

Changements climatiques : quel avenir pour les destinations touristiques des Alpes et du Jura vaudois?

Rapport de travail 2010

Martine Rebetez et Gaëlle Serquet

WSL – CP 96

1015 Lausanne

martine.rebetez@wsl.ch

gaelle.serquet@wsl.ch



WSL, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage

Document prévu pour impression recto verso

30 novembre 2010

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	5
1.1. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	5
1.2. DESTINATIONS TOURISTIQUES CONCERNÉES	6
1.3. FINANCEMENT	6
1.4. DURÉE DE L'ÉTUDE	6
1.5. RÉSULTATS ATTENDUS	6
1.6. MÉTHODOLOGIE	7
2. CLIMATOLOGIE RÉGIONALE	9
2.1. INTRODUCTION	9
2.2. PRÉCIPITATIONS	9
2.2.1. <i>Alpes vaudoises</i>	9
2.2.2. <i>Jura vaudois</i>	12
2.2.3. <i>Comparaison des Alpes et du Jura vaudois avec les autres régions de montagnes suisses</i>	14
2.3. TEMPÉRATURE	17
2.4. SYNTHÈSE PROVISOIRE ET CONSÉQUENCES POUR LE TOURISME	18
3. ÉVOLUTION PASSÉE ET FUTURE DES VARIABLES CLIMATIQUES POUR LES ALPES ET LE JURA VAUDOIS	19
3.1. TEMPÉRATURE	19
3.1.1. <i>Hiver</i>	19
3.1.2. <i>Été</i>	21
3.1.3. <i>Scénarios futurs</i>	24
3.2. PRÉCIPITATIONS	25
3.3. ENNEIGEMENT ET PRÉCIPITATIONS NEIGEUSES	28
3.4. SYNTHÈSE PROVISOIRE	31
4. PERSPECTIVES POUR L'HIVER	33
4.1. SÉCURITÉ DE L'ENNEIGEMENT	33
4.2. FACTEURS INFLUENÇANT L'ENNEIGEMENT	34
4.2.1. <i>Précipitations hivernales régionales</i>	35
4.2.2. <i>Qualité de la neige</i>	35
4.2.3. <i>Vent</i>	36
4.2.4. <i>Altitude</i>	36

4.2.5. <i>Rayonnement solaire et orientation</i>	36
4.2.6. <i>Type de sol</i>	37
4.2.7. <i>Déclivité et largeur de la pente</i>	42
4.2.8. <i>Fréquentation</i>	42
4.2.9. <i>Préparation des pistes</i>	42
4.2.10. <i>Enneigement artificiel</i>	43
4.3. INFLUENCE DES AMÉNAGEMENTS LIÉS AUX ACTIVITÉS TOURISTIQUES HIVERNALES SUR LES AUTRES SAISONS	46
4.4. MESURES D'ADAPTATION	46
4.5. SYNTHÈSE PROVISOIRE	47
5. PERSPECTIVES POUR L'ÉTÉ	49
5.1. RÉORIENTATION DES DESTINATIONS DES TOURISTES LIÉE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE	49
5.2. IMPACT DE L'AUGMENTATION DES TEMPÉRATURES ET DES PÉRIODES CANICULAIRES SUR LE TOURISME DES ALPES ET DU JURA VAUDOIS	50
5.3. IMPACT DU RETRAIT DES GLACIERS ET DE LA FONTE DU PERGÉLISOL SUR LE TOURISME DES ALPES VAUDOISES	50
5.4. SYNTHÈSE PROVISOIRE	52
6. SYNTHÈSE GÉNÉRALE PROVISOIRE (2010)	53
7. SUITE DE L'ÉTUDE	55
8. BIBLIOGRAPHIE	57
LISTE DES FIGURES	61
LISTE DES TABLES	63

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement tous les partenaires et prestataires qui ont eu l'amabilité de collaborer et de fournir des données dans le cadre de cette étude.

1. INTRODUCTION

Ce rapport de travail a pour but de faire part à l'OTV ainsi qu'aux différents partenaires de l'avancement et des premiers résultats de l'étude « Changements climatiques : quel avenir pour les destinations touristiques des Alpes et du Jura vaudois? ». Il fait suite à un premier rapport réalisé fin 2009 et publié début 2010.

1.1. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'étude « *Changements climatiques : quel avenir pour les destinations touristiques des Alpes et du Jura vaudois?* » vise les objectifs suivants :

1. Permettre à l'OTV ainsi qu'aux milieux touristiques des Alpes et du Jura vaudois de mieux connaître et prévoir les conséquences des changements climatiques sur le tourisme de ces régions.
2. Proposer des orientations permettant aux professionnels du tourisme des Alpes et du Jura vaudois de mettre en place des mesures d'atténuation et d'adaptation concrètes à court, moyen et long terme.

1.2. DESTINATIONS TOURISTIQUES CONCERNÉES

Destinations VD	Altitude min	Altitude max
Château-d'Oex	958	1630
Rougemont	992	2151
Les Mosses-Lécherette	1450	1870
Les Diablerets	1158	3000
Villars-Gryon	1200	1800
Leysin	1250	2000
Saint-Cergue	1044	1677
Ste-Croix/Les Rasses	1200	1583
Vallée de Joux	1000	1679
Vallorbe	610	1480

1.3. FINANCEMENT

Cette étude est cofinancée par le WSL – SLF, par le Canton de Vaud (SELT) et par les associations régionales de développement économique concernées.

1.4. DURÉE DE L'ÉTUDE

Cette étude a débuté en juin 2009 et se terminera au plus tard fin mai 2012. L'essentiel de la recherche se fait entre l'été 2009 et l'été 2011.

1.5. RÉSULTATS ATTENDUS

1. Liste des événements climatiques extrêmes survenus ces dernières années.
2. Synthèse des résultats des études et rapports existants sur l'évolution du tourisme en fonction des changements climatiques.
3. Analyse de l'impact du changement climatique sur les destinations des Alpes et du Jura vaudois en fonction de variables touristiques avec indicateurs existants sélectionnés et fournis par les professionnels du tourisme.

4. Sur la base des résultats, identification des opportunités et des menaces liées au changement climatique.
5. Propositions d'orientations (scénarios) pour le développement de l'offre ou du type de marketing.

1.6. MÉTHODOLOGIE

Une recherche documentaire a été effectuée afin de synthétiser les connaissances actuelles concernant l'impact du changement climatique sur le tourisme. Des données météorologiques provenant de MeteoSuisse et du WSL-SLF ainsi que des données touristiques (fréquentation hôtelière) provenant de l'Office fédéral de la statistique ont été analysées. D'autres données de fréquentation obtenues auprès de différents prestataires touristiques (remontées mécaniques notamment) sont en cours d'analyse. La liste des catastrophes naturelles survenues dans le Canton de Vaud, obtenue auprès de la section des dangers naturels du Canton de Vaud, est également en cours d'étude.

Des entretiens semi-directifs auprès des responsables des offices du tourisme concernés ainsi qu'auprès des pisteurs, des responsables techniques, des responsables administratifs et/ou des directeurs des remontées mécaniques et/ou des centres nordiques des Alpes et du Jura vaudois ont été menés. Au total, nous avons effectué des entretiens auprès de 34 personnes. De plus, nous avons contacté plus d'une trentaine de prestataires touristiques par téléphone afin d'obtenir des données de fréquentation. Dans de nombreux cas, nous n'avons cependant pas pu les obtenir. Trois raisons principales en sont la cause : données non disponibles ou refus de transmettre ces données faute de temps ou pour des raisons de confidentialité.

Nous avons aussi rencontré certaines limites lors de la collecte des données météorologiques. En effet, les stations de MétéoSuisse ne couvrent pas de manière homogène tout le territoire helvétique. Ainsi, pour les Alpes vaudoises, la station qui présente les données les plus complètes et les plus anciennes est celle de Château-d'Oex. Nous avons donc utilisé les données de cette station et, en fonction des variables et des années dont nous avons besoin, d'autres stations complémentaires (Col des Mosses, Gryon, Les Diablerets, Les Plans-sur-Bex ou Leysin). Pour le Jura vaudois, cela a été plus compliqué puisque les stations de Bullet / La Frétaz, L'Auberson, Les Bioux, Les Charbonnières, La Cure et la Dôle ne présentent, soit que des données pluviométriques, soit pas de séries complètes sur au moins 30 ans pour les variables dont nous avons besoin. Pour les températures notamment, nous avons dû recourir à celles de Chaumont qui se situe dans le Jura neuchâtelois.

En complément aux données des stations localisées sur le terrain d'étude proprement dit, nous avons également exploité, pour certaines recherches, les données des stations de MétéoSuisse et du WSL-SLF situées sur l'ensemble de la Suisse (dont notamment Adelboden, Davos, Jaun, Montana, Poschiavo / Robbia et Zermatt) à titre de comparaison.

2. CLIMATOLOGIE RÉGIONALE

2.1. INTRODUCTION

Le climat sous nos latitudes est fortement déterminé par le régime des précipitations et par l'ensoleillement. La température influence également le climat d'une région mais au niveau d'un pays comme la Suisse celle-ci varie essentiellement en fonction de l'altitude. Nous présentons ici une comparaison des précipitations pour quelques stations de MétéoSuisse représentantes des régions de montagnes suisses ainsi que les différences de températures en fonction de l'altitude. L'ensoleillement sera présenté dans un prochain rapport.¹

2.2. PRÉCIPITATIONS

Le régime des précipitations varie fortement d'une année à l'autre et tout au long d'une même année en Suisse. Les valeurs présentées dans les figures 2.2.1, respectivement 2.2.2 et 2.2.3 mettent en évidence les spécificités de quelques stations de MétéoSuisse des Alpes vaudoises, respectivement du Jura vaudois et d'autres régions de montagnes suisses.

Le premier facteur explicatif des différences de régime de précipitations en Suisse est la région. La topographie explique également des différences notamment entre des stations géographiquement proches, même s'il n'existe pas une relation linéaire forte avec l'altitude. 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 (Baeriswyl et al., 1997).

