours accru à l'enneigement artificiel. 3) Les changements dans la limite altitudinale des précipitations neigeuses (plus de ruissellement durant les mois d'hiver) vont affecter l'offre en eau disponible pour l'enneigement artificiel. 4) Des températures moyennes plus chaudes vont réduire la durée et le nombre de possibilités de fabriquer de la neige artificielle et augmenter son coût à moyen terme. En effet, de nos jours, l'enneigement artificiel est garanti sous nos latitudes aux altitudes supérieures à 1000 m de décembre à février pour 90 % des hivers (Steiger

& Mayer, 2008). Avec l'augmentation prévue des températures, le nombre de jours potentiellement favorables à la production de la neige artificielle diminuera (Scott & McBoyle, 2007; Scott et al., 2006; Steiger & Mayer, 2008). Le problème se posera essentiellement pour le début de saison, qui est la période dépendant actuellement le plus de l'enneigement artificiel. Avec une augmentation de 2 °C (soit approximativement pour 2050), on estime que le nombre de jours potentiels pour la fabrication de neige devrait diminuer d'environ 1/3 en novembre aux altitudes supérieures à 2000 m et dans les mêmes proportions en décembre aux altitudes comprises entre 1000 et 1500 m (Steiger & Mayer, 2008). Cependant, il est fort probable que le premier facteur limitant de l'enneigement artificiel sera l'augmentation des coûts liés à sa production (Steiger & Mayer, 2008).

5.2.5. Conclusions et perspectives

Notre enquête auprès des spécialistes des domaines skiables des Alpes et du Jura vaudois en Suisse a mis en évidence un nombre important de facteurs climatiques, géomorphologiques et humains pouvant influencer l'enneigement des pistes de ski. En plus de l'altitude du domaine skiable, les quantités de précipitations régionales, la rugosité du sol, l'orientation, la déclivité, la fréquentation et la préparation des pistes ainsi que les possibilités d'enneigement artificiel ressortent comme des facteurs primordiaux. Une cartographie fine des besoins en enneigement de chaque piste des domaines skiables suisses et, plus largement, européens permettrait de les différencier et d'obtenir des prévisions quant à leur viabilité future bien plus précises que les prévisions actuelles. Elle nécessite cependant un long travail de terrain. Ainsi, tant qu'une base de données des besoins en enneigement des pistes de ski n'aura pas vu le jour, nous recommandons que les modèles d'analyse de la viabilité des domaines skiables ou de la fiabilité de leur enneigement intègrent au minimum, en plus de la hauteur de neige au sol et de l'altitude des domaines, les quantités de précipitations régionales, le pourcentage de chaque type de sol par tranches d'altitude et les possibilités en enneigement artificiel.

Par notre étude, nous souhaitons stimuler la réalisation de nouvelles recherches dans ce domaine qui se révèlent essentielles. En effet, le secteur touristique lié au ski alpin est, pour les régions concernées, un important revenu économique. Des études scientifiques précises concernant l'impact du changement climatique sur ce secteur sont dès lors des plus importantes.

5.2.6. Remerciements

Cette recherche a été soutenue financièrement par l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) en Suisse, ainsi que par le Canton Vaud, les associations régionales vaudoises (ADAEV, ADNV, ADPE, ARDA, Nyon Région) et l'office du tourisme vaudois (OTV), en Suisse. Nous remercions chaleureusement toutes les personnes interrogées du temps qu'elles nous ont consacré, MétéoSuisse de nous avoir fourni les données, ainsi que Martine Rebetez et Jean-Paul Jotterand pour leurs précieux commentaires.

5.3. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

L'article présenté dans ce chapitre a mis en évidence un nombre important de facteurs d'enneigement dont notamment l'altitude du domaine skiable, les quantités de précipitations régionales, la rugosité du sol, l'orientation, la déclivité, la fréquentation et la préparation des pistes ainsi que les possibilités d'enneigement artificiel. Il permet ainsi à de futures études concernant la fiabilité de l'enneigement de domaines skiables ou, plus largement leur viabilité, de se baser sur d'autres critères que ceux retenus jusqu'à présent, soit essentiellement l'altitude. De plus, outre le fait d'offrir de nouvelles bases de recherches à de futures études dans ce domaine, il encourage vivement une analyse fine, par une cartographie par exemple, des besoins en enneigement des domaines skiables des Alpes.

Le recueil de nouvelles données étant extrêmement cher, une autre possibilité moins coûteuse serait la création d'un modèle. Celui-ci permettrait de pondérer chaque facteur retenu en fonction de leur influence sur l'enneigement des pistes tout en offrant une modélisation fine à moindre coût de la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables.

Dans le cadre plus général du questionnement de cette thèse concernant l'évolution de l'enneigement pour la pratique du ski, nous retenons tout particulièrement que, outre l'altitude, les précipitations régionales ressortent comme un des principaux facteurs d'enneigement des pistes de ski. La compréhension de leur évolution sous forme de neige est dès lors extrêmement importante, ce

qui confirme ce que nous avons déjà exposé dans le chapitre 4 suite à nos analyses de l'évolution de la proportion du nombre de jours de précipitations neigeuses par rapport au nombre de jours de précipitation totales.

6. IMPACT DE L'AUGMENTATION DES
JOURNÉES TRÈS CHAUDES SUR LA
FRÉQUENTATION TOURISTIQUE
HÔTELIÈRE EN MONTAGNE

6.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE

Après avoir analysé deux aspects de la variable climatique la plus importante pour le tourisme hivernal, soit les précipitations neigeuses et l'enneigement, le chapitre 6 s'intéresse au tourisme estival. Il fait l'objet d'un article publié dans la revue *Climatic Change* sous le titre "*Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change*"⁵.

Nous avons précédemment présenté les résultats de plusieurs études concernant l'évolution future probable des flux touristiques. Toutes prévoient une réorientation des destinations des touristes plus au nord et en altitude lors des grandes chaleurs estivales de juin à août. L'objectif de cet article est de déterminer si aujourd'hui déjà les périodes de grandes chaleurs ont une influence sur la fréquentation touristique de montagne. Cette question est importante si l'on souhaite prévoir les comportements touristiques futurs suite au changement climatique. Pourtant, jusqu'à ce jour, aucune étude ne s'y était intéressée.

Cet article analyse ainsi les variations de la fréquentation hôtelière domestique de 40 stations touristiques des Alpes suisses en relation avec les températures estivales mesurées en plaine et l'ensoleillement mesuré en montagne. Le nombre de jours au-dessus d'un seuil de température et celui au-dessus d'un seuil d'ensoleillement ont été calculés pour les mois de juin, juillet et août de 1997 à 2007. Les stations ont ensuite été classées en fonction de la réactivité de leur taux d'occupation domestique au nombre de jours chauds ou ensoleillés. Afin d'expliquer ce classement, la distance de chaque station à un grand centre urbain ainsi que le séjour moyen par mois et par station ont été calculés.

⁵ Serquet, G. & Rebetz, M., 2011: Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change. *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-010-0012-6.

6.2. ARTICLE 4 : RELATIONSHIP BETWEEN TOURISM DEMAND IN THE SWISS ALPS AND HOT SUMMER AIR TEMPERATURES ASSOCIATED WITH CLIMATE CHANGE

6.2.1. Abstract

We quantified the impacts of hot summer air temperatures on tourism in the Swiss Alps by analysing the relationship between temperature and overnight stays in 40 Alpine resorts. Several temperature thresholds were tested to detect the relationship between them and summer tourism. Our results reveal significant correlations between the number of nights spent in mountain resorts and hot temperatures at lower elevations.

The relationship between hot temperatures and overnight stays is more important in June and to a lesser extent in August than in July. This is probably because holidays and the peak of domestic tourist demand in summer usually take place between the beginning of July and mid-August so that long-term planned stays dominate more during these months compared to June. The alpine resorts nearest to cities are most affected by hot temperatures. This is probably because reactions to hot episodes take place on a short-term basis as heat waves remain relatively rare.

Our results suggest that alpine tourist resorts could benefit from hotter temperatures at lower elevations under future climates. Tourists already react on a short-term basis to hot days and spend more nights in hotels in mountain resorts. If heat waves become more regular, it seems likely that tourists will choose to stay at alpine resorts more frequently and for longer periods.

Keywords : Climate change, tourism, temperature, Alps, Switzerland

6.2.2. Introduction

The Swiss Alps are a traditional destination for tourism, an important component of the Swiss economy. Tourism ranked fourth in the Swiss national export balance in 2006, with a 6.2 percent share of gross domestic product (GDP) (STV-FST, 2008). Of a total revenue of CHF 21.6 billion for the tourism sector in 2004, 44.9% originated from domestic tourism (STV-FST, 2008). Switzerland's tourism competitiveness ranks 1st among 133 countries (WEF, 2007, 2008, 2009), meaning that it is considered to have the most attractive environment for developing the travel and tourism industry. Austria and Germany, two other Alpine countries rank 2nd and 3rd in these reports.

Tourism is the key growth sector in mountain areas: tourism intensity (number of tourists' overnight stays compared to the number of residents) in Switzerland is highest in three administrative Alpine regions: Graubunden, Valais and the Bernese Oberland (OFS, 2007). Tourism accounted for 30 percent of GDP and 30 percent of total employment in Graubunden (25 and 30% in Valais) in 2007 (STV-FST, 2008).

All IPCC scenarios (IPCC, 2007a) predict a decrease in snow cover, particularly at lower altitude, in connection with temperature increases. Many alpine resorts are thus expected to become less reliable for snow activities in the future (Elsasser & Buerki, 2002; Elsasser & Messerli, 2001; Hantel & Hirtl-Wielke, 2007; Koenig & Abegg, 1997; Marty, 2008; OcCC-ProClim, 2007; Scherrer & Appenzeller, 2006; Wielke et al., 2004). The potential annual costs of climate change in Switzerland, taking into account losses in winter tourism, have been calculated to be CHF 1.8 to 2.3 billion (US \$ 1.1 to 1.4 billion) by 2050, i.e. 0.3 to 0.4% of the Swiss GDP for 1995 (Meier, 1998). Alpine ski resorts will thus have to plan and implement adaptation strategies if they are to survive (Elsasser & Buerki, 2002; Elsasser & Messerli, 2001). One of these strategies could be to make better use of the summer season.

Numerous studies have examined the recent increase in summer heat waves in Europe, particularly after the heat waves of 2003 and 2006 (Della-Marta et al., 2007a; Della-Marta et al., 2007b; Rebetz, 2004; Rebetz et al., 2006; Schaer et al., 2004; Seneviratne et al., 2006; Stott et al., 2004), and the climate models associated with all the IPCC scenarios (IPCC, 2007a) predict hotter summer temperatures and more heat waves in the future. In connection with climate change, several studies (Amelung & Viner, 2006; Ceron & Dubois, 2000; Hamilton et al., 2005; IPCC, 2007b) predict a gradual shift of tourist destinations further north and to higher altitudes in Europe, but no study has yet been conducted to verify if hot summer temperatures generate an increase in tourist demand in Alpine regions.

In Alpine regions, tourist demand is determined by many factors such as climate, landscape, access to lakes, prices, public indoor facilities, etc. A couple of studies have shown that climate conditions are amongst the dominant factors affecting choice of destination (Hamilton & Lau, 2006; Lise & Tol, 2002). However, no study has investigated the impact of weather conditions in lowland regions (the push factor) on the tourism destinations. In this paper, we quantify the observed impact of hot summer air temperature on tourism demand in the Swiss Alps by analysing the relationship between temperature and overnight stays at 40 Alpine resorts. Several temperature thresholds were tested to detect whether there was a relationship with summer tourism. We restricted our study to domestic tourism in order to detect whether hot temperatures at lower elevations were resulting in lowland residents spending time at higher elevations in the Alps.

6.2.3. Data and methods

We used the number of overnight stays for domestic tourism from 40 Swiss Alpine resorts (Figure 6.2.1). The data originated from the datasets of the Federal Statistics Office (FSO). We used data from the four main Alpine administrative regions in the Swiss Alps: Vaud, Valais, Bern and Graubunden. In each region, we selected all Alpine ski resorts above 1000 m asl with a minimum of 500 beds during at least 8 of the 10 available years for the period 1997 to 2007 (2004 data are missing in the FSO dataset). We limited our study to 10 years in order to have the most homogeneous data for available beds in each resort and the most homogeneous population size and behaviour in the related lowland cities. The absolute number of domestic overnight stays was averaged by the number of available beds for each month and at each of the 40 selected resorts. We removed the trends from the series.



Figure 6.2.1: Location of Alpine resorts and meteorological stations

The resulting series were correlated with temperature and sunshine duration data provided by MeteoSwiss. For both these meteorological parameters, we used several thresholds, either above an absolute °C value or a relative value above a percentile, as described in Table 6.2.1. The temperature values originate from the main Swiss cities at lower elevation (Geneva, Neuchâtel, Basel and Zurich), primary sources for domestic tourists seeking to escape the heat of summer.

Overnight stays in regional Alpine resorts	Maximum temperature		Relative sunshine duration		
	Monthly nb days >25°C		Monthly nb of days >70%		
	Monthly nb days > percentile 80		Monthly nb of days > percentile 80		
	Monthly sum of degree days > 25°C		Monthly sum of daily percentages >70%		
	Monthly sum of degree days > percentile 80		Monthly sum of daily percentages > percentile 80		
	Mean GE, NE, BS, ZH		Montana	Adelboden	Davos
Vaud	X		X		
Valais	X		X		
Bern	X			X	
Graubunden	X				X

X correlation was computed. *GE* Geneva, *NE* Neuchatel, *BS* Basel, *ZH* Zurich

Table 6.2.1: Summary of the correlations computed between meteorological parameters and overnight stays

We used daily maximum temperature values for June, July and August (JJA) and computed the monthly number of days above two thresholds, i.e. higher than 25 °C according to the common definition of a summer day (Alexander et al., 2006) used by MeteoSwiss or higher than percentile 80 of daily summer values (JJA) during the period 1997 to 2007 (without 2004), as used for instance by Rebetz (2004) for the definition of abnormally hot days. We also computed the sum of degrees per month over these two thresholds. All series were detrended.

We used relative sunshine duration from three meteorological stations at higher elevations in the Swiss Alps: Montana, 1508 m asl, for the regions of Valais and Vaud, Adelboden, at 1320 m asl, for the Bernese Alps, and Davos, at 1590 m asl for Graubunden. Thresholds were chosen for absolute (above 70%) and relative values (above percentile 80). Both the monthly number of days and the sum of daily percentages above every threshold were computed and detrended.

As potential explanatory factors for the differences observed in the resulting correlations, we also computed the average length of stay in every Alpine resort and the distance in km and hours between each resort and the nearest main city (Lausanne for Vaud and Valais, Bern for the Bernese Alps and Zurich for Graubunden) using www.mappy.ch. We also correlated the average length of stay with the meteorological values (both temperature and sunshine duration).

6.2.4. Results

Pearson's correlation coefficients for the summer months' temperature in relation to overnight stays are shown in Table 6.2.2. We combined all methods for the classification of the resorts (Table 6.2.2, right column).

24 resorts had at least one significant correlation, but there were strong differences between resorts and months. 14 resorts had at least one significant correlation with all four methods or thresholds for at least one month (usually June) or with at least three methods and for at least two months. Significant correlations were observed in every region, but less frequently in Graubunden: 38.9% of the resorts in Graubunden compared to 57.1% in Bern, 83.3% in Valais and 100% in Vaud. Significant correlations were observed more frequently in June (up to 15 resorts) and to a lesser extent in August (up to 10) than in July (up to 4).