Le nombre de jours de précipitations est une variable intéressante car elle est moins sensible aux cas de précipitations fortes que les précipitations totales et elle représente souvent mieux la perception humaine de la fréquence des précipitations en lien avec les activités en plein air. Les figures 2.2.1, 2.2.2 et 2.2.3 présentent également cette variable. Il faut au minimum 1 mm de précipitations pour qu'une journée soit considérée comme un jour de précipitations.

2.2.1. Alpes vaudoises

A chaque saison, toutes les stations météorologiques de MétéoSuisse des Alpes vaudoises affichent un nombre équivalent de jours de précipitations. Les différences en quantité peuvent être en grande partie attribuées à l'altitude et à l'orientation. Dans le cas de la station du Col des Mosses, les valeurs

¹ Les données utilisées sont la moyenne des valeurs pour la période de référence 1961-1990.

particulièrement élevées de novembre et des mois d'hiver sont probablement dues au vent qui, en déplaçant la neige, en ajoute dans le pluviomètre. Les quantités de précipitations y sont ainsi probablement supérieures à la réalité. Pour cette raison, nous n'avons pas tenu compte des moyennes hivernales, automnales et annuelles de cette station dans la description des quantités de précipitations des Alpes vaudoises.

Au printemps (mars – avril – mai), il tombe en moyenne entre 316 et 404 mm de précipitations. En nombre de jours de précipitations, cela correspond à 38 à 40 jours sur 92 jours que dure la saison.

C'est durant les mois d'été (juin – juillet – août) que les précipitations sont les plus abondantes dans les Alpes vaudoises. Durant cette saison, il tombe en moyenne entre 395 et 491 mm. Par contre, cela correspond au nombre de jours du printemps soit 37 à 40 jours sur les 92 jours que compte la saison.

L'automne (septembre – octobre – novembre) est la saison qui a le moins de jours de précipitations soit entre 28 et 29 jours sur les 91 jours de la saison. La moyenne de la somme des précipitations est, quant à elle, comprise entre 301 et 359 mm.

En hiver (décembre – janvier – février), il tombe en moyenne entre 318 et 432 mm de précipitations répartis sur 34 jours environ.

Au total annuel, il tombe en moyenne entre 1366 et 1644 mm répartis sur environ 140 jours.

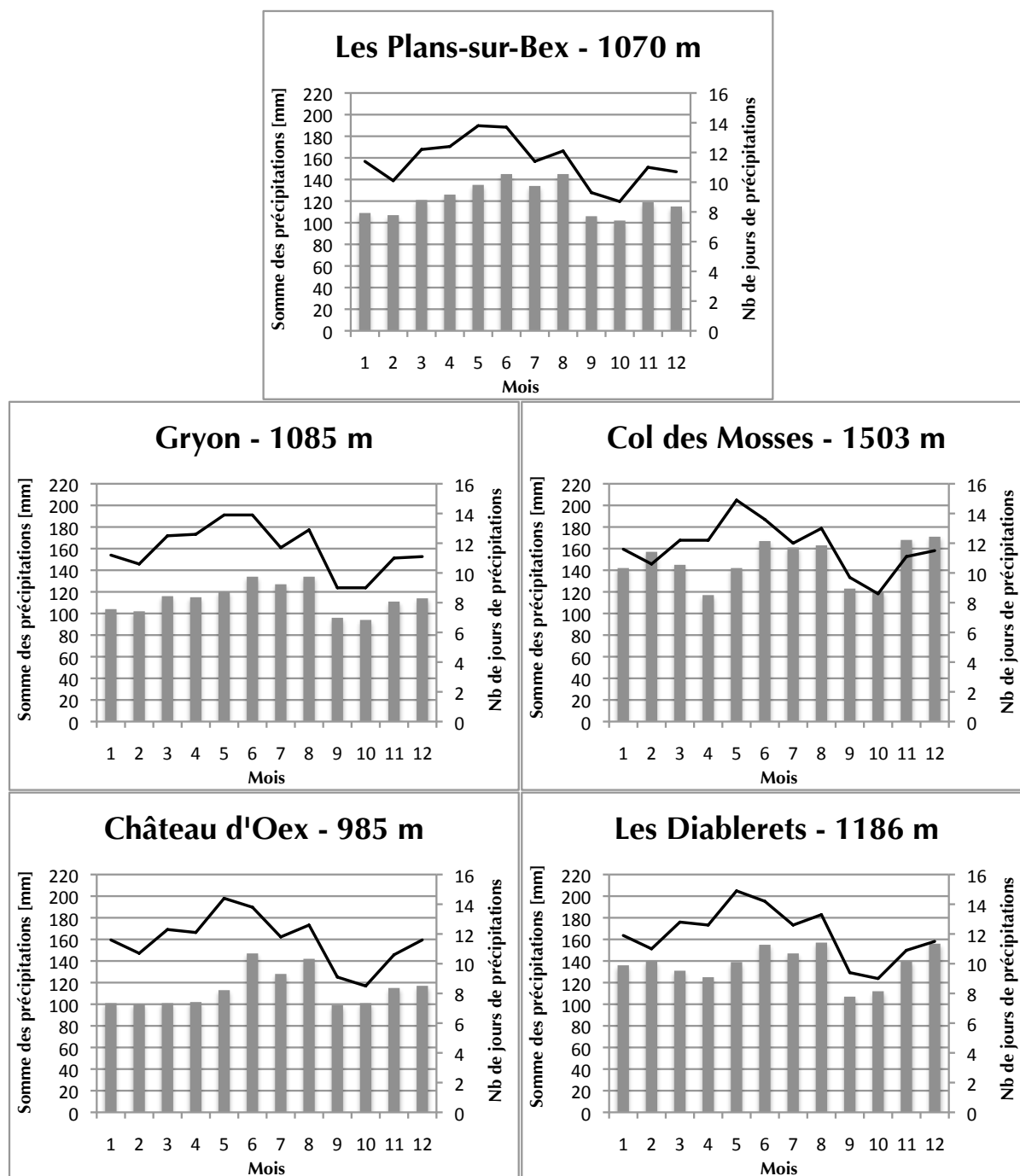


Figure 2.2.1 : Moyenne des précipitations de différentes stations MétéoSuisse des Alpes vaudoises pour la période de référence 1961-1990. Les barres grises représentent la somme des précipitations [mm] et le trait noir le nombre de jours de précipitations.

2.2.2. Jura vaudois

Les stations météorologiques de MétéoSuisse du Jura vaudois sont arrosées de manière assez homogène sauf à Bullet / La Frétaz et à la Dôle. La première, qui est station la plus au nord-est du Jura vaudois, présente des précipitations nettement moins abondantes que les cinq autres. Elle s'apparente ainsi plus aux stations du Jura neuchâtelois (p. ex. Chaumont) ou du Jura Bernois. Toutes les valeurs minimales présentées ci-dessous sont celles de Bullet / La Frétaz. La Dôle, quant à elle, présente une quantité de précipitations particulièrement élevée en hiver certainement lié au vent qui, en déplaçant la neige, en ajoute dans le pluviomètre. Les quantités de précipitations durant cette saison sont ainsi probablement supérieures à la réalité. Nous n'avons dès lors pas tenu compte des moyennes hivernales et annuelles de cette station dans la description des quantités de précipitations du Jura vaudois.

Le Jura vaudois reçoit au printemps (mars – avril – mai) entre 298 et 452 mm de précipitations. En nombre de jours, cette région est arrosée entre 38 et 45 jours sur 92. C'est la saison avec le plus grand nombre de jours de précipitations, le mois de mai étant le mois le plus arrosé avec des précipitations presque un jour sur deux.

En été (juin – juillet – août), il tombe entre 333 et 432 mm de précipitations répartis sur environ 34 à 38 jours.

L'automne (septembre – octobre – novembre) est la saison qui a le moins de jours de précipitations : entre 29 et 34 sur les 91 que compte la saison. Par contre, avec une moyenne comprise entre 317 et 470 mm, cette saison ressemble au printemps et à l'été en terme de quantité.

En hiver (décembre – janvier – février), il tombe entre 328 et 522 mm avec une moyenne à 452 mm. En nombre de jour, cela correspond à 35 à 41 jours de précipitations.

Durant toute l'année, il tombe entre 1274 et 1859 mm de précipitations sur le Jura vaudois. Sur les 365 jours d'une année, entre 136 et 158 jours reçoivent des précipitations.