The Pearson's correlation coefficients for the summer months' sunshine duration in relation to overnight stays are shown in Table 6.2.3. These results are less significant than those concerning temperature: 20 Alpine resorts had at least one positive significant correlation with sunshine duration compared to 24 with temperature. Bernese resorts had the greatest number of positive significant correlations: 71.4% of the resorts had at least one positive significant correlation compared to 66.7% for Vaud, 44.4% for Graubunden and 41.7% for Valais.

Alpine resorts	Nb days Tmax > 25			Nb days Tmax > perc. 80			Sum degrees Tmax > 25			Sum degrees Tmax > perc. 80			Total
	June	July	August	June	July	August	June	July	August	June	July	August	
VD Villars-sur-Ollon	0.6883	0.5764	0.5820	0.7306	0.5334	0.7031	0.7594	0.5434	0.7480	0.7167	0.4577	0.8085	9
BE Adelboden	0.5092	0.4481	0.7964	0.5532	0.6986	0.5247	0.5746	0.6054	0.5670	0.5975	0.5951	0.4374	8
BE Kandersteg	-0.0023	0.8984	0.6268	-0.0474	0.6871	0.7722	0.0111	0.7874	0.7359	0.0396	0.7195	0.7261	8
VS Evolene	0.7228	0.3411	0.7572	0.7730	0.4061	0.7418	0.7897	0.4022	0.7478	0.8013	0.3420	0.6659	8
GR Samnaun	0.5610	0.3599	0.3686	0.7358	0.6150	0.3845	0.7457	0.5565	0.4046	0.7894	0.6073	0.4490	7
GR Silvaplana	0.3829	0.3956	0.4509	0.5648	0.3090	0.6973	0.5858	0.3485	0.6444	0.6625	0.4025	0.6364	6
VS Saas Fee	0.4854	-0.3497	0.6777	0.5320	-0.4795	0.8273	0.5752	-0.3786	0.7789	0.5755	-0.3079	0.7539	6
GR Arosa	0.2650	0.2541	0.7892	0.4493	0.2793	0.8177	0.4512	0.2871	0.8772	0.5909	0.3078	0.8670	5
VS Zermatt	0.7175	0.3371	0.4825	0.7752	0.5339	0.4709	0.7770	0.4806	0.5258	0.7086	0.5104	0.5793	5
GR Disentis	0.7036	-0.3295	0.1823	0.7321	-0.0907	0.0120	0.7125	-0.1623	0.0584	0.6275	-0.0773	0.0770	4
VD Les Diablerets	0.5582	-0.3145	0.3273	0.6229	-0.3433	0.4415	0.6697	-0.3478	0.4381	0.6381	-0.3408	0.4380	4
VD Leysin	0.6953	-0.0380	0.0108	0.7556	-0.2129	-0.1584	0.7390	-0.0897	-0.1070	0.7341	0.0187	-0.1307	4
VS Leukerbad	0.8386	0.2381	0.0274	0.7399	0.3046	0.3418	0.7733	0.2257	0.3221	0.6805	0.1244	0.4660	4
VS Orsieres	0.6085	-0.0041	0.1659	0.6452	0.2736	0.4078	0.6824	0.1953	0.3722	0.6281	0.3328	0.4301	4
BE Grindelwald	0.2414	0.4112	0.4305	0.2738	0.1758	0.5512	0.3167	0.2660	0.6277	0.3108	0.1549	0.7142	3
BE Hasliberg	0.4509	0.1867	0.2180	0.6950	0.2575	0.3398	0.7094	0.2028	0.3731	0.8076	0.1057	0.4682	3
VS Champéry	0.1910	0.3772	0.3490	0.1819	0.3344	0.6038	0.2387	0.3468	0.6322	0.2678	0.2882	0.6902	3
GR Pontresina	0.5311	0.3002	0.3980	0.5224	0.1207	0.5248	0.5679	0.2319	0.4462	0.5666	0.3062	0.4121	2
VS Saas Grund	0.4620	0.1994	0.5998	0.0849	0.0850	0.5487	0.0735	0.1937	0.5626	-0.1104	0.2416	0.5490	2
VS Taesch	-0.2932	0.5319	-0.1533	-0.5591	0.5001	0.0012	-0.5679	0.5679	-0.0290	-0.6725	0.6611	0.0333	2
GR Klosters	0.1098	0.6053	0.3229	0.3925	0.5195	0.3825	0.4009	0.5064	0.3886	0.4759	0.3124	0.4402	1
GR Zermatt	0.4778	0.3588	0.3654	0.4091	0.3600	0.5449	0.4075	0.3460	0.5254	0.3090	0.2925	0.5843	1
VS Crans-Montana	-0.3764	0.6141	-0.2752	-0.3665	0.3238	-0.2161	-0.3031	0.4469	-0.2280	-0.2951	0.4319	-0.1653	1
VS Graechen	0.5673	-0.1372	0.4164	0.2460	-0.3942	0.1468	0.2799	-0.2727	0.2057	0.0971	-0.2164	0.0995	1
BE Lauterbrunnen	0.1076	0.5090	0.4811	0.1167	0.4413	0.4159	0.1771	0.4029	0.4617	0.1717	0.1864	0.4718	0
BE Lenk	-0.0416	0.5127	-0.1885	-0.1868	0.3407	0.2802	-0.1683	0.4538	0.2276	-0.1407	0.4701	0.3524	0
BE Saanen	0.3256	-0.0948	0.3144	0.3625	-0.3097	0.4574	0.4147	-0.2359	0.4359	0.4082	-0.3097	0.4582	0
GR Celerina	0.2637	-0.3227	0.2577	0.3335	-0.4267	0.3020	0.3627	-0.4187	0.2769	0.4239	-0.4733	0.2567	0
GR Davos	0.3856	0.4939	-0.6721	0.0846	0.2072	-0.2834	0.1063	0.3452	-0.3426	-0.0642	0.3402	-0.2074	0
GR Flims	0.3215	0.3575	0.2406	0.2014	0.5200	0.1105	0.2237	0.4515	0.1645	0.1282	0.3850	0.1774	0
GR Laax	0.1664	0.0961	0.3617	-0.0104	0.1123	-0.0188	0.0299	0.1460	-0.0022	-0.0951	0.2751	-0.1753	0
GR Poschiavo	0.4381	0.4135	0.1172	0.2608	0.2869	0.4323	0.3187	0.3064	0.3731	0.2173	0.1179	0.4439	0
GR Samedan	-0.1976	-0.1041	0.1715	-0.2567	-0.1809	0.1029	-0.2269	-0.2239	0.0590	-0.1887	-0.3974	0.0201	0
GR Savognin	-0.3599	0.0472	-0.0103	-0.5562	-0.1338	0.0731	-0.5188	-0.0513	0.0986	-0.5510	-0.0039	0.1657	0
GR Scuol	0.3506	0.4474	0.1688	0.1626	0.2764	0.2059	0.2193	0.2965	0.1289	0.1039	0.1779	0.0475	0
GR St Moritz	0.1031	0.0366	0.1238	0.3704	0.1524	0.0041	0.4139	0.1428	0.0509	0.4625	0.1677	0.0764	0
GR Tarasp	0.1219	0.1089	0.3371	-0.0868	0.0415	0.2278	-0.0494	0.1136	0.2218	-0.1562	0.2569	0.0665	0
GR Vaz	0.0024	0.3843	0.2908	-0.0886	0.3650	0.3983	-0.0595	0.4304	0.4306	-0.0564	0.4348	0.5238	0
VS Saas Almagell	0.2488	0.0830	-0.3351	-0.0644	0.2004	-0.4980	-0.0401	0.1964	-0.3900	-0.1742	0.2901	-0.3463	0
VS Verbier	0.3382	-0.2921	0.0532	0.1937	-0.5178	-0.0260	0.1958	-0.4618	-0.0767	0.1476	-0.4773	-0.0829	0
Total	10	4	7	12	3	8	14	4	10	15	4	10	

Table 6.2.2: Pearson’s correlation coefficients for the summer months’ temperature. Significant ($p < 0.1$) values according to Fischer’s test are orange (positive) or blue (negative) *BE* Bern, *GR* Graubunden, *VD* Vaud, *VS* Valais.

Alpine resorts	Nb day sunshine duration > 70%			Nb day sunshine duration > percentile 80			Sum % sunshine duration > 70%			Sum % sunshine duration > percentile 80			Total
	June	July	August	June	July	August	June	July	August	June	July	August	
BE Lauterbrunnen	0.5357	0.4947	0.5575	0.7371	-0.0428	0.7688	-0.7577	0.1157	0.6685	0.8393	-0.1320	0.5910	7
BE Saanen	0.5604	0.0712	0.5352	0.5819	0.6515	0.6855	0.5724	0.5337	0.6247	0.6002	0.4689	0.4918	7
GR Silvaplana	0.1272	0.4031	0.6447	0.1666	0.5877	0.6837	0.2293	0.6529	0.7331	0.1737	0.4155	0.7301	6
GR Arosa	-0.5893	0.3588	0.6248	-0.5652	0.7260	0.6854	-0.5455	0.4908	0.6280	-0.5333	0.5993	0.4251	5
GR Poschiavo	0.1767	0.5542	0.4143	0.4656	-0.0159	0.6260	0.4166	0.3048	0.6156	0.6342	-0.1271	0.6708	5
BE Hasliberg	0.4736	0.6652	0.3990	0.4494	0.5794	0.6568	0.4825	0.5251	0.5506	0.4280	0.0418	0.4858	4
BE Kandersteg	0.1172	0.3607	0.8205	0.4221	-0.1897	0.8707	0.4122	-0.1105	0.8685	0.5478	-0.1967	0.7634	4
GR Klosters	0.5574	0.7456	0.2904	0.5719	0.1665	0.4508	0.5719	0.4604	0.4586	0.4719	-0.0931	0.5172	4
GR Pontresina	-0.3223	0.4089	0.6670	-0.1182	0.4395	0.7230	-0.1303	0.5032	0.7777	-0.0290	0.2791	0.8656	4
VS Leukerbad	0.1788	0.5582	0.1944	0.3780	0.6023	0.5479	0.2982	0.6992	0.3547	0.3261	0.5680	0.3552	4
VS Saas Fee	-0.1868	-0.4827	0.6994	0.0433	0.0195	0.7474	-0.0556	-0.2507	0.7489	0.0973	-0.1835	0.8059	4
GR Scuol	0.2081	0.6340	0.4480	0.4263	0.2876	0.4276	0.3783	0.5576	0.4883	0.5193	0.0415	0.5665	3
GR Zermes	-0.0913	0.0904	0.5337	-0.1312	-0.3240	0.7344	-0.1276	-0.1168	0.7405	-0.3584	-0.3758	0.7782	3
VD Villars-sur-Ollon	0.0378	0.5476	0.3536	0.1990	0.5591	0.5689	0.1021	0.7681	0.4072	0.0557	0.5415	0.3594	3
VS Champéry	-0.0975	0.5277	0.2621	0.3004	0.6519	0.3605	0.1382	0.8146	0.2062	0.2102	0.6353	0.2486	3
VS Saas Grund	-0.0482	-0.0006	0.6897	0.0304	0.2484	0.5619	-0.0452	0.2127	0.6379	0.0726	-0.1045	0.5347	3
VS Zermatt	0.5324	0.6139	0.3204	0.4335	0.5990	0.3680	0.4905	0.6971	0.3332	0.3306	0.0358	0.2283	3
GR Flims	0.4389	0.3570	0.1736	0.5877	0.0827	0.3264	0.5102	0.2549	0.1988	0.5824	-0.0101	0.1051	2
BE Adelboden	0.4233	0.5212	0.6392	0.2287	-0.0249	0.4360	0.3634	0.0072	0.4074	0.3005	-0.3050	0.2355	1
VD Les Diablerets	0.0988	0.1198	0.3092	0.2739	0.5899	0.4911	0.2113	0.4179	0.3178	0.2593	0.3382	0.2699	1
BE Grindelwald	0.4806	0.4112	0.3237	0.3737	0.4717	0.3800	0.3534	0.2885	0.3598	0.3436	-0.0971	0.2900	0
BE Lenk	-0.4856	0.3547	-0.1274	-0.4589	0.3873	-0.0207	-0.5477	0.3612	0.0583	-0.4941	0.2632	0.2515	0
GR Celerina	-0.0794	-0.0445	0.3760	0.0072	0.4010	0.4285	0.0133	0.2391	0.4500	0.0860	0.5124	0.4482	0
GR Davos	-0.3000	0.4297	-0.4050	-0.1617	-0.0055	-0.3425	-0.2516	0.3529	-0.2713	-0.2082	-0.0371	-0.1424	0
GR Disentis	0.4541	-0.6283	-0.0627	0.3578	-0.4764	-0.0152	0.3636	-0.6515	-0.0666	0.0164	-0.3132	-0.0815	0
GR Laax	-0.2647	-0.1903	0.1518	-0.1655	-0.1682	-0.0368	-0.2161	-0.0614	-0.0605	-0.2257	-0.1206	-0.1226	0
GR Samedan	-0.8634	0.0437	0.3671	-0.7779	-0.0657	0.3770	-0.8128	-0.0473	0.4391	-0.6472	-0.0549	0.5231	0
GR Samnaun	0.1829	0.1005	0.2687	0.1914	0.1271	0.4208	0.2541	-0.0007	0.3480	0.0980	0.0346	0.3102	0
GR Savognin	-0.6580	0.1521	0.1344	-0.5318	0.1942	0.2491	-0.6051	0.2652	0.2228	-0.3525	0.1885	0.1752	0
GR St Moritz	0.3701	-0.2241	-0.0059	0.4548	-0.7426	0.0849	0.4690	-0.5547	0.1020	0.3892	-0.7022	0.1619	0
GR Tarasp	-0.0197	0.0768	0.2408	0.0733	0.4481	-0.0442	0.0671	0.2836	-0.0400	0.1351	0.3958	-0.2095	0
GR Vaz	-0.5833	0.3711	0.1316	-0.3768	-0.4502	0.2719	-0.4542	-0.1979	0.2697	-0.1994	-0.6737	0.2862	0
VD Leysin	-0.1123	-0.2509	-0.2164	-0.2682	-0.0704	-0.4910	-0.2973	-0.2228	-0.3806	-0.2886	-0.1830	-0.2907	0
VS Crans-Montana	-0.2818	0.0323	-0.2586	0.0862	-0.6231	-0.1353	0.0004	-0.2716	-0.1618	0.0412	-0.0489	-0.0086	0
VS Evolène	-0.0799	0.4250	0.5459	0.0204	0.0902	0.2914	-0.0496	0.4984	0.4708	-0.0235	0.1369	0.4609	0
VS Graechen	0.0915	-0.5602	0.3325	0.3858	0.0409	0.0045	0.2025	-0.3780	0.1115	0.4537	0.3106	-0.0120	0
VS Orsieres	0.2939	0.0127	0.2225	0.4527	-0.2430	0.5302	0.4576	-0.1835	0.3611	0.4076	-0.2396	0.3426	0
VS Saas Almagell	-0.2999	0.1832	-0.6208	-0.0408	0.2489	-0.7749	-0.1066	0.1625	-0.7616	0.0045	-0.2127	-0.7799	0
VS Taesch	-0.4416	0.3729	0.1080	-0.4366	-0.3902	0.3354	-0.5041	0.0253	0.2573	-0.3567	-0.3831	0.2108	0
VS Verbier	0.2001	-0.5419	0.4185	0.3007	-0.1504	0.5312	0.3194	-0.4051	0.5138	0.3330	0.2121	0.4613	0
Total	2	6	8	4	9	12	3	6	11	4	3	8	

Table 6.2.3 : Pearson’s correlation coefficients for the summer months’ sunshine duration. Significant ($p < 0.1$) values according to Fischer’s test are orange (positive) or blue (negative) BE Bern, GR Graubunden, VD Vaud, VS Valais.

The average length of stay in every Alpine resort and the distance from the nearest important city are shown in Table 6.2.4. June has the shortest mean average length of stay (2.54 nights) compared to August (2.94) and July (3.03). The shortest average length of stay took place in June for 77.5% of the resorts, in August for 17.5% and in July for 5% of the resorts. The Bernese Alps were the only region

where the shortest average length of stay was more frequent in August (57%). The longest average length of stay took place in July for 65% of the resorts. There were no important differences between regions for this parameter.

Alpine resorts	Average length of stay (no. of days)				Distance (km and hours)	
	June	July	August	Mean JJA	Length	Time
VD Leysin	2.72	4.27	3.66	3.55	61.34	00:53
VD Villars-sur-Ollon	2.12	2.65	2.55	2.44	59.18	00:55
BE Kandersteg	2.42	2.64	2.46	2.51	66.66	00:57
VD Les Diablerets	2.43	4.54	3.56	3.51	66.34	00:58
BE Kanderstag	2.05	1.99	1.95	1.99	63.47	00:59
VS Champéry	2.23	2.87	2.28	2.46	63.99	00:59
BE Adelboden	3.34	3.34	3.19	3.29	67.04	01:08
VS Verbier	1.63	2.14	2.01	1.93	91.73	01:10
BE Grindelwald	1.91	2.15	2.04	2.03	53.13	01:11
BE Hasilberg	4.42	4.47	4.24	4.38	88.26	01:14
VS Orsieres	2.07	2.24	2.17	2.16	91.17	01:14
GR Films	2.88	3.60	3.23	3.23	137.68	01:33
VS Crans-Montana	3.60	4.56	4.46	4.21	124.93	0:133
VS Evolone	1.74	1.96	1.90	1.87	119.97	01:35
GR Laax	1.99	2.77	2.74	2.50	142.24	01:37
VS Leukerbad	3.83	3.49	3.37	3.56	115.53	01:39
GR Klosters	2.74	2.80	3.08	2.88	135.55	01:42
GR Vaz	2.73	3.42	3.26	3.14	141.78	01:45
BE Saanen	2.71	2.75	2.62	2.69	83.87	01:50
GR Savognin	2.13	2.22	2.11	2.16	163.98	01:52
BE Lenk	3.59	3.10	3.32	3.34	83.29	01:53
GR Davos	3.08	3.81	3.88	3.59	147.43	01:53
GR Disentis	1.86	1.97	1.93	1.92	141.64	01:56
GR Arosa	2.73	3.81	3.79	3.44	150.68	01:57
GR Zernez	1.98	1.96	2.06	2.00	167.62	02:08
VS Saas Grund	2.97	3.12	3.45	3.18	162.05	02:09
VS Saas Fee	2.37	3.10	3.14	2.87	164.48	02:12
VS Graechen	2.58	3.63	3.52	3.24	162.74	02:13
VS Saas Almagell	3.33	4.17	4.12	3.87	165.78	02:15
GR Scuol	2.85	2.87	2.84	2.85	179.54	02:15
GR Tarasp	3.27	3.89	3.64	3.60	179.54	02:18
VS Taesch	1.61	1.75	1.87	1.74	169.41	02:21
GR Silvaplano	2.24	3.15	3.00	2.80	197.86	02:26
GR Samedan	2.10	2.71	2.78	2.53	195.46	02:33
GR St Moritz	2.11	2.95	3.01	2.69	203.92	02:33
GR Celerina	2.85	3.36	3.44	3.22	197.62	02:36
VS Zermatt	1.95	2.56	2.56	2.36	175.38	02:37
GR Pontresina	2.79	3.99	3.77	3.52	199.65	02:38
GR Samnaun	1.68	2.35	2.43	2.15	215.95	02:53
GR Poschiavo	2.54	2.23	2.16	2.18	232.54	03:08
Mean	2.54	3.03	2.94	2.84		

BE Bern, *GR* Graubunden, *VD* Vaud, *VS* Valais

Table 6.2.4 : Average length of stay (number of days) and distance (km and hours) from the nearest main city

Graubunden and East Valais resorts were located the furthest, in time and space, from the nearest main city. There was a significant negative correlation between the distance by car both in time ($R = -0.28$, $p = 0.08$) and space ($R = -0.30$, $p = 0.06$) from the nearest main city (Table 6.2.4) and the relationship between temperature and overnight stays (Table 6.2.2, right column). But the correlation between the mean monthly average length of stay in June-July-August (JJA) and the relationship between temperature and overnight stays is not significant ($R = -0.20$, $p = 0.22$). The results of the multiple regression analysis show that there is no significant correlation between the distance (in time or space) and the mean length of stay in JJA (Table 6.2.5).

	df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Distance space	1	27.559	27.559	3.6821	0.0625 *
Residuals	38	284.42	7.485		
Distance time	1	23.956	23.956	3.1606	0.0834 *
Residuals	38	288.02	7.579		
Mean length of stay JJA	1	12.059	12.059	1.5279	0.224
Residuals	38	299.92	7.893		
Distance space	1	27.559	27.559	3.7019	0.0623 *
Mean length of stay JJA	1	13.264	13.264	1.7817	0.1903
Distance space/mean length of stay JJA	1	3.149	3.149	0.423	0.5196
Residuals	36	268	7.445		
Distance time	1	23.956	23.956	3.2082	0.0817 *
Mean length of stay JJA	1	13.837	13.837	1.8531	0.1819
Distance space/mean length of stay JJA	1	5.367	5.367	0.7187	0.4022
Residuals	36	268.82	7.467		

* $p < 0.1$

Table 6.2.5 : Multiple regression analysis with Anova for the relationship between temperature and overnight stays (Table 6.2.2, right column), distance in space and time from the nearest city and mean length of stay in June - July - August (JJA)

6.2.5. Discussion

Our results show that there is an impact of high temperature values at lower elevation on the number of overnight stays made by domestic tourists in the Swiss Alps: 24 resorts revealed a correlation between the number of hot days at lower elevation and the number of overnight stays in the mountains. The correlation with temperature was stronger than with sunshine duration (20 resorts) despite the well-known positive correlation between temperature and sunny days in summer in the Swiss Alps: contrary to winter-time conditions, at higher elevation, a summer rainy day is colder on average than a sunny day (Rebetez, 1996). The number of overnight stays in the Alpine resorts of Vaud, Valais and Bern had a higher correlation with temperature compared to Graubunden, where the correlation with sunshine duration was stronger than with temperature. This can be explained by the distance to the nearest main city. The reaction to hot summer temperatures was highest in Vaud, where the alpine tourist destinations are closest to the nearest main cities, and lowest in Graubunden, where the distance to the main cities is greatest. A possible explanation for this is that when people take a last minute decision to go to the mountains because of hot temperatures they prefer to go to nearby locations. There are some exceptions, such as Samnaun or Silvaplana, that are situated far away from the main cities but correlate well with hot temperatures. The differences which appeared between some nearby resorts such as Lenk and Kandersteg probably depend on factors other than the distance to the nearest main cities. For all these resorts, further studies, including multifactorial analyses (marketing done by the resort, public infrastructure in the resorts such as swimming pools, special seasonal offers, etc.) could explain specific behaviours.

The significant negative correlation between the distance by car (both in time and space) from the nearest main city and the relationship between temperature and overnight stays suggests that the shorter the distance, the more likely the tourists are to visit the resorts during hot temperatures.

The stronger correlation observed in June and August compared to July is probably due to school holidays and to the peak domestic tourist demand in summer, which takes place from the beginning of July until mid-August. This is normally the hottest time of the year, when long stays are planned well in advance, independent of the weather. The average length of stay was shortest in June, which suggests that occupancy may have been determined more by short-term decisions. In order to confirm this hypothesis, it would be necessary to know the reservation dates of the stays, but these data unfortunately do not exist. August has a slightly shorter average length of stay than July. This may be because school holidays normally end in early or mid-August. The stronger correlation with

temperature in August compared to July may be because overnight stays are again organized on a short-term basis.

6.2.6. Conclusions

Our results demonstrate a correlation between domestic tourist demand and hot summer temperatures in the Swiss Alps. Particularly during June and, to a lesser extent, August, there is a correlation between the number of nights spent in mountain resorts and hot temperatures at lower elevations, the origin of most domestic tourists.

Alpine resorts nearest to major cities had stronger correlations with hot summer temperatures, and this may be because reactions to hot episodes take place on a short-term basis, with the result that nearby mountain resorts are chosen.

Our results suggest that summer occupancy in Alpine tourist resorts may benefit from hotter temperatures at lower elevations. Domestic tourists appear to react to hot days by spending more nights in hotels in the mountains. If heat waves increase in frequency and intensity, it is possible that domestic tourists will choose to go to mountain resorts more frequently or for longer periods. The observed patterns may affect tourists from larger areas if the summer heat experienced in 2003 or 2006 becomes more frequent.

The results concerning the impact of hot temperatures and sunshine duration on domestic overnight stays show that further studies could include multifactorial analyses (marketing done by the resort, public infrastructure of the resorts such as swimming pools, special offers, etc.) in order to measure the impact of each factor on the overnight stays. Variables other than overnight stays (restaurant covers, cable car use, etc.) could also be included in order to quantify the impact of hot temperature episodes on day trippers.

6.2.7. Acknowledgements

This work was supported in part by the Forest Investigation Programme, a joint project between the Swiss Federal Office for the Environment and the WSL Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. We are grateful to MeteoSwiss and to the Swiss Federal Statistical Office for providing the data, to Flurin Sutter for drawing the map and to John Innes and Christophe Clivaz for their useful comments and suggestions.

6.3. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Les résultats de notre article montrent que les températures élevées à basse altitude ont un impact sur le nombre de nuitées engendrées par le tourisme domestique dans les Alpes suisses; l'ensoleillement en montagne jouant un rôle moins important à l'exception des Grisons. Ceci s'explique potentiellement par la distance des stations au grand centre urbain le plus proche. En effet, la réaction aux températures estivales chaudes en plaine a été la plus importante pour les Alpes vaudoises, où les stations sont les plus proches d'un grand centre urbain, alors que les réactions les plus faibles ont eu lieu pour les Grisons, où la distance à un grand centre urbain est plus importante. Une explication possible est que lorsque les touristes prennent la décision de partir en montagne à la dernière minute pour cause de grandes chaleurs en plaine, ils préfèrent s'orienter vers les destinations les plus proches afin d'éviter un trop long trajet.

Plus largement, nos résultats suggèrent que les stations touristiques des Alpes pourraient bénéficier de l'augmentation future des températures liée au changement climatique. Le changement climatique pourrait, dans certaines conditions et dans une certaine mesure, offrir de nouvelles opportunités aux stations touristiques des Alpes et, plus généralement, de montagnes. Nos résultats sont ainsi comparables aux prévisions des modèles concernant l'évolution des flux touristiques que nous avons présentées au chapitre 2.5.2.

Toutefois, notre étude est innovatrice dans ce domaine et avait pour première vocation d'explorer des pistes de réflexion. D'autres études seraient à présent utiles pour mieux appréhender ce

phénomène. Ainsi, une analyse multifactorielle prenant en compte, en plus de la distance à un grand centre urbain et le séjour moyen, le marketing fait par la station, les offres spéciales, les infrastructures publiques telles les piscines, salles de sport et autres, le taux de change, etc. permettrait d'expliquer plus précisément les spécificités de certaines stations.

Par ailleurs, des études concernant les facteurs qui influencent le choix des destinations de vacances des touristes suisses ainsi que leurs comportements lors des grandes chaleurs, offriraient également un complément intéressant à nos résultats. En effet, il serait utile de connaître les raisons qui incitent les touristes à monter en montagne lors des grandes chaleurs en plaine afin de pondérer la recherche de la fraîcheur avec les autres motivations.

D'autre part, notre étude ne rend compte que d'un type de fréquentation touristique, soit la fréquentation touristique hôtelière domestique. Celle-ci exclut les touristes étrangers et ceux qui se déplacent à la journée. De plus, les données de fréquentation hôtelière suisses n'étant relevées que par mois, elles ne permettent pas une analyse fine de la réactivité des touristes aux grandes chaleurs. Dès lors, d'autres études, s'intéressant à la fréquentation quotidienne de diverses prestations touristiques de montagne en lien avec les conditions climatiques, apporteront une suite à notre recherche.

Malgré ces limites, rappelons que la question posée par cette recherche est novatrice puisque jusqu'à ce jour elle n'avait jamais été traitée. Les résultats encourageants obtenus nous confirment qu'il s'agit bien là d'une question cruciale qui mériterait que d'autres études s'y intéressent. En effet, une meilleure connaissance des comportements touristiques actuels en lien avec les conditions météorologiques permettrait d'offrir de meilleures bases pour la modélisation des comportements touristiques futurs suite au changement climatique.

7. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Le tourisme est directement lié au changement climatique par les émissions de gaz à effet de serre qu'il engendre et par l'impact de l'évolution des variables climatiques sur la fréquentation et sur les pratiques des touristes. Depuis la fin du 20^{ème} siècle, les recherches scientifiques se sont intéressées à l'un ou l'autre de ces liens. Notre étude du changement climatique dans les montagnes suisses s'inscrit clairement dans le second champ, soit l'impact du changement climatique sur le tourisme. Plus particulièrement, notre recherche en climatologie appliquée s'est attelée à l'analyse de différentes variables climatiques favorables à la pratique des activités touristiques extérieures en montagne en Suisse.

En tant que ressource pour le tourisme, le climat joue un rôle important pour de nombreuses destinations touristiques. Dès lors, tout changement des conditions climatiques d'un lieu peut avoir des conséquences sur l'offre et la demande touristique. Ces conséquences et leur ampleur sont encore peu connues.

On sait cependant actuellement que le changement climatique implique notamment l'évolution de deux variables météorologiques qui jouent un rôle pour le tourisme de montagne : la température et l'enneigement. Notre revue de la littérature concernant leur évolution a montré que les températures ont augmenté durant le 20^{ème} siècle de près de 1 °C / 100 ans pour les stations au nord des Alpes et, depuis les années 1970, de presque 0.6 °C par décennie en moyenne suisse. D'autre part, elle a mis en évidence que l'enneigement a diminué aux altitudes les plus basses en lien avec l'augmentation de l'altitude de l'isotherme du 0 °C qui se situe actuellement 300 m plus haut que dans les années 1960.

Le décalage altitudinal de l'isotherme 0 °C a ainsi eu un impact sur l'enneigement au sol, mais également sur les précipitations neigeuses. C'est pourquoi, nous avons décidé d'analyser l'évolution du nombre de jours de précipitations neigeuses (SD) par rapport au nombre de jour de précipitations totales (PD) et les conséquences potentielles de cette évolution pour les domaines skiables.