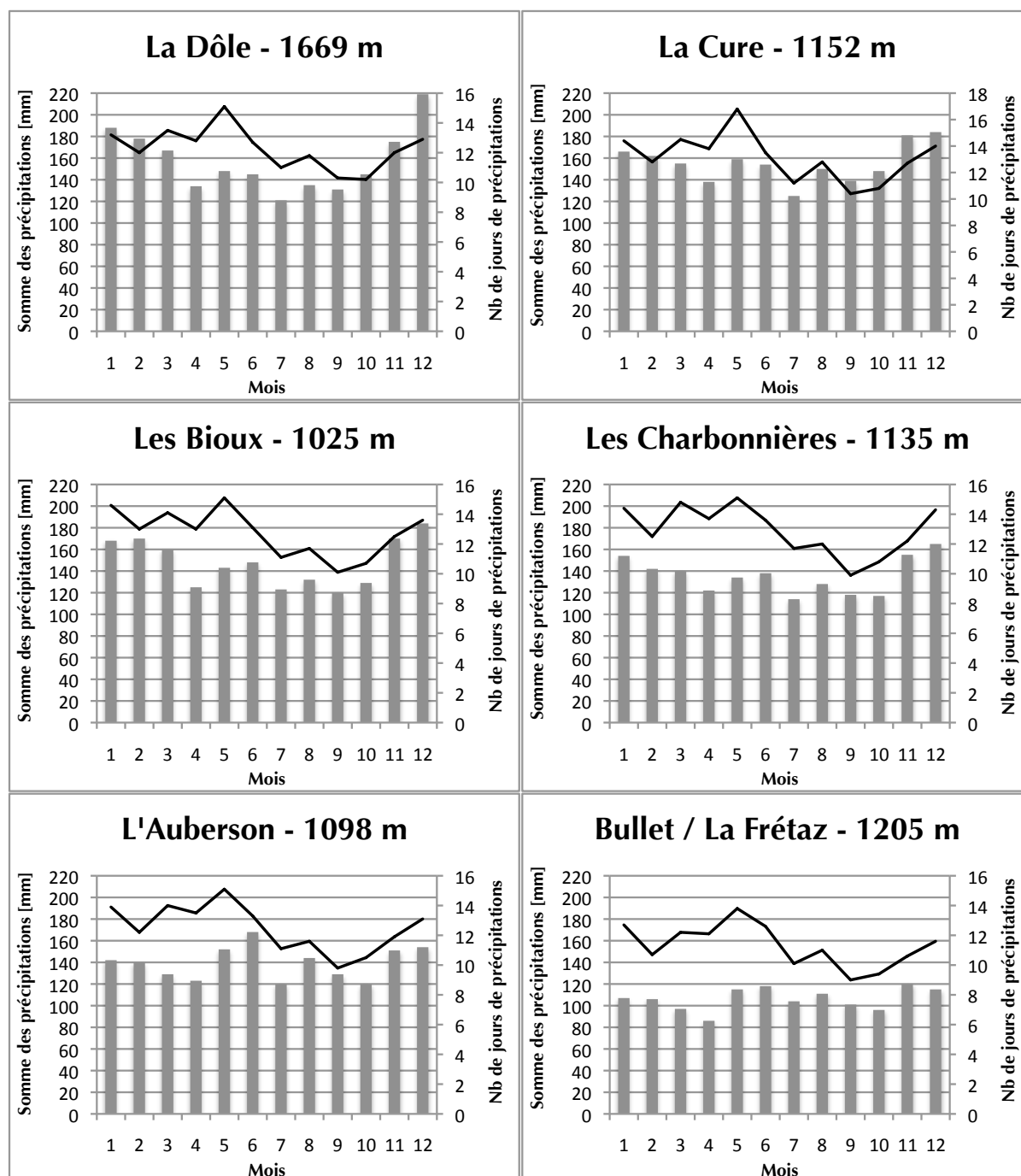


Figure 2.2.2 : Moyenne des précipitations de différentes stations MétéoSuisse du Jura vaudois pour la période de référence 1961-1990. Les barres grises représentent la somme des précipitations [mm] et le trait noir le nombre de jours de précipitations.

2.2.3. Comparaison des Alpes et du Jura vaudois avec les autres régions de montagnes suisses

Au printemps, en automne et en hiver, les Alpes vaudoises reçoivent moins de précipitations que le Jura vaudois. En été, c'est l'inverse qui se produit. Ceci se confirme si l'on compare le nombre de jours avec précipitations. En moyenne, le Jura vaudois est durant ces trois saisons arrosé entre 3 et 6 jours de plus alors qu'en été c'est l'inverse qui se produit (3 jours de plus dans les Alpes vaudoises).

La station de Jaun (figure 2.2.3) dans les Préalpes fribourgeoises reçoit au total annuel plus de précipitations (1717 mm) que les Alpes vaudoises (entre 1366 et 1644 mm) mais dans les mêmes proportions que le Jura vaudois (entre 1274 et 1859 mm). En été, cette station est bien plus arrosée (524 mm) que celles des Alpes ou du Jura vaudois. En ce qui concerne le nombre de jours de précipitations, il y pleut à chaque saison entre 1 et 6 jours de plus que dans les Alpes vaudoises. Par rapport au Jura vaudois, c'est seulement en été qu'il y pleut plus souvent (+ 3 à 5 jours). Les autres mois sont comparables.

Les quantités de précipitations tombant dans les Alpes vaudoises correspondent assez bien à celles des Alpes bernoises représentées ici par la station d'Adelboden (figure 2.2.3), même si cette dernière reçoit légèrement moins de précipitations durant les saisons d'automne et d'hiver (281 et 293 mm). En nombre de jours, c'est en été que l'on remarque une faible différence avec une moyenne de 44 jours à Adelboden alors que les Alpes vaudoises se situent entre 37 et 40. Durant les autres saisons, le nombre de jours de précipitations est équivalent. Par rapport à Adelboden, le Jura vaudois reçoit, quant à lui, plus de précipitations en automne et en hiver et moins en été. En nombre de jours, cela se remarque surtout en hiver, avec 1 à 7 jours de plus de précipitations sur le Jura vaudois et, en été, avec 6 à 10 jours de moins.

Le Valais central, représenté par les stations de Montana et de Zermatt (figure 2.2.3), présente des précipitations bien inférieures à celles que l'on trouve dans les Alpes et le Jura vaudois ou dans le reste de la Suisse. En effet, à toutes les saisons, il tombe plus de deux fois plus de précipitations dans les Alpes vaudoises et dans le Jura vaudois qu'à Zermatt. La différence avec Montana n'est pas aussi extrême mais est tout de même de l'ordre d'une fois et demie de précipitations supplémentaires sur les Alpes et le Jura vaudois, sauf en hiver où l'écart est un peu moins important. Cette forte différence du régime des précipitations se ressent aussi en nombre de jours : à Zermatt, en hiver, on mesure entre 12 et 14 jours de précipitations de moins que dans les Alpes vaudoises et entre 15 et 21 jours de moins que dans le Jura vaudois. A Montana, il y a entre 3 et 5 jours de précipitations de moins que dans les Alpes vaudoises et entre 6 et 12 jours de précipitations de moins que dans le Jura vaudois. La différence est également importante durant les autres saisons : à Zermatt (et à Montana), il pleut, au printemps, de 14 à 16 jours de moins (11 à 13) que dans les Alpes vaudoises et de 14 à 21 jours de moins (9 à 16) que dans le Jura vaudois; en été, de 10 à 13 jours de moins (7 à 10) que dans les Alpes vaudoises et de 7 à 11 jours de moins (4 à 8) que dans le Jura vaudois; en automne, de 7 à 8 jours de moins (5 à 6) que dans les Alpes vaudoises et de 8 à 13 jours de moins (6 à 11) que dans le Jura vaudois. C'est en été que les précipitations sont les plus abondantes à Zermatt (163 mm) et en hiver à Montana (331 mm). Avec 611 mm de précipitations totales annuelles réparties sur 92 jours durant toute l'année, la région de Zermatt

est une des régions les moins arrosées du pays. Montana est également peu arrosée mais dans des proportions moins importantes (982 mm répartis sur 111 jours).

Davos, dans les Grisons, et Poschiavo / Robbia, au sud des Alpes (Tessin), reçoivent également des précipitations moins importantes que les Alpes et le Jura vaudois. La différence avec Davos est fortement marquée : entre une fois et demie et deux fois moins de précipitations à Davos à toutes les saisons sauf en été, saison durant laquelle les précipitations sont comparables à celles du Jura vaudois et à peine inférieures à celles des Alpes vaudoises. Ceci se remarque également en nombre de jours : seul l'été a un nombre de jours de pluie supérieur à Davos que dans les Alpes et le Jura vaudois. A Poschiavo / Robbia, la quantité ainsi que le nombre de jours de précipitations sont, à toutes les saisons, inférieurs à ceux des Alpes et du Jura vaudois. Comme ailleurs au sud des Alpes, l'hiver est la saison la plus sèche dans cette station (157 mm répartis sur 18 jours) et l'été la plus humide (312 mm répartis sur 32 jours).