Nos résultats montrent une diminution généralisée de la proportion du nombre de jours de précipitations neigeuses par rapport au nombre de jours de précipitations totales aux altitudes inférieures à 1700 m. Les stations de ski ayant tout ou une partie de leur domaine skiable à ces altitudes sont concernées. En outre, notre analyse de l'évolution de la proportion de SD/PD par saison durant les périodes 1961-2008 et 1979-2008 a mis en évidence qu'en règle générale la diminution a été plus prononcée au printemps (mars-avril) qu'en hiver (décembre-janvier-février). Ceci est confirmé par notre analyse mensuelle de la période 1961-2008 puisque novembre, mars et avril montrent une diminution plus importante que décembre, janvier et février. Par ailleurs, les stations dont la proportion de SD/PD a diminué de plus de 20%, avaient des températures au début de la période analysée (1961 et 1979) situées au-dessus du seuil de $-2.7\text{ °C} \pm 0.8\text{ °C}$ en hiver et $-3.8\text{ °C} \pm 0.6\text{ °C}$ au printemps. Au-dessus de ces seuils, la diminution de la proportion de SD/PD a atteint jusqu'à 80% sur 30 ans, pour la période 1979 à 2008.

Aux altitudes de départ de nombreuses stations de ski des montagnes suisses, entre 800 et 1400 m, la proportion de SD/PD a nettement diminué. Par exemple, de 1979 à 2008, pour les altitudes comprises entre 801 et 1100 m, on relève une diminution de 6 à 13% par décennie en hiver. Entre 1101 et 1400 m de 4 à 10% par décennie. De plus, actuellement, c'est seulement en février que les précipitations neigeuses sont encore garanties dès la classe d'altitude 1401-1700 m. Ceci signifie que durant les autres mois et aux altitudes inférieures, les précipitations tombent sous forme de neige dans 20 à 80% des jours de précipitations. Dans les années 1960, la garantie des précipitations neigeuses (soit qu'il neige dans plus de 90% des jours de précipitations totales) se situait une à deux classes altitudinales au-dessous de celles que l'on rencontre actuellement.

Nos résultats montrent également que les proportions de SD/PD actuelles de décembre, janvier et février correspondent à celles de novembre et mars des années 1960. Un décalage d'environ un mois a eu lieu durant ces cinquante dernières années. Si les températures augmentent au moins de manière similaire durant les prochaines décennies, on peut s'attendre à un nouveau transfert en altitude des précipitations neigeuses. La situation actuelle de novembre et mars pourrait ainsi devenir la future situation des mois de décembre, janvier et février. Les stations situées à des altitudes inférieures à 1700 m seront ainsi particulièrement concernées puisque les précipitations sous forme de neige n'y seront plus garanties.

Outre le manque en apport de neige naturelle, le remplacement progressif des précipitations sous forme de neige par des précipitations sous forme de pluie sera problématique pour l'enneigement déjà présent au sol. En effet, les précipitations pluvieuses augmentent la fonte de la neige, qu'elle soit naturelle ou artificielle. Des études supplémentaires devraient cependant être menées afin de mieux

intégrer les conséquences d'une augmentation des précipitations sous forme de pluie sur le manteau neigeux et sur l'évolution des possibilités d'enneigement artificiel. Ces études permettraient de compléter nos résultats et d'offrir une vision globale de l'enneigement futur. Par ailleurs, pour aller plus loin dans ce type de recherches, il serait probablement judicieux d'explorer des modèles par seuils (step-function) pour expliquer l'évolution de la proportion de SD/PD. En effet, comme présenté au chapitre 3, le système climatique, de même que le système touristique, est un système non-linéaire et chaotique ce qui rend l'analyse de certains aspects de son évolution extrêmement complexe. Nous avons particulièrement été confrontés à cette complexité lors de notre analyse des précipitations neigeuses. En effet, l'étude des ratios de précipitations neigeuses par rapport aux précipitations totales présente une rupture dans la linéarité lors du passage de l'état liquide (pluie) à l'état solide (neige) des précipitations au seuil approximatif de 0 °C. De plus, chaque instant d'une journée peut être soit « avec précipitations » soit « sans précipitations »; celui-ci étant déterminé par un seuil de quantité de précipitations fonction du rapport entre humidité relative et humidité absolue, de la pression et de la température. Il en résulte que la relation entre la température représentative de la journée et celle du moment où surviennent les précipitations n'est pas forcément directe. C'est pourquoi, des études utilisant des modèles par seuils, qui rendent mieux compte de la non-linéarité, pourraient apporter un complément d'informations à la compréhension de ce phénomène.

Dans le but de mieux définir les besoins en enneigement des stations de ski, notre étude a identifié les facteurs clés qui influencent l'enneigement minimal requis pour ouvrir une piste. A l'heure actuelle, les études qui se sont intéressées à ce sujet se sont essentiellement basées sur des critères altitudinaux. Notre analyse auprès des spécialistes des domaines skiables des Alpes et du Jura vaudois en Suisse montre qu'un nombre important de facteurs climatiques, géomorphologiques et humains influencent l'enneigement des pistes de ski et que, de ce fait, la hauteur minimale de neige requise est dépendante de la situation de chaque piste. En plus de l'altitude, les quantités de précipitations régionales, la rugosité du sol, l'orientation et la déclivité de la pente, la fréquentation et la préparation des pistes ainsi que les possibilités d'enneigement artificiel jouent un rôle essentiel dans l'enneigement d'une piste.

En effet, notre revue de la littérature et notre analyse des données pluviométriques de plusieurs stations météorologiques des montagnes suisses ont montré que la région dans laquelle se situe un domaine skiable est, en Suisse, le premier facteur explicatif des différences de régime de précipitations. Si les températures sont négatives ou proches de 0 °C, les régions qui bénéficient de quantités de précipitations importantes auront plus rapidement l'enneigement permettant la pratique

du ski. Par ailleurs, suivant le type de sol, la rugosité varie. Les besoins minimaux en enneigement pour l'ouverture des pistes de ski seront dès lors plus ou moins importants. Ainsi, plus la rugosité du sol est importante, plus il faut de neige; les prairies uniformes sans pierres, par exemple, ont besoin d'une couverture minimale de 10-15 cm de neige damée alors qu'il en faut plus de 60 cm sur un pierrier. L'orientation et la déclivité jouent également un rôle important; la neige sur les pistes qui reçoivent plus de soleil (orientation sud et ouest et les fortes pentes) fondant plus rapidement que celle des pistes plus à l'ombre et moins pentues. De plus, l'inclinaison de la pente influence le nombre de virages fait par les skieurs : plus une piste est raide et étroite, plus il faut de neige. Il en va de même en ce qui concerne sa fréquentation. Si les quantités de neige sont faibles, il est nécessaire de remonter, tous les soirs, la neige poussée vers l'aval par les skieurs. La manière de préparer les pistes ayant énormément évolué ces dernières années suite à l'usage généralisé des dameuses, l'impact des facteurs humains sur l'enneigement a cependant pu être réduit. Enfin, l'usage de plus en plus fréquent des canons à neige a permis aux stations de pallier le manque de neige de certains hivers.

Les résultats de notre recherche posent les bases pour de futures études sur la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables. Il serait désormais utile de cartographier les besoins et possibilités en enneigement de chaque piste des domaines skiables suisses et, plus largement, européens. Ceci permettrait de les différencier et d'obtenir des prévisions quant à leur viabilité future bien plus précises que les prévisions actuelles. Une cartographie fine nécessite cependant un long travail de terrain. Tant qu'une base de données des besoins en enneigement des pistes de ski n'aura pas vu le jour, nous recommandons que les modèles d'analyse de la viabilité des domaines skiables ou de la fiabilité de leur enneigement intègrent au minimum, en plus de la hauteur de neige au sol et de l'altitude des domaines, les quantités de précipitations régionales, le pourcentage de chaque type de sol par tranches d'altitude et les possibilités en enneigement artificiel.

Dans une dernière partie, notre recherche s'est intéressée à la saison estivale. Suite à notre revue de la littérature, nous avons mis en évidence que les scénarios de prévisions concernant l'impact du changement climatique sur le tourisme estival prévoient tous une réorientation des destinations des touristes plus au nord et en altitude lors des grandes chaleurs estivales de juin à août. Aucune étude n'avait cependant montré si ce phénomène était déjà perceptible. Dès lors, notre recherche s'est intéressée à déterminer si aujourd'hui déjà les périodes de grandes chaleurs ont une influence sur la fréquentation touristique de montagne. Pour ce faire, nous avons analysé les variations de la fréquentation hôtelière domestique de 40 stations touristiques des Alpes suisses en relation avec les températures estivales mesurées en plaine et l'ensoleillement mesuré en montagne.

Nos résultats vont dans le même sens que les scénarios de prévisions des flux touristiques puisqu'ils montrent que les températures élevées à basse altitude ont un impact sur le nombre de nuitées engendrées par le tourisme domestique dans les stations des Alpes suisses. L'ensoleillement en montagne joue, quant à lui, un rôle moins important sur les nuitées domestiques des stations des différentes régions des Alpes suisses à l'exception de celles des Grisons.

Nous avons également mis en évidence des différences entre les stations étudiées concernant la réactivité des nuitées hôtelières domestiques aux températures en plaine. Ces différences s'expliquent potentiellement par la distance des stations à un grand centre urbain. La réaction aux températures estivales chaudes en plaine a été la plus importante pour les Alpes vaudoises, où les stations sont les plus proches d'un grand centre urbain, alors que les réactions les plus faibles ont eu lieu pour les Grisons, où la distance à un grand centre urbain est plus importante. Il est possible que lorsque les touristes prennent la décision de partir en montagne à la dernière minute pour cause de grandes chaleurs en plaine, ils préfèrent s'orienter vers les destinations les plus proches afin d'éviter un trop long trajet. Plus largement, nos résultats suggèrent que les stations touristiques des Alpes pourraient bénéficier de l'augmentation future des températures. Le changement climatique pourrait, dans certaines conditions et dans une certaine mesure, offrir de nouvelles opportunités aux stations touristiques de montagnes.

Cependant, d'autres études seraient nécessaires pour valider cette hypothèse; la vocation de notre recherche, novatrice dans ce domaine, ayant été uniquement d'explorer des pistes de réflexion et de voir si aujourd'hui déjà, il est possible de percevoir une influence des périodes de grandes chaleurs sur la fréquentation hôtelière de montagne. Dès lors, une analyse multifactorielle prenant en compte notamment la distance à un grand centre urbain, le séjour moyen, le marketing fait par la station, les offres spéciales, les infrastructures publiques telles les piscines, salles de sport et autres, le taux de change, etc. permettrait d'expliquer plus précisément les spécificités de certaines stations. D'autre part, des études concernant les comportements des touristes suisses lors des grandes chaleurs, ainsi que les facteurs qui influencent le choix de leurs destinations de vacances ou de séjours de courte durée apporteraient un complément intéressant à nos résultats. Enfin, notre étude ne rend compte que d'un type de fréquentation touristique, soit la fréquentation touristique hôtelière domestique. Celle-ci exclut les touristes étrangers et ceux qui se déplacent à la journée. De plus, les données de fréquentation hôtelière suisses n'étant relevées que par mois, elles ne permettent pas une analyse fine de la réactivité des touristes aux grandes chaleurs. D'autres études, s'intéressant à la fréquentation quotidienne de diverses prestations touristiques de montagne en lien avec les conditions climatiques, offriraient une suite à notre recherche.

Lors de la présentation des différents axes d'études en changement climatique et tourisme de montagne, nous avons mentionné que ce champ de recherche est relativement jeune et ce d'autant plus en ce qui concerne la saison estivale. Une investigation dans les trois axes de recherche cités ci-dessus permettraient de fournir des connaissances qui font actuellement défauts.

Finalement, même si les connaissances sur la saison hivernale sont plus abondantes que celles sur l'été, notre revue de la littérature a confirmé un manque de résultats pour l'hiver aussi. Notre travail de thèse a permis de combler certaines lacunes concernant la compréhension de l'évolution des différentes variables climatiques favorables à la pratique des activités touristiques extérieures en montagne en Suisse et leurs conséquences sur celles-ci. Pourtant, que ce soit au niveau de l'évolution de l'enneigement naturel, de l'évolution des possibilités en enneigement artificiel, de la fiabilité de l'enneigement des domaines skiabiles et de leur viabilité ou encore du potentiel de développement de la saison d'été par l'apport de touristes lors des périodes de grande chaleur en plaine, de nombreuses questions demeurent. Nous espérons que de nouvelles recherches en ce domaine verront prochainement le jour afin d'y répondre.

BIBLIOGRAPHIE

- Abegg, B., 1996: *Klimaaenderung und Tourismus - Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen*. Zurich: Schlussbericht NFP 31.
- Abegg, B., 2011: Le tourisme face au changement climatique. Un rapport de synthèse de la CIPRA. In *Compact*, ed. CIPRA, Schaan: CIPRA.
- Abegg, B., Agrawala, S., Crick, F. & de Montfalcon, A., 2007: Climate change impacts and adaptation in winter tourism. In *Climate Change in the European Alps*, éd. Agrawala, S., Paris: OCDE - Organ. for Econ, Co-oper. and Dev., pp. 25-60.
- Agrawala, S. (eds). 2007: *Climate Change in the European Alps*. Paris: OCDE - Organ. for Econ, Co-oper. and Dev.
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Tank, A., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Kumar, K. R., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M. & Vazquez-Aguirre, J. L., 2006: Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111, doi:10.1029/2005jd006290, D05109.
- Amelung, B. & Viner, D., 2006: Mediterranean Tourism: Exploring the Future with the Tourism Climatic Index. *Journal of Sustainable Tourism*, 14, 349-366.
- Badré, M., Prime, J.-L. & Ribière, G., 2009: Neige de culture: Etat des lieux et impacts environnementaux. Note socio-économique. République Française. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.
- Baeriswyl, P. A., Rebetez, M., Winistoefer, A. & Roten, M., 1997: *Répartition spatiale des modifications climatiques dans le domaine alpin*. Zurich: vdf.
- Baggio, R., 2008: Symptoms of complexity in a tourism system. *Tourism Analysis*, 13, 1-20.
- Bailly, A. & Béguin, H., 2001: *Introduction à la géographie humaine*. 8ème édition. Paris: Armand Colin (U. Géographie).
- Bark, R., Colby, B. & Dominguez, F., 2010: Snow days? Snowmaking adaptation and the future of low latitude, high elevation skiing in Arizona, USA. *Climatic Change*, 102, doi:10.1007/s10584-009-9708-x, 467-491.
- Becken, S., 2002: Analysing international tourist flows to estimate energy use associated with air travel. *Journal of Sustainable Tourism*, 10, 114-131.
- Becken, S., Frampton, C. & Simmons, D., 2001: Energy consumption patterns in the accommodation sector. The New Zealand case. *Ecological Economics*, 39, 371-386.

- Becken, S. & Hay, J. E., 2007: *Tourism and Climate Change. Risks and Opportunities*. Clevedon: Channel View Publications (Climate change, Economies and Society).
- Becken, S. & Simmons, D. G., 2002: Understanding energy consumption patterns of tourist attractions and activities in New Zealand. *Tourism Management*, 23, 343-354.
- Becken, S., Simmons, D. G. & Frampton, C., 2003: Energy use associated with different travel choices. *Tourism Management*, 24, 267-277.
- Begert, M., Schlegel, T. & Kirchhofer, W., 2005: Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*, 25, doi:10.1002/joc.1118, 65-80.
- Berque, A., 1986: *Le sauvage et l'artifice : les Japonais devant la nature*. Paris: Gallimard.
- Berrittella, M., Bigano, A., Roson, R. & Tol, R. S. J., 2006: A general equilibrium analysis of climate change impacts on tourism. *Tourism Management*, 27, 913-924.
- Besancenot, J.-P., 1989: *Climat et tourisme*. Paris: Masson (Collection Géographie).
- Bezzola, A., 1975: Probleme der Eignung und der Aufnahmekapazität touristischer Bergregionen der Schweiz, St. Gallen: Hochschule St. Gallen.
- Bigano, A., Hamilton, J., Maddison, D. & Tol, R., 2006: Predicting tourism flows under climate change. *Climatic Change*, 79, 175-180.
- Boret, A., 2005: Le tourisme, discipline d'enseignement, sujet d'étude. *Espaces*, 223, 18-20.
- Bourdeau, P., 2003: Territoires du hors-quotidien: une géographie culturelle du rapport à l'ailleurs dans les sociétés urbaines contemporaines. Le cas du tourisme sportif de montagne et de nature. In *Rapport de diplôme d'habilitation à diriger des recherches*, Grenoble: Université Joseph Fourier-Grenoble 1 - Institut de Géographie Alpine.
- Bourdeau, P. (eds). 2007a: Les sports d'hiver en mutation: crise ou révolution géoculturelle? Paris: Hermès science publications.
- Bourdeau, P., 2007b: Les sports de nature comme médiateurs de l'entre-deux ville-montagne: vers un post-tourisme? In *Campagne-ville. Le pas de deux. Enjeux et opportunités des recompositions territoriales*, eds. Monteverti Weber, L., Deschenaux, C. & Tranda-Pitton, M., Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, pp. 27-36.
- Bourdeau, P., 2009: De l'après-ski à l'après-tourisme, une figure de transition pour les Alpes ? Réflexions à partir du cas français. *Revue de géographie alpine [en ligne]*, 97, mis en ligne le 09 décembre 2009, consulté le 17 décembre 2009. URL : <http://rga.revues.org/index1049.html>.
- Bourg, D., 1996: *Les scénarios de l'écologie*. Paris: Hachette.
- Buentgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J. O., Herzig, F., Heussner, K.-U., Wanner, H., Luterbacher, J. r. & Esper, J., 2011: 2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility. *Science*, doi:10.1126/science.1197175.

- Buerki, R., 2000: *Klimaaenderung und Anpassungsprozesse im Tourismus. Dargestellt am Beispiel des Wintertourismus*. St. Gallen: Publikation der Ostschweizerischen Geographischen Gesellschaft NF H 6.
- Buerki, R., Abegg, B. & Elsasser, H., 2007: Climate change and tourism in the alpine regions of Switzerland. In *Climate Change and Tourism - Assessment and Coping Strategies*, eds. Amelung, B., Blazejczyk, K. & Matzarakis, A., Maastricht - Warsaw - Freiburg, pp. 165-172.
- Butler, R. W., 1980: The concept of a tourist area cycle of evolution: Implications for management of resources. *Canadian Geographer*, 24, 97-116.
- Camus, S., Hikkerova, L. & Sahut, J.-M., 2010: Tourisme durable: une approche systémique. *Revue Management et Avenir*, 34, 253-269.
- Ceron, J.-P. & Dubois, G., 2000: Tourisme et changement climatique. In *Impacts et Potentiels du Changement Climatique en France au XXIème Siècle: Premier ministre, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement*, 2d ed., pp. 104-111.
- CH2011. 2011: Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC. Zurich, Switzerland.
- Chamussy, H., 1989: A propos de la spécificité des espaces de montagne (Fugue épistémologique). *Revue de géographie alpine*, 77, 243-257.
- Chardon, M., 1989: Essai d'approche de la spécificité des milieux de la montagne alpine. *Revue de géographie alpine*, 77, 15-28.
- Cilliers, P., 1998: *Complexity and postmodernism. Understanding complex systems*. London: Routledge.
- Clivaz, C., 2001: *Influence des réseaux d'action publique sur le changement politique. Le cas de l'écologisation du tourisme en Suisse et dans le canton du Valais*. Basel: Helbing & Lichtenbahn (Ecologie et Société).
- Clivaz, C., 2008: L'enjeu de l'interdisciplinarité dans les études en tourisme. In *Le défi de l'inter- et transdisciplinarité. Concepts, méthode et pratiques innovantes dans l'enseignement et la recherche*, eds. Darbelley, F. & Paulsen, T., Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Colonna, J.-F., 2004: Définition et animation de variétés bi- et tridimensionnelles au moyen de pseudo-projections, auto-transformations d'images. In *Secondary Définition et animation de variétés bi- et tridimensionnelles au moyen de pseudo-projections, auto-transformations d'images*, ed. eds. Secondary Colonna, J.-F., Pages. Place Published: CMAP (Centre de Mathématiques Appliquées), Ecole Polytechnique, CNRS. <http://www.lactamme.polytechnique.fr/Mosaic/descripteurs/SurfaceProjector.01.Fra.html> (Consulté le 02.05 2011).
- Darbelley, F. & Paulsen, T., 2008: Le défi de l'inter- et transdisciplinarité: enjeux et fondements théoriques. In *Le défi de l'inter- et transdisciplinarité. Concepts, méthodes et pratiques innovantes dans l'enseignement et la recherche*, eds. Darbelley, F. & Paulsen, T., Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.

- Dawson, J., Scott, D. & McBoyle, G., 2007: Using an analogue approach to examine climate change vulnerability of the New England (USA) ski tourism industry. In *Developments in Tourism Climatology. 3rd International Workshop on Climate, Tourism and Recreation. Alexandroupolis, Greece 19-22 September 2007*, éd. Matzarakis, A., de Freitas, C. R. & Scott, D., Freiburg: Commission Climate, Tourism and Recreation, International Society of Biometeorology, pp. 183-190.
- Dawson, J., Scott, D. & McBoyle, G., 2009: Climate change analogue analysis of ski tourism in the northeastern USA. *Climate Research*, 39, doi:10.3354/cr00793, 1-9.
- 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, 45-54.
- de Rosnay, J., 1975: *Le macroscopie. Vers une vision globale*. Paris: Editions du Seuil (Collection Points).
- Debarbieux, B., 1989a: Dans la fine substance de la connaissance. *Revue de géographie alpine*, 77, 339-349.
- Debarbieux, B., 1989b: Les statuts implicites de la montagne en géographie. *Revue de géographie alpine*, 77, 279-291.
- Debarbieux, B., 2001a: Conclusion. La montagne dans la recherche scientifique: statuts, paradigmes et perspectives. *Revue de géographie alpine*, 89, doi:10.3406/rga.2001.3041, 101-121.
- Debarbieux, B., 2001b: La montagne: un objet géographique? In *Les montagnes: discours et enjeux géographiques*, éd. Veyret, Y., Paris: Sedes.
- Della-Marta, P. M., Haylock, M. R., Luterbacher, J. & Wanner, H., 2007a: Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112, doi:10.1029/2007JD008510, D15103.
- Della-Marta, P. M., Luterbacher, J., von Weissenfluh, H., Xoplaki, E., Brunet, M. & Wanner, H., 2007b: Summer heat waves over western Europe 1880-2003, their relationship to large-scale forcings and predictability. *Climate Dynamics*, 29, 251-275.
- Descola, P., 2005: *Par-delà nature et culture*. Paris: Gallimard (Bibliothèque des sciences humaines).
- Dewailly, J.-M., 2006: *Tourisme et géographie: entre pérégrinité et chaos*. Paris: L'Harmattan (Tourismes et Sociétés).
- Dubois, G., Ceron, J.-P., Van de Walle, I., Martin, O. & Picard, R., 2009: Météorologie, climat et déplacements touristiques : comportements et stratégies des touristes. Marseille - Paris: TEC - CREDOC.
- Durand, Y., Giraud, G., Latenser, M., Etchevers, P., Merindol, 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, doi:10.1175/2009jamc1810.1, 2487-2512.

- Eckel, O., 1938: Über die Schneeverhältnisse von Davos. *Jahresbericht der Naturforschenden Gesellschaft Graubündens*, 75 109-156.
- Ekeland, I., 1995: *Le chaos*. Paris: Flammarion (Dominos).
- Elsasser, H. & Buerki, R., 2002: Climate change as a threat to tourism in the Alps. *Climate Research*, 20, doi:10.3354/cr020253, 253-257.
- Elsasser, H. & Messerli, P., 2001: The Vulnerability of the Snow Industry in the Swiss Alps. *Mountain Research and Development*, 21, 335-339.
- Farrell, B. H. & Twining-Ward, L., 2004: Reconceptualizing tourism. *Annals of Tourism Research*, 31, 274-295.
- Farrell, B. H. & Twining-Ward, L., 2005: Seven Steps Towards Sustainability: Tourism in the Context of New Knowledge. *Journal of Sustainable Tourism*, 13, 109-122.
- Faulkner, B. & Russel, R., 2003: Chaos and Complexity in Tourism: In Search of a New Perspective. In *Progressing tourism research*, éd. Faulkner, B., Clevedon: Channel View Publications.
- Fauve, M., Rhyner, H. & Schneebeli, M., 2002: *Préparation et entretien des pistes. Manuel pour le praticien*. Davos: WSL-SLF Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches.
- Feng, S. & Hu, Q., 2007: Changes in winter snowfall/precipitation ratio in the contiguous United States. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112, doi:10.1029/2007jd008397, D15109.
- Foehn, P., 1990: Schnee und Lawinen. *Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre*, Internationale Fachtagung, Mitteilungen VAW ETH Zurich No. 108, 33-48.
- Gaïdo, L., 2007: Tourisme de montagne: le futur est "post". In *Les sports d'hiver en mutation. Crise ou révolution géoculturelle*, éd. Bourdeau, P., Paris: Lavoisier.
- GIEC. 2007: Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève: GIEC.
- Gleick, J., 1987: *Chaos. Making a new science*. New York: Penguin Books.
- Goessling, S., Bredberg, M., Randow, A., Sandstroem, E. & Svensson, P., 2006: Tourist Perceptions of Climate Change: A Study of International Tourists in Zanzibar. *Current Issues in Tourism*, 9, 419 - 435.
- Goessling, S. & Hall, C. M., 2006a: An introduction to tourism and global environmental change. In *Tourism & Global Environmental Change. Ecological, social, economic and political interrelationships*, éd. Goessling, S. & Hall, C. M., Abingdon: Routledge.
- Goessling, S. & Hall, C. M., 2006b: Uncertainties in Predicting Tourist Flows Under Scenarios of Climate Change. *Climatic Change*, 79, 163-173.

- Goessling, S. & Hall, C. M., 2006c: Uncertainties in predicting travel flows: common ground and research needs. A reply to Bigano et al. *Climatic Change*, 79, 181-183.
- Gomez Martin, B., 2005: Weather, Climate and Tourism. A Geographical Perspective. *Annals of Tourism Research*, 32, 571-591.
- Gomez Martin, B., 2006: Climate potential and tourist demand in Catalonia (Spain) during the summer season. *Climate Research*, 32, 75-87.
- Gonseth, C., 2008: Adapting Ski Area Operations to a Warmer Climate in the Swiss Alps through Snowmaking Investments and Efficiency Improvements, Lausanne: EPFL.
- Gumuchian, H., 1989: Géographie et montagne: d'une terrain à une problématique. *Revue de géographie alpine*, 77, 259-266.
- Gunn, C., 1979: *Tourism planning*. New York: Crane Russack.
- Hamilton, J. & Tol, R., 2007: The impact of climate change on tourism in Germany, the UK and Ireland: a simulation study. *Regional Environmental Change*, 7, 161-172.
- Hamilton, J. M. & Lau, M. A., 2006: The role of climate information in tourist destination choice decision making. In *Tourism and global environmental change: ecological, social, economic and political interrelationships*, eds. S., G. & Hall, C. M., London: Routledge, pp. 229-225.
- Hamilton, J. M., Maddison, D. J. & Tol, R. S. J., 2005: Climate change and international tourism: a simulation study. *Global Environmental Change Part A*, 15, 253-266.
- Hantel, M. & Hirtl-Wielke, L. M., 2007: Sensitivity of Alpine snow cover to European temperature. *International Journal of Climatology*, 27, doi:10.1002/joc.1472, 1265-1275.
- Hare, F. K., 1985: Climate Variability and Change. In *Scope 27 - Climate Impact Assessment*.
- Hennessy, K. J., Whetton, P. H., Walsh, K., Smith, I. N., Bathols, J. M., Hutchinson, M. & Sharples, J., 2008: Climate change effects on snow conditions in mainland Australia and adaptation at ski resorts through snowmaking. *Climate Research*, 35, doi:10.3354/cr00706, 255-270.
- Hoerner, J.-M., 2002: *Traité de tourismologie. Pour une nouvelle science du tourisme*. Perpignan: Presses universitaires de Perpignan (Collection Etudes).
- Hoerner, J.-M. & Sicart, C., 2003: *La science du tourisme. Précis franco-anglais de tourismologie*. Baixas: Balzac éditeur.
- Holling, C., 1996: Engineering Resilience versus Ecological Resilience. In *Engineering Within Ecological Constraints*, éd. Schultze, P., Washington: National Academy of Engineering Press, pp. 31-43.
- Holling, C. & Gunderson, L., 2002: Resilience and Adaptive Cycles. In *Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, eds. Gunderson, L. & Holling, C., Washington: Island Press, pp. 25-62.
- Hufty, A., 2001: *Introduction à la climatologie*. Laval: Editions DeBoeck Université.

- Hunter, C. & Green, H., 1995: *Tourism and the Environment. A sustainable relationship?* London: Routledge.
- Huntington, T. G., Hodgkins, G. A., Keim, B. D. & Dudley, R. W., 2004: Changes in the proportion of precipitation occurring as snow in New England (1949-2000). *Journal of Climate*, 17, 2626-2636.
- IPCC. 2007a: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Cambridge: IPCC.
- IPCC. 2007b: Europe. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: IPCC, 541-580.
- Jonas, T., Marty, C. & Magnusson, J., 2009: Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, 378, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.021, 161-167.
- Jones, P. D. & Moberg, A., 2003: Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate*, 16, 206-223.
- Kapos, V., Rhind, J., Edwards, M., Price, M. F. & Ravilious, C., 2000: Developing a map of the world's mountain forest. In *Sustainable mountain development. A state of knowledge report for 2000*, édés. Price, M. F. & Butt, N., Oxon and New York: CABI Publishing (IUFRO research series 5), pp. 4-9.
- Ke, C. Q., Yu, T., Yu, K., Tang, G. D. & King, L., 2009: Snowfall trends and variability in Qinghai, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 98, doi:10.1007/s00704-009-0105-1, 251-258.
- Knafou, R. & Stock, M., 2003: Tourisme. In *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*, édés. Lévy, J. & Lussault, M., Paris: Belin, pp. 931-934.
- Knowles, N., Dettinger, M. D. & Cayan, D. R., 2006: Trends in snowfall versus rainfall in the Western United States. *Journal of Climate*, 19, 4545-4559.
- Koenig, U. & Abegg, B., 1997: Impacts of Climate Change on Winter Tourism in the Swiss Alps. *Journal of Sustainable Tourism*, 5, 46-58.
- Koerber, A. & Kaufmann, P., 2007: L'industrie suisse de la construction: évolution cyclique et problèmes structurels. *La vie économique*, 11, 36-40.
- Krippendorf, J. & Mueller, H., 1987: *La haut sur la montagne... Pour un développement du tourisme en harmonie avec l'homme et la nature*. Berne: Kümmerly - Frey.
- Larrère, C. & Larrère, R., 1997: *Du bon usage de la nature. Pour une philosophie de l'environnement*. Paris: Aubier.
- Latenser, M. & Schneebeli, M., 2003: Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931-99). *International Journal of Climatology*, 23, doi:10.1002/joc.912, 733-750.
- Latour, B., 1999: *Les politiques de la nature : comment faire entrer les sciences en démocratie*. Paris: La Découverte.