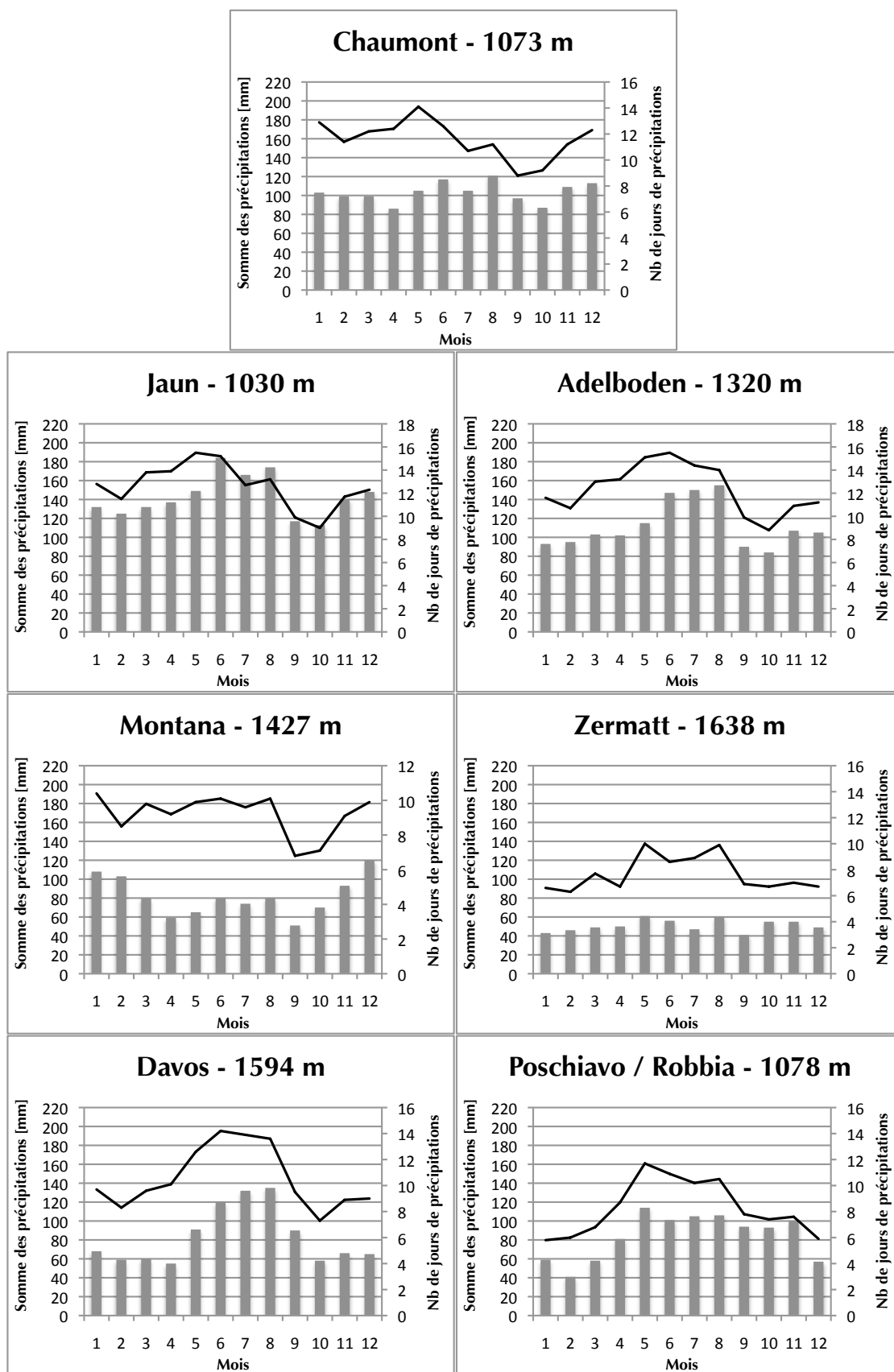


Figure 2.2.3 : Moyenne des précipitations de quelques stations MétéoSuisse des montagnes suisses pour la période de référence 1961-1990. Les barres grises représentent la somme des précipitations [mm] et le trait noir le nombre de jours de précipitations.

2.3. TEMPÉRATURE

Le premier facteur qui influence les écarts de température en Suisse est l'altitude. Si l'on supprime le facteur altitude, la topographie joue également un rôle, essentiellement sur les différences de températures minimales et plus particulièrement durant les mois les plus froids. Le facteur régional n'explique que partiellement, et bien après les deux autres facteurs, les écarts de température d'une région à l'autre, à l'exception du sud des Alpes qui affiche toujours des températures plus élevées que ce que l'altitude des sites observés laisserait attendre. Il importe donc peu de comparer les températures des différentes stations météorologiques en fonction de la région. Par contre, la perte de température par 100 m d'élévation est intéressante (table 2.4.1) pour comparer les différentes stations touristiques des montagnes suisses.

Mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
T _{min} °C/100 m	-0.47	-0.52	-0.55	-0.55	-0.52	-0.53	-0.51	-0.49	-0.47	-0.44	-0.47	-0.47
T _{max} °C/100 m	-0.42	-0.51	-0.63	-0.70	-0.71	-0.69	-0.68	-0.66	-0.61	-0.51	-0.45	-0.40

Table 2.4.1 : Différence de température [°C] pour une augmentation de 100 m en altitude (d'après Baeriswyl et al., 1997)

En janvier, pour une température maximale de 5°C en plaine à 400 m, il fera environ 2°C à 1000 m (table 2.4.2). En moyenne, le facteur altitudinal correspond au printemps et en été à -0.68°C par 100 m d'altitude, en automne à -0.52°C et en hiver à -0.44°C.

Température [°C] par altitude [m]							
	400	1000	1500	2000	2500	3000	3500
Printemps	10	6	3	-1	-4	-8	-11
	15	11	8	4	1	-3	-6
Été	20	16	13	9	6	2	-1
	30	26	23	19	16	12	9
Automne	15	12	9	7	4	1	-1
	10	7	4	2	-1	-4	-6
Hiver	5	2	0	-2	-4	-6	-9
	0	-3	-5	-7	-9	-11	-14

Table 2.4.2 : Température [°C] pour différentes altitudes [m] pour le printemps (mars – avril – mai), l'été (juin – juillet – août), l'automne (septembre – octobre – novembre) et l'hiver (décembre – janvier – février)

Les Alpes vaudoises ayant peu de secteurs à haute altitude et le Jura vaudois aucun, ils offrent à toute saison des températures modérées par rapport aux stations qui ont leur domaine d'activité situé à plus haute altitude. Ceci est particulièrement important pour les activités extérieures durant les mois les plus froids de l'hiver.

Lorsque l'on souhaite comparer différents climats favorables à la pratique des activités touristiques en plein air, on utilise généralement des indicateurs qui reflètent la température ressentie par l'être humain. Plusieurs indicateurs ont été développés, le plus courant étant la température mesurée ressentie qui intègre le vent (table 2.4.3).

Vitesses du vent [km/h]	Quoi regarder dans l'estimation de la vitesse du vent	Température mesurée ressentie [°C]									
0		0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
10	On sent le vent sur sont visage; les girouettes commencent à tourner.	-3	-9	-15	-21	-27	-33	-39	-45	-51	-57
20	Les petits drapeaux flottent.	-5	-12	-18	-24	-30	-37	-43	-49	-56	-62
30	Les débris de papier sont soulevés; les grands drapeaux claquent au vent et les petites branches des arbres bougent.	-6	-13	-20	-26	-33	-39	-45	-52	-59	-65
40	Les petits arbres commencent à osciller et les grands drapeaux sont déployés et claquent fortement au vent.	-7	-14	-21	-27	-34	-41	-48	-54	-61	-68
50	Les grosses branches des arbres bougent; on entend siffler les lignes électriques et on peut difficilement tenir un parapluie.	-8	-15	-22	-29	-35	-42	-49	-56	-63	-69
60	Les arbres penchent et il est difficile de marcher contre le vent.	-9	-16	-23	-30	-36	-43	-50	-57	-64	-71

Table 2.4.3 : Indice et estimation du refroidissement éolien (Environnement-Canada, 2010)

2.4. SYNTHÈSE PROVISOIRE ET CONSÉQUENCES POUR LE TOURISME

Les précipitations, l'ensoleillement et la température déterminent le climat d'une région. Le printemps est la saison qui comporte le plus grand nombre de jours de précipitations. L'automne est la saison qui en a le moins. Les Alpes et le Jura vaudois sont nettement plus arrosés que le Valais, les Grisons et le Tessin et dans des proportions à peu près identiques aux Préalpes et aux Alpes bernoises avec quelques variations suivant les saisons. En hiver, ceci est particulièrement intéressant pour le tourisme puisque les Alpes et le Jura vaudois reçoivent des quantités plus importantes de précipitations qui, si les températures sont assez basses, parviennent sous forme de neige. Par contre, cela a pour conséquence négative un important nombre de jours avec précipitations qui ne sont pas favorables à la pratique des activités de plein air. En été, le nombre relativement élevé de jours de précipitations a pour conséquence négative de ne pas pouvoir garantir le beau temps durant une longue période.

Les altitudes basses à moyennes des Alpes et Jura vaudois, à l'exception d'un secteur de haute altitude, assurent à ces régions des températures hivernales plus favorables à la pratique des activités de plein air que d'autres stations à plus haute altitude. Au printemps et en automne cela leur permet d'avoir plus rapidement, respectivement plus longuement, des températures agréables. En été, la fraîcheur par rapport à la plaine y est tout autant assurée que dans d'autres stations de plus haute altitude.

3. EVOLUTION PASSÉE ET FUTURE DES VARIABLES CLIMATIQUES POUR LES ALPES ET LE JURA VAUDOIS

Cette partie présente les connaissances actuelles concernant l'évolution de cinq paramètres météorologiques (température, précipitations, enneigement, brouillard et lac gelé) qui subissent, dans la région d'étude, des changements potentiellement significatifs pour les activités touristiques (IPCC, 2007b). Les autres paramètres météorologiques (vent, humidité et ensoleillement) ne subissent pas de modifications significatives.

3.1. TEMPÉRATURE

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 and 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 70, cet accroissement s'est fait dans des proportions encore plus élevées avec 0.57 °C par décennie en moyenne suisse (Rebetez and 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 and Reinhard, 2008).

3.1.1. Hiver

En hiver, la température a augmenté en Suisse de 1.58 °C entre 1901 et 2010 (figure 3.1.1). Tout comme pour les températures annuelles, cette augmentation a surtout eu lieu depuis les années 1970. La station météorologique de Château-d'Oex² présente une augmentation à peine plus importante (+ 1.88 °C) (figure 3.1.2). L'augmentation des températures pour le siècle à Chaumont est un peu plus faible que celle de la moyenne suisse (+ 1.01 °C) (figure 3.1.3).³

² Château d'Oex est la seule station des Alpes vaudoises à offrir une série de données homogénéisées sur plus d'un siècle.

³ Le Jura vaudois n'a pas de station météorologique présentant une série de données de températures aussi longue. La station météorologique de Chaumont, dans le Jura neuchâtelois à une altitude de 1073 m, a ainsi été utilisée.