- Le Moigne, J.-L., 1990: *La modélisation des systèmes complexes*. Paris: Dunod.
- Le Moigne, J.-L., 2006: *La théorie du système générale. Théorie de la modélisation*. Paris: Les classiques du réseau intelligence de la complexité (Version électronique. Réédition de 1994).
- Le Roy Ladurie, E., 1967: *Histoire du Climat depuis l'an Mil*. Paris: Flammarion.
- Leiper, N., 1979: The Framework of Tourism. Towards a Definition of Tourism, Tourist, and the Tourist Industry. *Annals of Tourism Research*, 6, 390-407.
- Lise, W. & Tol, R. S. J., 2002: Impact of climate on tourist demand. *Climatic Change*, 55, 429-449.
- Lohmann, M. & Kaim, E., 1999: Weather and holiday preference, image, attitude and experience. *Tourism Review*, 54, 54-64.
- Lurçat, F., 2002: *Le chaos*. Paris: PUF (Que sais-je?).
- Maddison, D., 2001: In search of warmer climates? The impact of climate change on flows of British tourists. *Climatic Change*, 49, 193-208.
- Marchand, J.-P., 1985: *Contraintes climatiques et espace géographique*. Caen: Paradigme.
- Marty, C., 2008: Regime shift of snow days in Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 35, doi:10.1029/2008gl033998, L12501.
- Marty, C. & Blanchet, J., Submitted: Long-term changes in annual maximum snow depth and snowfall in Switzerland based on extreme value statistics.
- Matzarakis, A., 2007: Climate and bioclimate information for tourism. The example of Evros prefecture in Greece. In *Developments in Tourism Climatology*, eds. Matzarakis, A., de Freitas, C. R. & Scott, D., Freiburg, pp. 12-17.
- Matzarakis, A. & Endler, C., 2010: Climate change and thermal bioclimate in cities: impacts and options for adaptation in Freiburg, Germany. *International Journal of Biometeorology*, doi:10.1007/s00484-009-0296-2.
- Matzarakis, A., Koch, E. & Rudel, E., 2007a: Analysis of summer tourism period for Austria based on climate variables on daily basis. In *Developments in Tourism Climatology*, eds. Matzarakis, A., de Freitas, C. R. & Scott, D., Freiburg, pp. 122-128.
- Matzarakis, A., Rutz, F. & Mayer, H., 2007b: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 51, 323-334.
- McCullagh, P. & Nelder, J. A., 1989: *Generalized Linear Models*. 2nd edition. London: Chapman and Hall (Monographs on Statistics and Applied Probability).
- McIntosh, R., Goeldner, C. & Ritchie, B., 1994: *Tourism: principles, practices, philosophies*. 7th edition. New York: Wiley.

- McKercher, B., 1999: A chaos approach to tourism. *Tourism Management*, 20, 425-434.
- Meier, R., 1998: *Sozioökonomische Aspekte von Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz. Schlussbericht NFP 3*. Zürich: vdf.
- Meze-Hausken, E., 2008: On the (im-)possibilities of defining human climate thresholds. *Climatic Change*, 89, 299-324.
- Michelet, J., 1834: *Introduction à l'histoire universelle*. Paris: Librairie classique de L. Hachette.
- Micu, D., 2009: Snow pack in the Romanian Carpathians under changing climatic conditions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 105, doi:10.1007/s00703-009-0035-6, 1-16.
- Mieczkowski, Z., 1985: The tourism climatic index: a method of evaluating world climates for tourism. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, 29, 220-233.
- Mill, R. & Morrison, A., 1985: *The tourism system*. Sydney: Prentice-Hall International.
- Moen, J. & Fredman, P., 2007: Effects of Climate Change on Alpine Skiing in Sweden. *Journal of Sustainable Tourism*, 15, 418-437.
- Moerikoefer, W., 1948: The dependance on Altitude of the Snow Cover in the Alps. . *Extrait des procès verbaux des séances de l'Assemblée Générale d'Oslo de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale*, 161-170.
- Morin, E., 1973: *Le paradigme perdu: la nature humaine*. Paris: Editions du Seuil.
- Morin, E., 1977: *La méthode. Tome 1*. Paris: Editions du Seuil.
- Morin, J., Block, P., Rajagopalan, B. & Clark, M., 2008: Identification of large scale climate patterns affecting snow variability in the eastern United States. *International Journal of Climatology*, 28, doi:10.1002/joc.1534, 315-328.
- Mueller, H. & Weber, F., 2008: 2030: le tourisme suisse face aux changements climatiques. ed. Tourisme, S., Berne: Suisse Tourisme.
- Murphy, P., 1985: *Tourism: a community approach*. London: Routledge.
- Noethiger, C. J., Buerki, R. & Elsasser, H., 2006: The exemple of the avalanche winter 1999 and the storm Lothar in the Swiss Alps. In *Tourism & Global Environmental Change. Ecological, social, economic and political interrelationships*, eds. Goessling, S. & Hall, C. M., Abingdon: Routledge.
- Nordregio. 2004: Zones de montagne en Europe: analyse des régions de montagne dans les Etats membres actuels, les nouveaux Etats membres et d'autres pays européens. In *Contrat de la Commission européenne no 2002.CE.16.0.AT.136*.
- North, N., Kljun, N., Kasser, F., Heldstab, J., Maibach, M., Reutimann, J. & Guyer, M., 2007: Changements climatiques en Suisse. Indicateurs des causes, des effets et des mesures. In *État de l'environnement n° 0728*, ed. l'environnement, O. f. d., Berne: OFEV.

- OcCC-ProClim. 2007: *Climate Change and Switzerland 2050. Expected Impacts on Environment, Society and Economy*. Bern: OcCC / ProClim - Forum for Climate and Global Change.
- OFAG. 2011: *Commentaires et instructions relatifs à l'Ordonnance sur le cadastre de la production agricole et la délimitation des zones (Ordonnance sur les zones agricoles; RS 912.1) du 7 décembre 1998 (modifications du 14 novembre 2007 prises en compte)*. Berne: Département fédéral de l'économie DFE - Office fédéral de l'agriculture OFAG - Section cadastre de la production.
- OFS. 2007: *La statistique suisse du tourisme 2007*. Neuchâtel: OFS.
- OMT. 1994: *Recommandations sur les statistiques du tourisme*. In *Etudes statistiques, série M*, New-York: Nations Unies.
- Pearce, D., 1989: *Tourist development*. 2nd edition. Harlow: Longman.
- Peeters, P., Goessling, S. & Becken, S., 2006: Innovation towards tourism sustainability: climate change and aviation. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 1, 184 - 200
- Péguy, C.-P., 1989: *Jeux et enjeux du climat*. Paris: Masson (Pratique de la Géographie).
- Perch-Nielsen, S., 2008: *Climate Change and Tourism Intertwined*, Zurich: ETH Zurich.
- Perch-Nielsen, S., Amelung, B. & Knutti, R., 2010: Future climate resources for tourism in Europe based on the daily Tourism Climatic Index. *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-009-9772-2.
- Perry, A., 2005: The Mediterranean: How Can the World's Most Popular and Successful Tourist Destination Adapt to a Changing Climate? In *Tourism, Recreation and Climate Change*, eds. Hall, C. M. & Higham, J., Clevedon: Channel View Publications.
- Pfister, C., 2010: The vulnerability of past societies to climatic variation: a new focus for historical climatology in the twenty-first century. *Climatic Change*, 100, doi:DOI 10.1007/s10584-010-9829-2, 25-31.
- Pickering, C. & Buckley, R., 2010: Climate Response by the Ski Industry: The Shortcomings of Snowmaking for Australian Resorts. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 39, doi:10.1007/s13280-010-0039-y, 430-438.
- Piguet, E., 2009: Re-embedding the environment into migration theory. *Submitted*.
- Ratzel, F., 1897: *Politische Geographie*. Munich: Oldenburg.
- Rebetez, M., 1996: Seasonal relationship between temperature, precipitation and snow cover in a mountainous region. *Theoretical and Applied Climatology*, 54, 99-106.
- Rebetez, M., 2004: Summer 2003 maximum and minimum daily temperatures over a 3300 m altitudinal range in the Alps. *Climate Research*, 27, 45-50.

- Rebetez, M., 2011: *La Suisse se réchauffe*. 4ème édition. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes (Nature et environnement).
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J. P. & Menzel, A., 2006: Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Annals of Forest Science*, 63, doi:10.1051/forest:2006043, 569-577.
- Rebetez, M. & Reinhard, M., 2008: Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004. *Theoretical and Applied Climatology*, 91, doi:10.1007/s00704-007-0296-2, 27-34.
- Rey, L., 1986: La neige, ses métamorphoses, les avalanches. ANENA.
- Richardson, K., Steffen, W., Schellnhuber, H. J., Alcamo, J., Barker, T., Kammen, D. M., Leemans, R., Liverman, D., Munasinghe, M., Osman-Elasha, B., Stern, N. & Waeber, O., 2009: Synthesis report from Climate Change. Global Risks, Challenges & Decisions. Copenhagen: University of Copenhagen.
- Richardson, R. & Loomis, J. B., 2004: Adaptive recreation planning and climate change: a contingent visitation approach. *Ecological Economics*, 50, 83-99.
- Richardson, R. B. & Loomis, J. B., 2005: Effects of Climate Change on Tourism Demand and Benefits in Alpine Areas. In *Tourism, Recreation and Climate Change*, eds. Hall, C. M. & Higham, J., Clevedon: Channel View Publications.
- Riebsame, W. E., 1985: Research in Climate-Society Interaction. In *Scope 27 Climate Impact Assessment*. <http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope27/chapter03.html> (Consulté le 07.02.2011 Access 1985).
- Ritter, C., 1836: *Géographie générale comparée*. Paris: Buret et Delar (Traduction française).
- RMS. 2010: Faits et chiffres 2010. Berne: Remontées Mécaniques Suisses.
- Roth, U., 2007: De bonnes perspectives pour l'industrie suisse de l'électrotechnique, de la mécanique de précision et de l'horlogerie. *La vie économique*, 10, 39-43.
- Russel, R. & Faulkner, B., 2004: Entrepreneurship, chaos and the tourism area lifecycle. *Annals of Tourism Research*, 31, 556-559.
- Rutty, M. & Scott, D., 2010: Will the Mediterranean Become Too Hot for Tourism? A Reassessment. *Tourism and Hospitality Planning & Development*, 7, 267-281.
- Schaer, C., Vidale, P. L., Luthi, D., Frei, C., Haberli, C., Liniger, M. A. & Appenzeller, C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, 332-336.
- Scherrer, S. C. & Appenzeller, C., 2006: Swiss Alpine snow pack variability: major patterns and links to local climate and large-scale flow. *Climate Research*, 32, 187-199.

- Scherrer, S. C., Appenzeller, C. & Laternser, M., 2004: Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large-scale climate variability. *Geophysical Research Letters*, 31, doi:10.1029/2004GL020255, L13215.
- Scherrer, S. C., Frei, C. & Croci-Maspoli, M., 2011: *Evolution du climat en Suisse*. Zürich: MeteoSuisse (Poster).
- Schmidli, J. & Frei, C., 2005: Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology*, 25, doi:10.1002/joc.1179, 753-771.
- Schneider, N. & Eugster, W., 2007: Climatic impacts of historical wetland drainage in Switzerland. *Climatic Change*, 80, doi:DOI 10.1007/s10584-006-9120-8, 301-321.
- Schoenenberger, R., 1973: Kapazitaetsgrenzen alpiner Skigebiete. Eine Fremdenverkehrsgeographische Studie., Zurich: Universität von Zürich.
- Schoner, W., Auer, I. & Bohm, R., 2009: Long term trend of snow depth at Sonnblick (Austrian Alps) and its relation to climate change. *Hydrological Processes*, 23, doi:10.1002/hyp.7209, 1052-1063.
- Scott, D., 2006: US ski industry adaptation to climate change. Hard, soft and policy strategy. In *Tourism & Global Environmental Change. Ecological, social, economic and political interrelationships*, eds. Goessling, S. & Hall, C. M., Abingdon: Routledge.
- Scott, D. & Becken, S., 2010: Adapting to climate change and climate policy: progress, problems and potentials. *Journal of Sustainable Tourism*, 18, doi:10.1080/09669581003668540, 283-295.
- Scott, D. & Dawson, J., 2007: Climate change vulnerability of the US Northeast ski industry. In *Developments in Tourism Climatology*, eds. Matzarakis, A., de Freitas, C. R. & Scott, D., Freiburg, pp. 183-190.
- Scott, D., Goessling, S. & de Freitas, C. R., 2007a: Climate preferences for tourism: An exploratory Tri-Nation comparison. In *Developments in Tourism Climatology*, eds. Matzarakis, A., de Freitas, C. R. & Scott, D., Freiburg, pp. 18-23.
- Scott, D., Goessling, S. & de Freitas, C. R., 2008: Preferred climates for tourism: case studies from Canada, New Zealand and Sweden. *Climate Research*, 38, doi:10.3354/cr00774, 61-73.
- Scott, D., Jones, B. & Konopek, J., 2007b: Implications of climate and environmental change for nature-based tourism in the Canadian Rocky Mountains: A case study of Waterton Lakes National Park. *Tourism Management*, 28, 570-579.
- Scott, D., Jones, B., Lemieux, C., McBoyle, G., Mills, B., Svenson, S. & Wall, G., 2007c: Vulnerability of winter recreation to the climate change - A Case Study Of The Lakelands Tourism Region (Southern Ontario, Canada). In *Climate Change and Tourism Assessment and Coping Strategies*, eds. Amelung, B., Blazejczyk, K. & Matzarakis, A., Maastricht - Warsaw - Freiburg.
- Scott, D. & McBoyle, G., 2007: Climate change adaptation in the ski industry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, doi:10.1007/s11027-006-9071-4, 1411-1431.