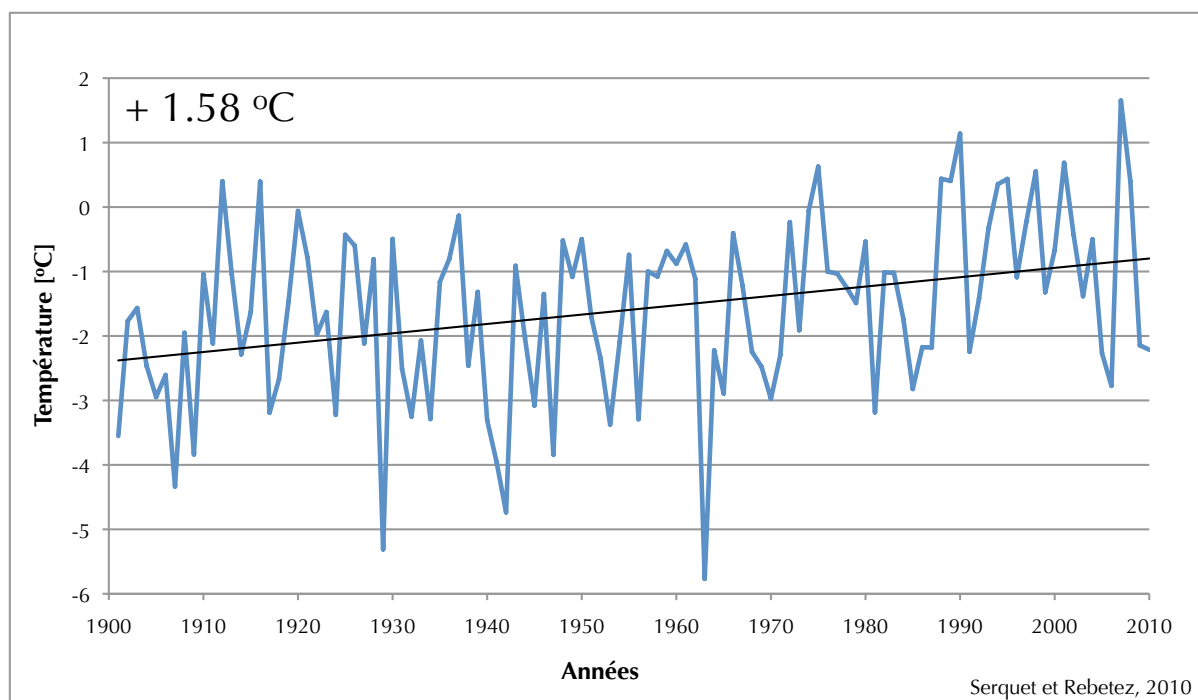


Figure 3.1.1 : Evolution passée des températures moyennes hivernales (décembre – janvier – février) de douze stations homogénéisées de MétéoSuisse

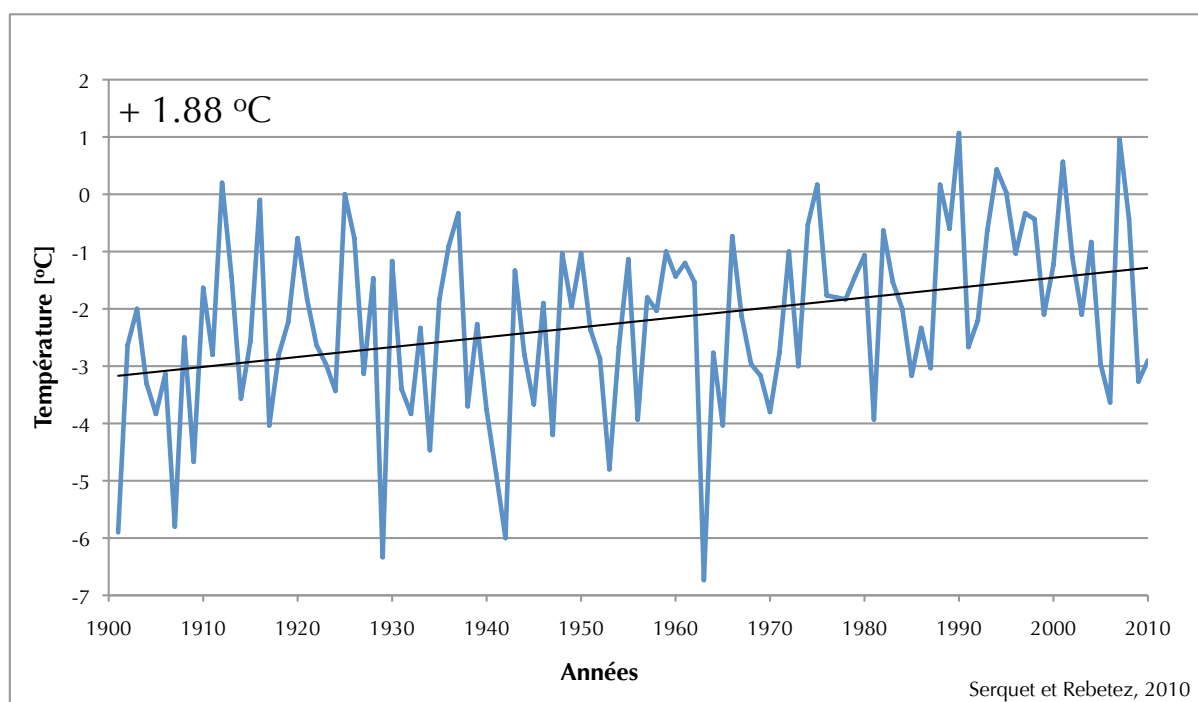


Figure 3.1.2 : Evolution passée des températures moyennes hivernales (décembre – janvier – février) de la station MétéoSuisse de Château-d'Oex

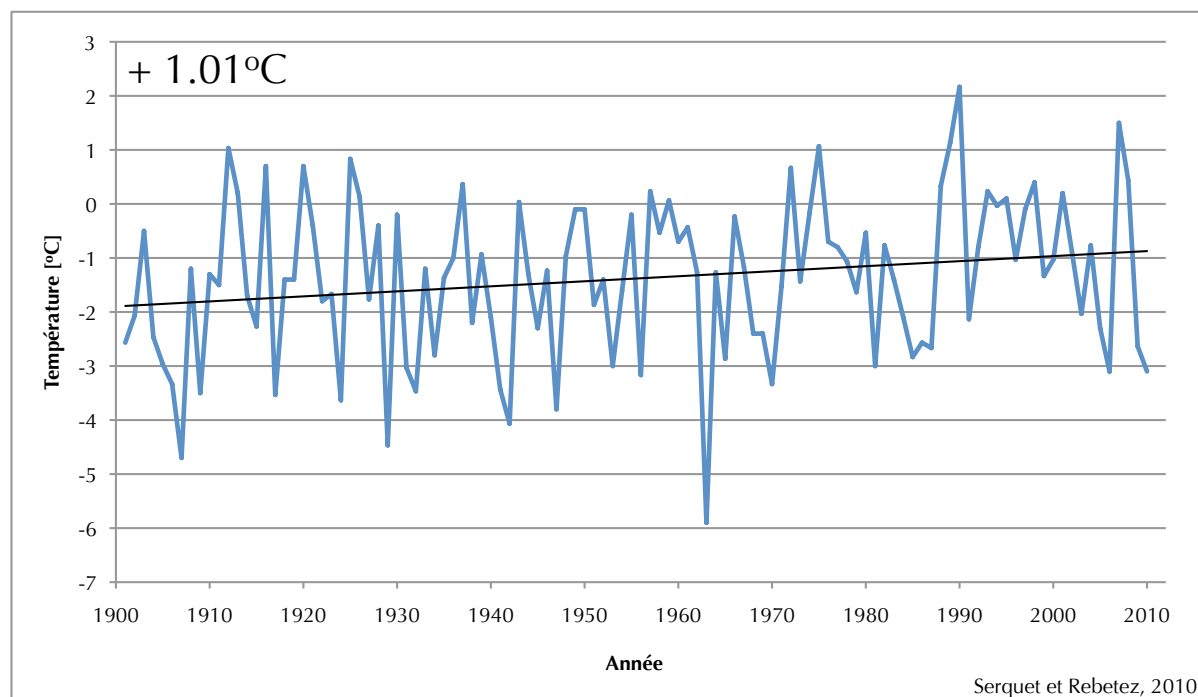


Figure 3.1.3 : Evolution passée des températures moyennes hivernales (décembre – janvier – février) de la station MétéoSuisse de Chaumont

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 rigoureux survenu en Suisse mais également dans les Alpes et le Jura vaudois 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, 2006).

En hiver, 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 and Appenzeller, 2006). D'ici 2050, il devrait monter jusqu'à 1300 m (fourchette comprise entre 1020 et 1520 m) (OcCC-ProClim, 2007).

3.1.2. Été

En été, l'augmentation des températures depuis 1901 est encore plus importante qu'en hiver : + 1.83 °C en moyenne pour l'ensemble de la Suisse (figure 3.1.4).

Cette augmentation est comparable, voire à peine supérieure si l'on prend la station de référence des Alpes vaudoises, Château-d'Oex (figure 3.1.5) et celle de Chaumont (figure 3.1.6). L'été caniculaire de 2003 ressort très clairement dans ces trois figures. Les périodes plus fraîches du milieu des années 1950 au début des années 1980 ont probablement été causées par la pollution des aérosols (Rebetez, 2006).