- Scott, D., McBoyle, G. & Mills, B., 2003: Climate change and the skiing industry in southern Ontario (Canada): exploring the importance of snowmaking as a technical adaptation. *Climate Research*, 23, 171-181.
- Scott, D., McBoyle, G. & Minogue, A., 2007d: Climate change and Quebec's ski industry. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 17, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.05.004, 181-190.
- Scott, D., McBoyle, G., Minogue, A. & Mills, B., 2006: Climate Change and the Sustainability of Ski-based Tourism in Eastern North America: A Reassessment. *Journal of Sustainable Tourism*, 14, 376-398.
- Scott, D., McBoyle, G. & Schwartzenruber, M., 2004: Climate change and the distribution of climatic resources for tourism in North America. *Climate Research*, 27, 105-117.
- Scott, D., Peeters, P. & Goessling, S., 2010: Can tourism deliver its aspirational greenhouse gas emission reduction targets? *Journal of Sustainable Tourism*, 18, doi:10.1080/09669581003653542, 393-408.
- SECO. 2010: Stratégie de croissance pour la place touristique suisse: rapport du Conseil fédéral du 18 juin 2010 en réponse au postulat Darbellay (08.3969) du 19 décembre 2008. Berne: Conseil fédéral suisse.
- Seneviratne, S. I., Luthi, D., Litschi, M. & Schaer, C., 2006: Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 443, 205-209.
- Serquet, G., Soumis: Critères d'évaluation de la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables en lien avec le changement climatique.
- Serquet, G., Marty, C., Dulex, J.-P. & Rebetez, M., 2011: Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 38, doi:10.1029/2011GL046976, L07703.
- Serquet, G., Marty, C. & Rebetez, M., Submitted: Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snowfall/precipitation-day ratio.
- Serquet, G. & Rebetez, M., 2011: Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change. *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-010-0012-6.
- Sessa, A., 1988: The science of systems for tourism development. *Annals of Tourism Research*, 15, 219-235.
- Sorre, M., 1943: *Les fondements biologiques à la géographie humaine*. Paris: Armand Colin.
- Steiger, R., 2007: Snowmaking - A suitable adaptation strategy? Examples from Tyrol/Austria. In *Developments in Tourism Climatology*, eds. Matzarakis, A., de Freitas, C. R. & Scott, D., Freiburg, pp. 178-182.
- Steiger, R., 2010: Climate change impact assessment in Winter tourism. In *Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology*, eds. Matzarakis, A., Mayer, H. & Chmielweski, F.-M.,

- Freiburg: Berichte des Meteorologischen Instituts des Albert-Ludwigs-Universitaet Freiburg, 410-415.
- Steiger, R. & Mayer, M., 2008: Snowmaking and Climate Change Future Options for Snow Production in Tyrolean Ski Resorts. *Mountain Research and Development*, 28, doi:10.1659/mrd.0978, 292-298.
- Stock, M., Dehoorne, O., Duhamel, P., Gay, J.-C., Knafou, R., Lazzaroti, O., Sacareau, I. & Violier, P., 2003: *Le tourisme. Acteurs, lieux et enjeux*. Paris: Belin (Géographie).
- Stott, P. A., Stone, D. A. & Allen, M. R., 2004: Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432, 610-614.
- STV-FST. 2008: Swiss Tourism in Figures. Bern: STV-FST.
- STV-FST. 2010: Le tourisme suisse en chiffres. Berne: STV-FST.
- Takeuchi, Y., Endo, Y. & Murakami, S., 2008: High correlation between winter precipitation and air temperature in heavy-snowfall areas in Japan. In *Annals of Glaciology, Vol 49, 2008*, éd. Schneebeli, M., Cambridge: Int Glaciological Soc (Annals of Glaciology), pp. 7-10.
- Teich, M., Lardelli, C., Bebi, P., Gallati, D., Kytzia, S., Pohl, M., Pütz, M. & Rixen, C., 2007: *Klimawandel und Wintertourismus: Oekonomische und ökologische Auswirkungen von technischer Beschneigung*. Birmensdorf: [published online 2007] Available from World Wide Web ><http://www.wsl.ch/publikationen/pdf/8408.pdf>< Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- Toegelhofer, C., Eigner, F. & Pretenthaler, F., 2011: Impacts of snow conditions on tourism demand in Austrian ski areas. *Climate Research*, 46, doi:doi: 10.3354/cr00939, 1-14.
- UNWTO & UNEP. 2008: Climate Change and Tourism. Responding to Global Challenges. Madrid: UNWTO.
- Vidale de la Blache, P., 1903: *Tableau géographique de la France*. Paris: Armand Colin.
- Vidale de la Blache, P., 1922: *Principes de géographie humaine*. Paris: Armand Colin.
- Viers, G. & Vigneau, J.-P., 1990: *Eléments de climatologie*. Paris: Nathan (Fac Géographie).
- Viner, D., 2006: Tourism and its interaction with Climate Change. *Journal of Sustainable Tourism*, 14, 317-322.
- Waldrop, M., 1992: *Complexity. The emerging science and the edge of order and chaos*. London: Simon and Schuster.
- Wanner, H. & Speck, H., 1975: Zum Problem der Schneesicherheit im Bergland zwischen Sense und Gürbe. *Informationen und Beiträge zur Klimaforschung*, 14, 16-35.
- WEF. 2007: The Travel & Tourism Competitiveness Report 2007. Furthering the Process of Economic Development Geneva: World Economic Forum.

- WEF. 2008: The Travel & Tourism Competitiveness Report 2008. Balancing Economic Development and Environmental Sustainability. Geneva: World Economic Forum.
- WEF. 2009: The Travel & Tourism Competitiveness Report 2009. Managing in a Time of Turbulence. Geneva: World Economic Forum.
- WEF. 2011: The Travel & Tourism Competitiveness Report 2011. Beyond the Downturn. Geneva: World Economic Forum.
- Weiermair, K., 1997: Der Strukturwandel im alpinen Tourismus und daraus resultierende Anpassungsprobleme der Tourismusunternehmen. *Revue de tourisme / The tourist Review / Zeitschrift für Fremdenverkehr*, 3, 38-47.
- Wielke, L. M., Haimberger, L. & Hantel, M., 2004: Snow cover duration in Switzerland compared to Austria. *Meteorologische Zeitschrift*, 13, doi:10.1127/0941-2948/2004/0013-0013, 13-17.
- Williams, G. P., 1997: *Chaos Theory Tamed*. London: Taylor & Francis.
- Witmer, U., 1984: *Eine Methode zur flächendeckenden Kartierung von Schneehöhen unter Berücksichtigung von reliefbedingten Einflüssen*. Bern: Geographica Bernensia.
- Witmer, U., 1986: *Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz*. Bern: Geographica Bernensia.
- Xu, C. C., Chen, Y. N., Li, W. H., Chen, Y. P. & Ge, H. T., 2008: Potential impact of climate change on snow cover area in the Tarim River basin. *Environmental Geology*, 53, doi:10.1007/s00254-007-0755-1, 1465-1474.
- Yu, G., Schwartz, Z. & Walsch, J. E., 2009: A weather-resolving index for assessing the impact of climate change on tourism related climate resources. *Climatic Change*, 95, doi:10.1007/s10584-009-9565-7, 551-573.
- Zahra, A. & Ryan, C., 2007: From chaos to cohesion - Complexity in tourism structures: An analysis of New Zealand's regional tourism organizations. *Tourism Management*, 28, 854-862

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	5
RÉSUMÉ	7
SOMMAIRE	9
1. INTRODUCTION	13
2. OBJETS D'ÉTUDE ET PROBLÉMATIQUE	19
2.1. DE LA DICHOTOMIE NATURE / SOCIÉTÉ À L'ÉTUDE DES RELATIONS ENTRE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TOURISME	21
2.2. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE COMME PREMIER OBJET D'ÉTUDE	26
2.2.1. <i>Une définition du climat</i>	26
2.2.2. <i>Le changement climatique</i>	28
2.3. LE TOURISME DE MONTAGNE COMME SECOND OBJET D'ÉTUDE	29
2.3.1. <i>Esquisse d'une définition du tourisme</i>	29
2.3.2. <i>Une définition de la montagne</i>	32
2.4. L'APPORT DE L'INTER- ET TRANSDISCIPLINARITÉ	34
2.4.1. <i>L'interdisciplinarité dans l'étude du changement climatique et du tourisme</i>	34
2.4.2. <i>La climatologie touristique : une approche interdisciplinaire à l'interface des sciences naturelles et humaines</i>	35
2.5. LES QUESTIONNEMENTS ACTUELS CONCERNANT LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TOURISME DE MONTAGNE	38
2.5.1. <i>Bref état des lieux des connaissances actuelles concernant le changement climatique en Suisse</i>	38
2.5.2. <i>Connaissances actuelles concernant les conséquences du changement climatique sur le tourisme</i>	47
2.6. PROBLÉMATIQUE	58
2.7. QUESTIONS DE RECHERCHE ET OBJECTIFS	59

2.7.1.	<i>Questions de départ et de recherche</i>	59
2.7.2.	<i>Objectifs de recherche</i>	59
2.8.	MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	60
2.8.1.	<i>Méthodes utilisées</i>	61
2.8.2.	<i>Choix et sources des variables météorologiques</i>	62
2.8.3.	<i>Choix et source des variables touristiques</i>	64
2.8.4.	<i>Une approche par les seuils</i>	66
3.	QUELQUES NOTIONS THÉORIQUES	67
3.1.	SYSTÈMES, THÉORIES DE LA COMPLEXITÉ ET DU CHAOS	69
3.1.1.	<i>Représenter l'univers organisé par des systèmes</i>	69
3.1.2.	<i>L'apport de la théorie de la complexité</i>	72
3.1.3.	<i>La théorie du chaos pour comprendre le fonctionnement de certains systèmes</i>	74
3.2.	SYSTÈMES CLIMATIQUE ET TOURISTIQUE : ENTRE COMPLEXITÉ ET CHAOS	79
3.2.1.	<i>Le système climatique</i>	79
3.2.2.	<i>Le système touristique</i>	81
3.3.	INTERACTIONS ENTRE CLIMAT ET TOURISME	86
3.3.1.	<i>Climat et société</i>	86
3.3.2.	<i>Le climat comme ressource pour le tourisme</i>	87
4.	IMPACT DE L'ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS NEIGEUSES SUR LA PRATIQUE DES ACTIVITÉS TOURISTIQUES HIVERNALES	91
4.1.	INTRODUCTION DU CHAPITRE	93
4.2.	ARTICLE 1 : SEASONAL TRENDS AND TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE SNOWFALL/PRECIPITATION-DAY RATIO IN SWITZERLAND	95
4.2.1.	<i>Abstract</i>	95
4.2.2.	<i>Introduction</i>	96
4.2.3.	<i>Data and methods</i>	97
4.2.4.	<i>Results</i>	99
4.2.5.	<i>Discussion</i>	102
4.2.6.	<i>Conclusions</i>	103
4.2.7.	<i>Acknowledgements</i>	103
4.3.	ARTICLE 2 : MONTHLY TRENDS AND THE CORRESPONDING ALTITUDINAL SHIFT OF THE SNOWFALL / PRECIPITATION-DAY RATIO	105
4.3.1.	<i>Abstract</i>	105

4.3.2.	<i>Introduction</i>	106
4.3.3.	<i>Data and methods</i>	107
4.3.4.	<i>Results</i>	108
4.3.5.	<i>Discussion</i>	112
4.3.6.	<i>Conclusions</i>	113
4.3.7.	<i>Acknowledgements</i>	114
4.4.	CONCLUSIONS DU CHAPITRE	115
5.	RÉFLEXION AUTOUR DES CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ DE L'ENNEIGEMENT POUR LA PRATIQUE DU SKI ALPIN	117
5.1.	INTRODUCTION DU CHAPITRE	119
5.2.	ARTICLE 3 : CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ DE L'ENNEIGEMENT DES DOMAINES SKIABLES EN LIEN AVEC LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	121
5.2.1.	<i>Résumé</i>	121
5.2.2.	<i>D'une définition de la viabilité des domaines skiables à l'évaluation de la fiabilité de l'enneigement</i>	122
5.2.3.	<i>Facteurs influençant l'enneigement des pistes de ski alpin</i>	123
5.2.4.	<i>Pour une redéfinition des méthodes d'évaluation de la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables</i>	130
5.2.5.	<i>Conclusions et perspectives</i>	131
5.2.6.	<i>Remerciements</i>	132
5.3.	CONCLUSIONS DU CHAPITRE	132
6.	IMPACT DE L'AUGMENTATION DES JOURNÉES TRÈS CHAUDES SUR LA FRÉQUENTATION TOURISTIQUE HÔTELIÈRE EN MONTAGNE	135
6.1.	INTRODUCTION DU CHAPITRE	137
6.2.	ARTICLE 4 : RELATIONSHIP BETWEEN TOURISM DEMAND IN THE SWISS ALPS AND HOT SUMMER AIR TEMPERATURES ASSOCIATED WITH CLIMATE CHANGE	138
6.2.1.	<i>Abstract</i>	138
6.2.2.	<i>Introduction</i>	139
6.2.3.	<i>Data and methods</i>	140
6.2.4.	<i>Results</i>	143
6.2.5.	<i>Discussion</i>	148
6.2.6.	<i>Conclusions</i>	149
6.2.7.	<i>Acknowledgements</i>	150
6.3.	CONCLUSIONS DU CHAPITRE	150

7. CONCLUSIONS GÉNÉRALES	153
BIBLIOGRAPHIE	161
TABLE DES MATIÈRES	177
LISTE DES FIGURES	181
LISTE DES TABLES	185
ANNEXES	187
ANNEXE 1 : WINTER AND SPRING CHANGES IN SD/PD [%] FOR 1961-2008 AND 1979- 2008	189
ANNEXE 2 : GRILLE D'ENTRETIEN POUR LES RESPONSABLES DES REMONTÉES MÉCANIQUES	191
ANNEXE 3 : GRILLE D'ANALYSE CONCERNANT L'ENNEIGEMENT DES PISTES DE SKI	193

LISTE DES FIGURES

Figure 2.4.1 : Etudes en changement climatique et tourisme	36
Figure 2.5.1 : Evolution passée du nombre de jours très chauds (Tmin > percentile 80) pour l'été (juin - juillet - août) de la station MétéoSuisse de Neuchâtel (adapté de Rebetez, 2004)	39
Figure 2.5.2 : Déviation relative [%] de la hauteur de neige moyenne hivernale (novembre à avril) par rapport à la moyenne à long terme. La ligne pointillée représente la moyenne mobile sur 11 ans et la ligne pleine la tendance à long terme. Les données (1932-1999) couvrent toutes les régions des Alpes suisses pour différentes altitudes (Latenser & Schneebeli, 2003).	41
Figure 2.5.3 : Schéma d'évolution des trois scénarios d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre passés et futures, ainsi que les changements de température projetés pour la Suisse (valeur moyenne sur une période de 30 ans (2070–2099) centrée en 2085). «CO ₂ eq» est une unité de référence qui permet d'exprimer les autres gaz à effet de serre (comme le CH ₄) en unités de CO ₂ (CH2011, 2011: 9).	43
Figure 2.5.4 : Projections futures des changements de température [°C] pour toutes les saisons (hiver : DJF = décembre-février, printemps : MAM = mars-mai, été : JJA = juin-août, automne : SON = septembre-novembre) et pour trois régions de Suisse (CHNE= Suisse nord-est, CHW = Suisse occidentale, CHS = Suisse méridionale) par rapport à la période de référence 1980 à 2009 et selon trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A2, A1B et RCP3PD) (CH2011, 2011: 33).	44
Figure 2.5.5 : Projections futures des changements de précipitations [%] pour toutes les saisons (hiver : DJF = décembre-février, printemps : MAM = mars-mai, été : JJA = juin-août, automne : SON = septembre-novembre) pour trois régions de Suisse (CHNE= Suisse nord-est, CHW = Suisse occidentale, CHS = Suisse méridionale) par rapport à la période de référence 1980 à 2009 et selon trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A2, A1B et RCP3PD) (CH2011, 2011: 37).	45

Figure 2.5.6 : Stratégies d'adaptation des stations de ski (adapté d'après Elsasser & Buerki, 2002)	50
Figure 2.5.7 : Part des pistes enneigées techniquement sur l'ensemble de la surface de pistes préparées en Suisse (RMS, 2010)	51
Figure 2.5.8 : Evolution des conditions climatiques favorables aux pratiques touristiques estivales en Europe et en Afrique du Nord (Perch-Nielsen et al., 2010). Pour chaque saison (printemps (mars - avril - mai), été (juin - juillet - août), automne (septembre - octobre - novembre)), la situation de référence actuelle (1961-1990, à gauche) des conditions climatiques favorables aux pratiques touristiques estivales (en orange et rouge) est comparée à celle de la fin du siècle (2071-2100, au milieu). La différence (à droite) montre les régions qui bénéficieront de meilleures conditions à la fin du 21 ^{ème} siècle (en bleu), ne subiront pas de modifications significatives (en blanc) ou verront leurs conditions se dégrader (en jaune ou orange).	53
Figure 2.5.9: Résultats pour les touristes français de l'importance des attributs pour des destinations touristiques (Dubois et al., 2009: 30)	55
Figure 2.5.10: Eléments du climat susceptibles de nuire le plus à la réussite du futur séjour pour les touristes français (3 réponses possibles) (Dubois et al., 2009: 34)	56
Figure 2.5.11 : Vers un renversement saisonnier de la polarité du tourisme? (Adapté de Bourdeau, 2009)	57
Figure 3.1.1 : Représentations des 18 interrelations possibles entre deux éléments d'un système (sur un même flux) (Le Moigne, 2006: 109)	70
Figure 3.1.2 : Représentation (par Camus et al., 2010: 260) de la forme canonique du système général de Le Moigne (1990)	71
Figure 3.1.3 : Modèle du cycle de vie appliqué au tourisme (d'après Butler, 1980). 1) phase d'exploration, 2) phase d'implication, 3) phase du développement, 4) phase de la consolidation, 5) phase de la stagnation.	73
Figure 3.1.4 : Représentation du cycle d'adaptation d'un écosystème (Holling & Gunderson, 2002: 34)	74
Figure 3.1.5 : Représentation de l'attracteur de Lorenz (Colonna, 2004)	77

Figure 3.1.6 : Evolution d'un système selon les principes du cycle de vie et de la théorie du chaos (Russel & Faulkner, 2004: 563)	78
Figure 3.2.1 : Contributions des activités humaines au changement climatique (IPCC, 2007a)	80
Figure 3.2.2 : Principaux éléments de la demande touristique (Clivaz, 2001: 100; adapté de Hunter & Green, 1995)	82
Figure 3.2.3 : Principaux éléments de l'offre touristique (Clivaz, 2001: 105)	82
Figure 3.2.4 : Modèle chaotique du tourisme de Mckercher (1999)	84
Figure 3.3.1 : Relations qui unissent les sociétés humaines aux climats actuels ou contraintes géoclimatiques (Hufty, 2001: 408)	86
Figure 4.1.1 : Carte des stations météorologiques utilisées	94
Figure 4.2.1 : Winter (December – January – February) mean ratio of snowfall vs precipitation days (SD/PD) by altitudinal categories from 1908 to 2008. Bold lines are unweighted moving averages with an 11-year window (with uncorrected 5-year edges using the available points). The lower panel shows changes in the number of available stations through time.	98
Figure 4.2.2 : Changes in wintertime SD/PD (a to d) and springtime SD/PD (e to h) during the two study periods [%] as a function of altitude [m asl] (a, b, e and f) and baseline seasonal temperature at the start of each study period (c, d, g and h).	100
Figure 4.3.1: Changes in monthly SD/PD [%] during the study period 1961-2008 as a function of monthly baseline temperature at the start of the study period	109
Figure 4.3.2: Changes in monthly SD/PD [%] during the study period 1961-2008 as a function of altitude [m asl]	110
Figure 5.2.1 : Moyenne des précipitations de quelques stations MétéoSuisse des montagnes suisses pour la période de référence 1961-1990. Les barres grises représentent la somme des précipitations [mm]; le trait noir, le nombre de jours de précipitations.	125
Figure 6.2.1: Location of Alpine resorts and meteorological stations	141

LISTE DES TABLES

Table 2.5.1 : Nombre de stations de ski suisses avec une fiabilité de l'enneigement pour l'année 2000 (Abegg, 1996; Buerki, 2000; Koenig & Abegg, 1997)	48
Table 2.5.2 : Sécurité d'enneigement dans les domaines skiables suisses (Abegg et al., 2007)	49
Table 2.5.3 : Résultats pour les touristes allemands de l'importance des attributs des destinations touristiques (d'après Hamilton & Lau, 2006: 241)	54
Table 2.5.4 : Importance des variables météorologiques pour différents environnements touristiques pour les touristes Canadiens, Néo-Zélandais et Suédois. « Temp » : température confortable, « Pluie » : absence de pluie, « Vent » : absence de fort vent, « Soleil » : présence de soleil. La moyenne donne l'importance relative de chaque variable (de 1 = pas important à 7 = extrêmement important) (d'après Scott et al., 2008: 68).	56
Table 3.3.1 : Différentes facettes du climat pour le tourisme, leur signification et leur impact (de Freitas, 2003: 49)	89
Table 4.2.1 : Changes in SD/PD [%] for selected station altitudes (a), for selected baseline temperatures [°C] (b) and changes in SD/PD [%] expected per 1 K temperature increase for selected baseline temperatures [°C] (c) for the winter and spring seasons during the intervals 1961-2008 and 1979-2008.	101
Table 4.3.1: Linear regression slopes [% year ⁻²] of the evolution in snowfall/precipitation-day ratios from 1961 to 2008 at different altitude classes [m asl].	111
Table 4.3.2: Fitted snowfall/precipitation-day ratios [%] for 1961 and 2008 at different altitude classes.	111
Table 5.2.1 : Types de sol et besoins minimaux en neige damée [cm] et correspondance en neige fraîche à -3 °C	127
Table 6.2.1: Summary of the correlations computed between meteorological parameters and overnight stays	142

Table 6.2.2:	Pearson's correlation coefficients for the summer months' temperature. Significant ($p < 0.1$) values according to Fischer's test are orange (positive) or blue (negative) <i>BE</i> Bern, <i>GR</i> Graubunden, <i>VD</i> Vaud, <i>VS</i> Valais.	144
Table 6.2.3 :	Pearson's correlation coefficients for the summer months' sunshine duration. Significant ($p < 0.1$) values according to Fischer's test are orange (positive) or blue (negative) <i>BE</i> Bern, <i>GR</i> Graubunden, <i>VD</i> Vaud, <i>VS</i> Valais.	145
Table 6.2.4 :	Average length of stay (number of days) and distance (km and hours) from the nearest main city	146
Table 6.2.5 :	Multiple regression analysis with Anova for the relationship between temperature and overnight stays (Table 6.2.2, right column), distance in space and time from the nearest city and mean length of stay in June - July - August (JJA)	147

ANNEXES

ANNEXE 1 : WINTER AND SPRING CHANGES IN SD/PD [%] FOR 1961-2008 AND 1979- 2008

Stations	North/ South side of the Alps	Altitude [m asl]	Winter evolution of SD/PD [%] for 1961-2008	Winter evolution of SD/PD [%] for 1979-2008	Spring evolution of SD/PD [%] for 1961-2008	Spring evolution of SD/PD [%] for 1979-2008
Magadino	South	203		-80.27 *		
Bellinzona	South	225	-50.65 *	-47.40		
Lugano	South	273	-10.57	-34.16		
Basel	North	316	-36.48	-43.65		
Aigle	North	381		-22.93		
Locarno	South	383	-14.31	-31.82		
Montreux-Clarens	North	405	-34.32	-11.78		
Delemont	North	415	-44.49 *	-53.83 *		
Geneva	North	420	-58.17 **	-56.52 *		
Wynau	North	422		-58.20 *		
Hallau	North	432	-33.63	-39.55		
Biel	North	433	-39.17	-67.33 **		
Guettingen	North	440		-18.58		
Altdorf	North	449	-40.29 *	-41.18		
Luzern	North	456	-35.55	-33.29		
Vaduz	North	460		-21.43		
Sion	North	482	-65.01 ***	-66.66 **		
Koppigen	North	483	-51.86 **	-55.42 *		
Neuchatel	North	485	-24.20	-43.70		
Payerne	North	490		-43.07		
Bad Ragaz	North	496	-39.87 **	-24.87		
Bern	North	553	-57.02 **	-52.74		
Chur	North	556	-52.50 ***	-50.12 *		
Zurich	North	556	-41.24 *	-32.75		
Meiringen	North	595	-45.21 **	-43.59 *		
Ebnat-Kappel	North	623		-35.22 *		
Fribourg / Posieux	North	634		-28.14		
Visp	North	660	-41.35 **	-54.18 **		
Salen - Reutenen	North	702	-33.57 *	-35.93 *		
Langnau i. E.	North	755	-40.77 **	-26.44		
St Gallen	North	779	-16.84	-17.64		
Brusio	South	800	-26.84	-36.47		
Einsiedeln	North	910	-22.24 *	-16.07	-20.81	-24.71
Elm	North	965	-8.16	-3.23	-22.92	-30.46 *
Chateau d'Oex	North	985	-33.79 ***	-25.09	-37.49 *	-39.98 *
Piotta	South	1007		-22.07 *		-64.50 *
La Chaux-de-Fonds	North	1018	-15.47	-17.18	-21.20	-53.94 *
Engelberg	North	1035	-35.62 ***	-23.72	-32.99 **	-39.53 **
Gstaad	North	1045		-17.50		-35.36
Chaumont	North	1073	-27.44 **	-34.33 *	-49.78 ***	-61.91 ***
Poschiavo-Robbia	South	1078	-17.92 *	-23.72 *	-44.65	-70.06 **
Oberiberg	North	1080	-14.60	-12.43	-29.14 **	-32.84 **
Goeschenen	North	1100	-16.19 **	-12.18	-19.71	-33.74 **
Les Diablerets	North	1162		-15.33		-33.97
Disentis	North	1190	-6.79	-7.30	-11.55	-17.00
Klosters Kraftwerk	North	1200		-4.74		-36.44 ***
Klosters Bahnhof	North	1200	-14.55	-10.00	-29.26 *	-20.48
Vals	North	1260		-6.93		-37.70 ***
Scuol	South	1298	-8.96	-13.80	-16.29	-48.40 **
Leysin	North	1305	-23.50 **	-4.62	-22.72 *	-14.34
Braunwald	North	1310	-13.13 **	-9.06	-16.23 *	-26.32 **
Adelboden	North	1320	-18.18 *	-5.61	-35.23 ***	-33.53 **
Ulrichen	North	1345		-7.80		-12.45
Schwaegalp	North	1350		-11.31		-22.36 *
Morgins	North	1380		-11.65		-32.00 *
Sta Maria	South	1390	-7.01	-0.97	1.17	-24.88
Sedrun	North	1420		-2.72		-11.39
Andermatt	North	1442	-9.59 *	-9.66	-20.50 *	-22.99
BoscoGurin	South	1505	-5.74	-0.04	-22.55	-27.56
Montana	North	1508	-21.06 ***	-22.12 **	-45.53 ***	-48.76 **
Graechen	North	1550		-12.68		-32.86 *
Davos	North	1590	-7.07 **	-5.36	-5.23	-11.48
Malbun	North	1610		-7.61		-18.63 *
Zermatt	North	1638	-5.01	-11.60 **	-18.37	-17.81
San Bernardino	South	1639		-5.57		-9.15
Samedan	South	1709		-3.99		-9.40
Punt la Drossa	South	1710		-7.29 *		-14.65
Zervreila	North	1735		-4.10		-16.03 *
Bivio	North	1770	-0.24	-0.98	9.81	6.27
Segl Maria	South	1798	-9.09 *	-7.69	7.19	-18.32
Arosa	North	1840	-4.63 **	-2.93	-4.53	-8.50
Buffalora	South	1970	-17.10 ***	-14.66 **	-38.79 ***	-34.41 **
Grimsel	North	1980	-2.25	-2.49	-3.20	-2.56
Passo del Bernina	South	2307		-10.38 *		-8.36
Saentis	North	2502	-4.89 ***	-4.32 *	-9.47 ***	-12.11 ***
Weissfluhjoch	North	2690	-4.58 **	-4.97 **	-8.08 ***	-3.85

* p < 0.05 ** p < 0.01 *** p < 0.001

ANNEXE 2 : GRILLE D'ENTRETIEN POUR LES RESPONSABLES DES REMONTÉES MÉCANIQUES

NOMBRE DE JOURS D'OUVERTURE ET RENTABILITÉ

A partir de combien de pistes skiabiles le domaine est-il ouvert? La(es)quelle(s)?

Comment le domaine skiable évolue-t-il entre le début et la fin de la saison? Y a-t-il des endroits plus ou moins sensibles?

Qu'est-ce qui détermine le début et la fin de saison (météo ou pas)?

Quel est le nombre de jours d'ouverture (pour ces 10-20 dernières années)? Avez-vous des statistiques?

Qu'est-ce qu'une saison rentable, selon vous?

Pour que la saison soit rentable, combien faut-il qu'il y ait de jours ouverts au minimum? En week-end et par conditions météo favorables? A quelle période?

Y a-t-il eu des années non rentables depuis que les remontées mécaniques ont été installées?

Avez-vous des statistiques de l'évolution de la fréquentation quotidienne et saisonnière? Et le chiffre d'affaires?

ENNEIGEMENT ARTIFICIEL

Depuis quelle année pratiquez-vous l'enneigement artificiel?

Quels gains cela vous a-t-il apportés?

Quels désavantages (coûts, entretien, impact sur le paysage en été, etc.)?

Y a-t-il de nouveaux projets d'enneigement artificiel prévus? Si oui, lesquels?

Quelles sont les conditions météorologiques minimales qui vous permettent de fabriquer de la neige?

Température :

Humidité :

Vent :

Autres?

Où puisez-vous l'eau?

Cela pose-t-il des problèmes d'approvisionnement, conflit avec les autres usages?

Combien d'heures faut-il pour enneiger totalement une piste de manière artificielle?

Quel est le coût au m²?

Total? Rentabilisé?

Remarques

ANNEXE 3 : GRILLE D'ANALYSE CONCERNANT L'ENNEIGEMENT DES PISTES DE SKI

1. Quelles sont les conditions minimales requises pour que vous puissiez ouvrir la station? Est-ce que ce sont les pistes qui sont le plus facilement enneigées?
2. Quelles sont les pistes les plus problématiques en cas de manque de neige (= les endroits sensibles de la station) ?
3. Y a-t-il d'autres pistes qui présentent des spécificités particulières qu'il serait utile de mentionner ?

Nombre de pistes	
Nom de la piste	
Altitude la plus basse	
Altitude la plus haute	
Orientation(s) ~ %	
Type de sol (pâturage, pierrier, etc.)	
Endroits sensibles (manque de neige fréquent). Marquer sur le plan (lettre et chiffre).	
Raisons (orientation, sol, utilisation plus marquée de certains endroits par les skieurs, etc) pour chaque endroit.	
Endroits les plus enneigés. Marquer sur le plan (lettre et chiffre).	
Raisons (orientation, sol, etc) pour chaque endroit.	
Quantité de neige minimale tassée (cm) pour chaque piste	
Quantité de neige minimale tombée (cm) pour chaque piste	
Canons à neige	
Nb de jours d'utilisation en	
Coûts par jour d'exploitation	
Coûts par saison	
Fréquentation (nb skieurs en moyenne)	
Remarques	