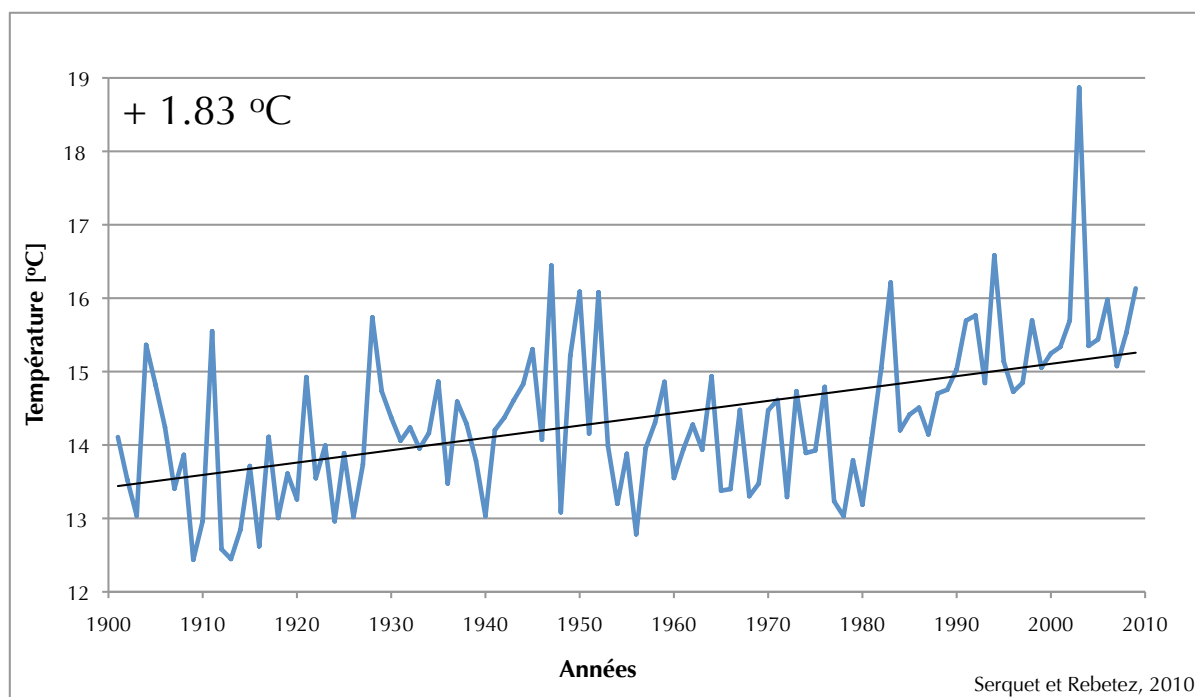


Figure 3.1.4 : Evolution passée des températures moyennes estivales (juin – juillet – août) de douze stations homogénéisées de MétéoSuisse

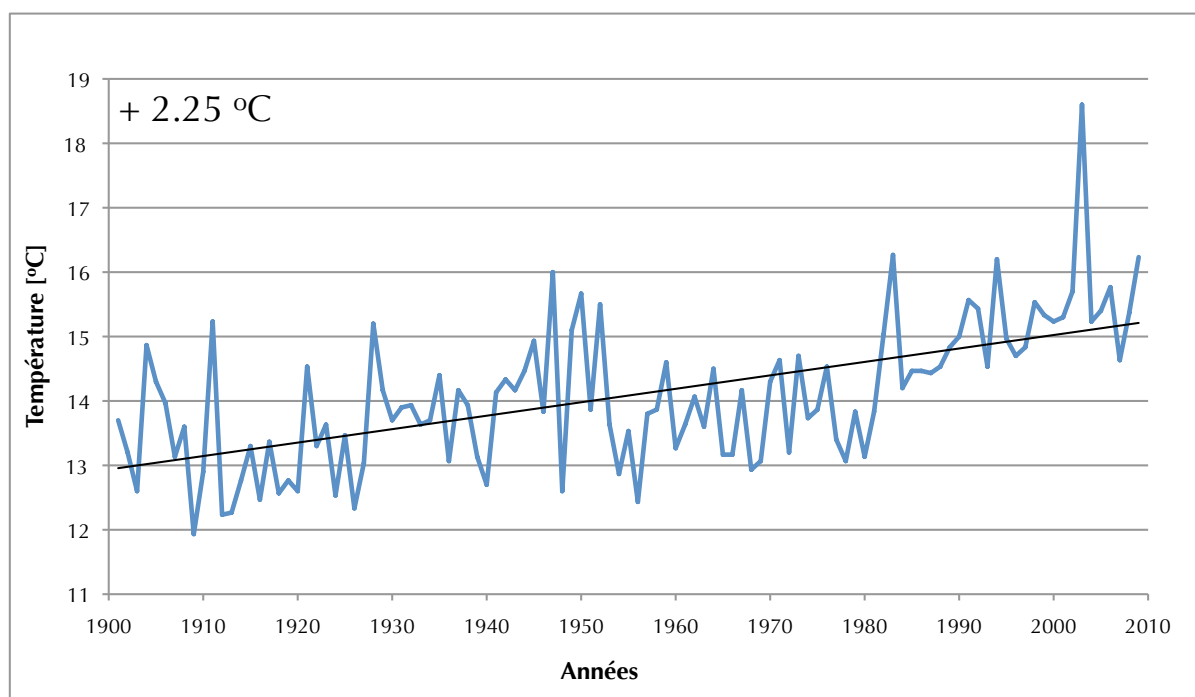


Figure 3.1.5 : Evolution passée des températures moyennes estivales (juin – juillet – août) de la station MétéoSuisse de Château-d'Oex

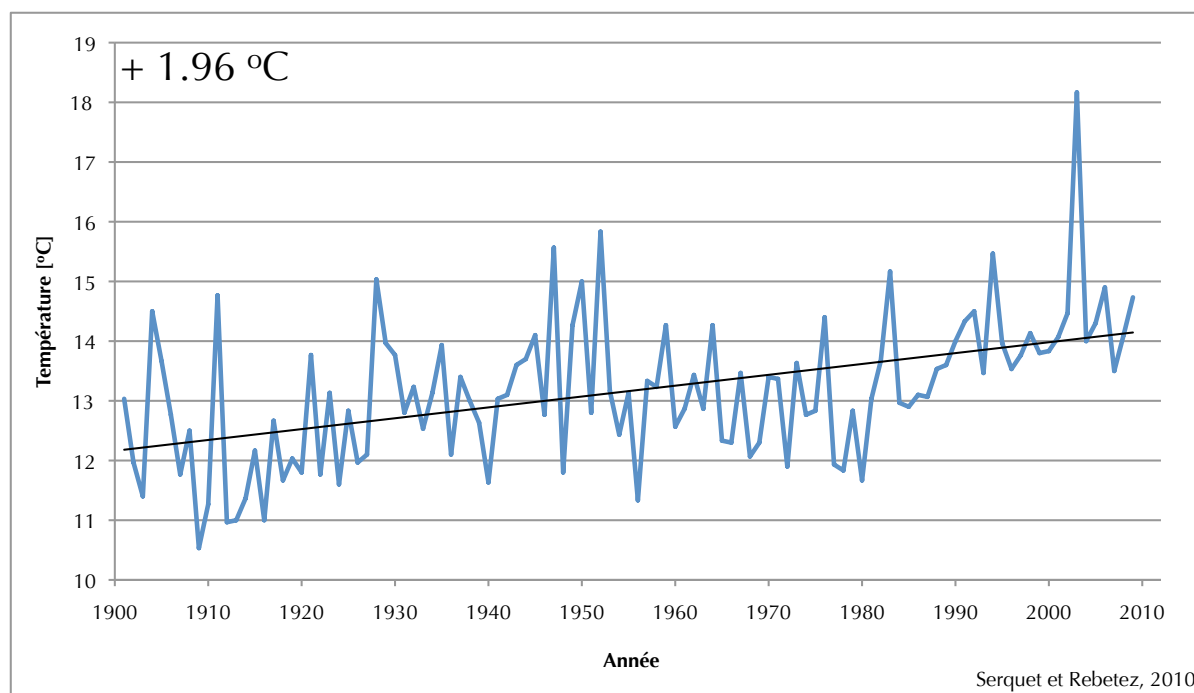


Figure 3.1.6 : Evolution passée des températures moyennes estivales (juin – juillet – août) de la station MétéoSuisse de Chaumont

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 3.1.7)⁴.

La figure 3.1.7 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).

⁴ La station météorologique de Neuchâtel est la seule station à offrir des données quotidiennes fiables depuis le début du siècle (figure 3.1.7). Elle est cependant bien représentative de l'évolution des températures que l'on retrouve sur le plateau suisse.

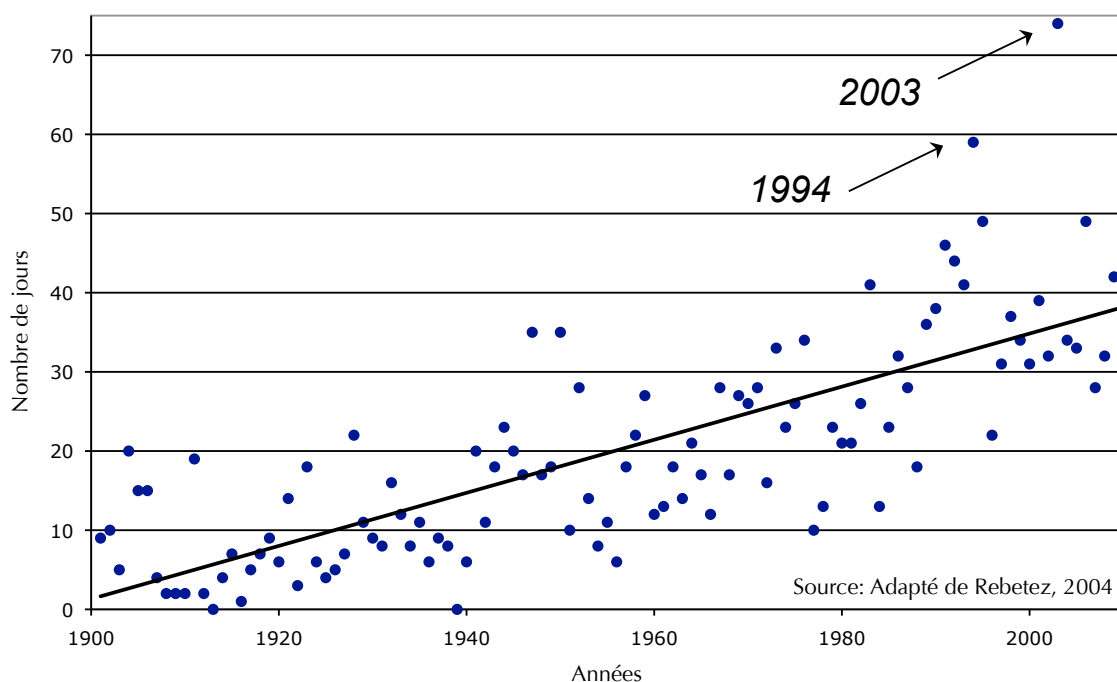


Figure 3.1.7 : Evolution passée du nombre de jours très chauds ($T_{min} > \text{percentile } 80$) pour l'été (juin – juillet – août) de la station MétéoSuisse de Neuchâtel (adapté de Rebetez, 2004)

3.1.3. Scénarios futurs

Les modèles climatiques (IPCC, 2007a) prédisent la poursuite de l'accroissement des températures globales pour les prochaines décennies. Selon la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise, la température globale augmentera par rapport à la période 1980-1999 de 1.4 à 5.8°C d'ici à la fin du 21^{ème} siècle (IPCC, 2007a). La Suisse dans son ensemble comme les Alpes et le Jura vaudois n'échapperont pas à ce phénomène et connaîtront aussi une augmentation importante des températures à toutes les saisons (figure 3.1.8).

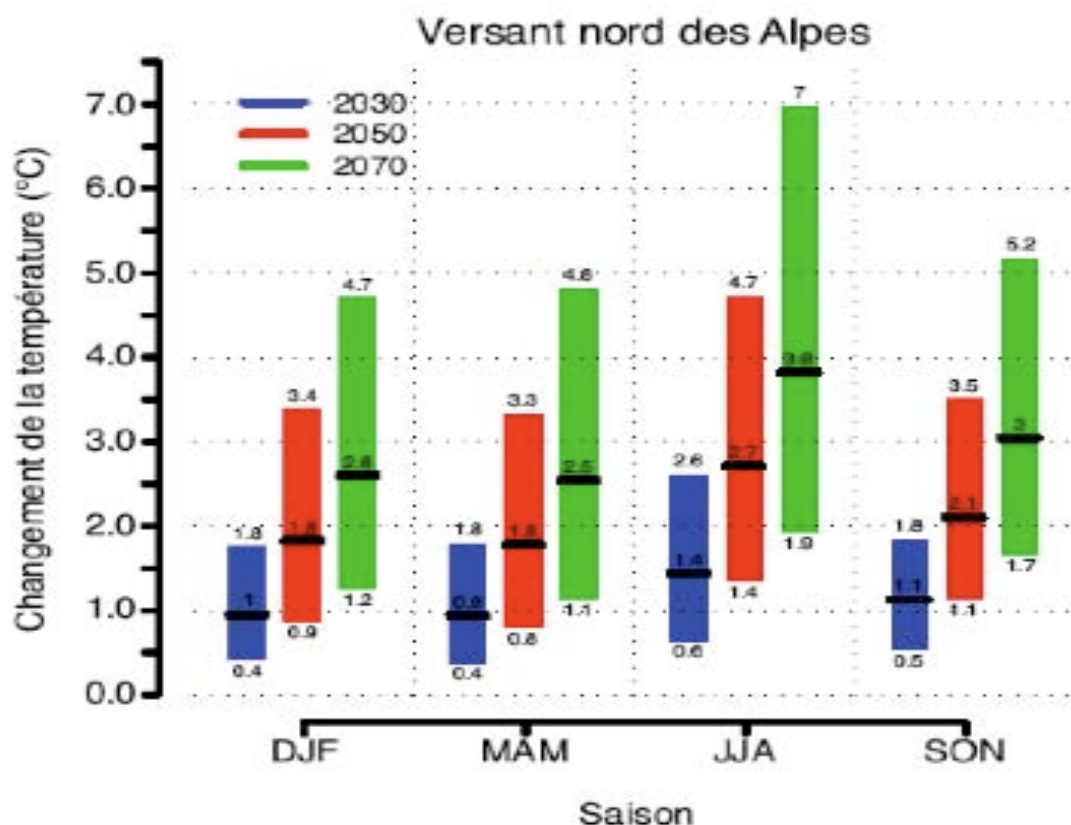


Figure 3.1.8 : Modélisation de la température moyenne pour les quatre saisons sur les versants nord des Alpes suisses pour 2030, 2050 et 2070 par rapport à 1990 (OcCC-ProClim, 2007). Ces prévisions devraient être mises à jour en 2011.

3.2. PRÉCIPITATIONS

Les précipitations varient fortement d'une année à l'autre en Suisse (figure 3.2.1). Les Alpes vaudoises et le Jura vaudois ne font pas exception à la règle. 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 (figure 3.2.2).

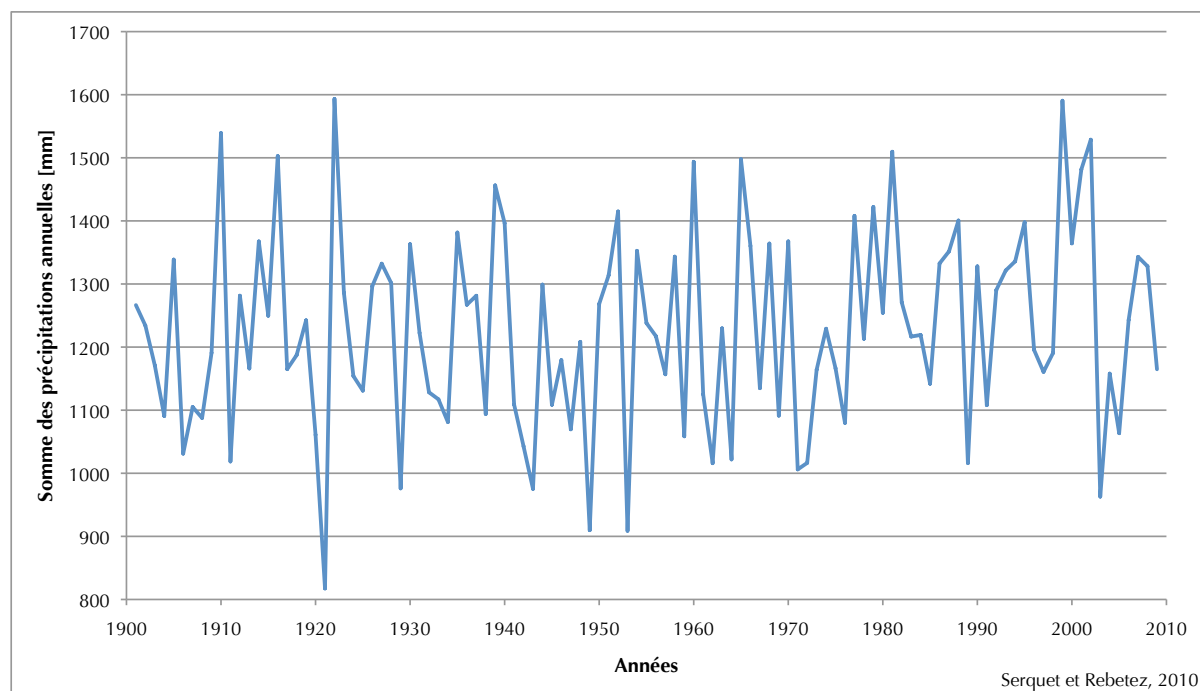


Figure 3.2.1 : Evolution passée de la somme des précipitations annuelles [mm] de douze stations homogénéisées de MétéoSuisse

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 and Frei, 2005).

Cette tendance à la hausse devrait continuer à l'avenir (IPCC, 2007a). D'ici à la fin du siècle, la Suisse devrait connaître plus de précipitations extrêmes et de jours de sécheresse (figure 3.2.2, 3.2.3 et 3.2.4). Ceci risque de se traduire par davantage de longues périodes de sécheresse et d'épisodes de précipitations intenses.

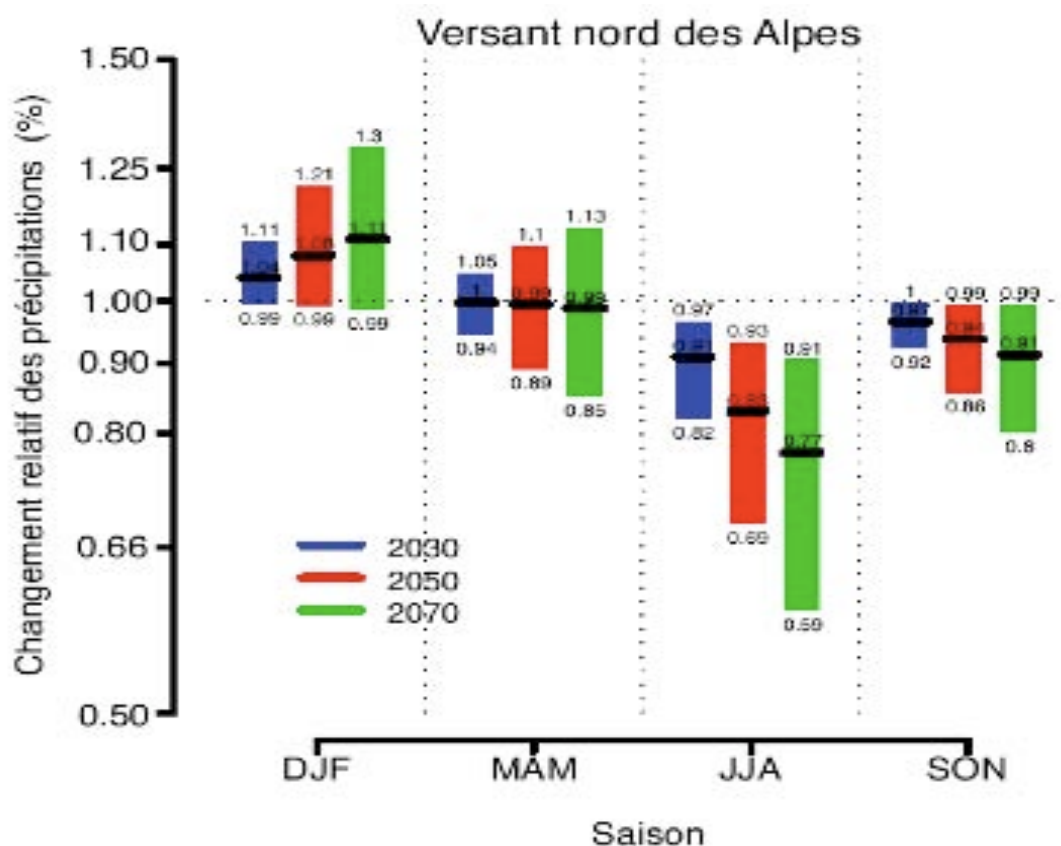


Figure 3.2.2 : Modélisation des précipitations [%] pour les quatre saisons sur les versants nord des Alpes suisses pour 2030, 2050 et 2070 par rapport à 1990. Une valeur de 0.50 désigne une diminution de 50%, une valeur de 1.25 une augmentation de 25% par rapport aux conditions actuelles (OcCC-ProClim, 2007). Ces prévisions devraient être mises à jour en 2011.

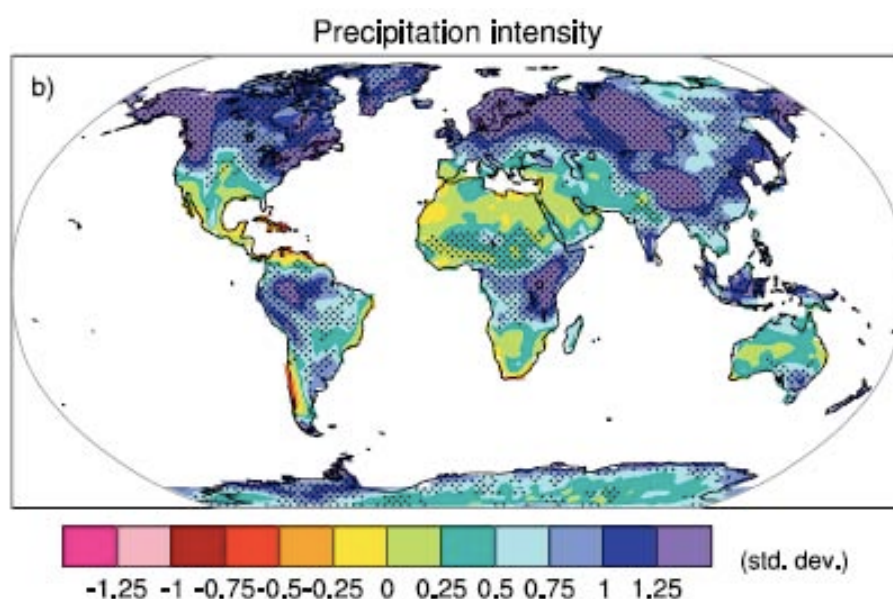


Figure 3.2.3 : Modélisation du changement de l'intensité des précipitations pour 2080 à 2099. Les régions en vert, bleu et violet sont les régions qui connaîtront une augmentation des événements de précipitations extrêmes (IPCC, 2007a).

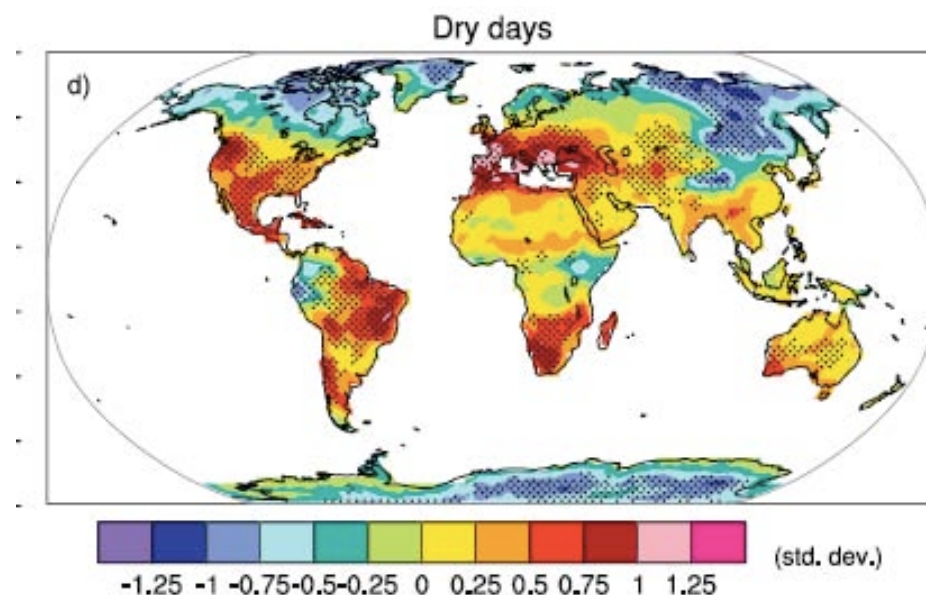


Figure 3.2.4 : Modélisation du changement pour les jours de sécheresse pour 2080 à 2099. Les régions en orange, rouge et rose sont les régions qui connaîtront une augmentation des périodes de sécheresse (IPCC, 2007a).

3.3. ENNEIGEMENT ET PRÉCIPITATIONS NEIGEUSES

Deux paramètres sont à prendre en compte lorsqu'on étudie l'évolution de la couverture neigeuse : les précipitations neigeuses mesurées en hauteur de neige fraîche et l'enneigement qui correspond à la hauteur de la neige 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 multiple 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 (Rebetez, 2006).

En Suisse, l'enneigement, tout comme les précipitations neigeuses, varie fortement d'une année à l'autre mais également d'un mois à l'autre (figure 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 et 3.3.4). Par ailleurs, en hiver, à basse et moyenne altitude, les précipitations sous forme de neige dépendent essentiellement de la température qu'il fait alors qu'au-dessus de 3000 m, 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.

Une diminution de l'enneigement durant les 20 dernières années, soit depuis l'hiver 1987-88 (figure 3.3.1), est déjà nettement visible pour les sites jusqu'à 1300 m. La diminution avoisinait 30% en 2005 par rapport aux valeurs mesurées jusqu'au début des années 1980 (figure 3.3.2).

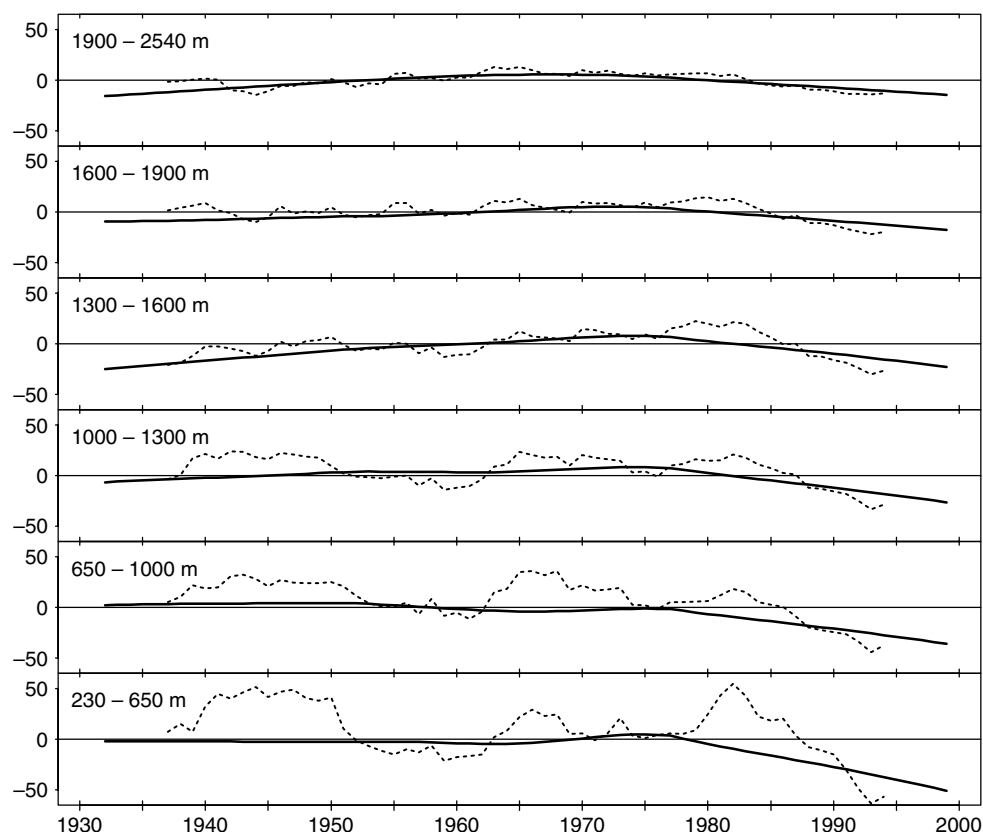


Figure 3.3.1 : Déviation relative [%] de la hauteur de neige moyenne hivernale (novembre à avril) par rapport à la moyenne à long terme. La ligne pointillée représente la moyenne mobile sur 11 ans et la ligne pleine la tendance à long terme. Les données (1932-1999) couvrent toutes les régions des Alpes suisses pour différentes altitudes (Latenser and Schneebeil, 2003).

L'analyse de stations de montagne suisses montre que depuis les années 1990, les précipitations tombent entre 60 et 70% sous forme de neige aux altitudes comprises entre 801 et 1100 m durant les mois d'hiver (décembre – janvier – février). Entre 1101 et 1400 m, cela arrive dans environ 80% des cas, alors que la barre des 85% est dépassée entre 1401 et 1700 m (Serquet et al., en cours).

En ce qui concerne la part des précipitations neigeuses par rapport aux précipitations totales hivernales, celles-ci ont 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.

Depuis le début des années 1960, la diminution du cumul de la neige fraîche est de plus de 70% à Sion, d'environ 30% à Chaumont et à Château-d'Oex et entre 20 et 25% à Leysin (figure 3.3.3 et 3.3.4). Au Weissfluhjoch, la diminution n'est pas réellement significative. Elle dépend de la variabilité (figure 3.3.3 et 3.3.4).

Tous les scénarios IPCC (IPCC, 2007a) prédisent 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 and Hirtl-Wielke, 2007; IPCC, 2007b).

Avec la poursuite de l'augmentation moyenne des températures observées en Suisse depuis les années 1970, soit de 0.38°C / 10 ans en hiver (Rebetez and Reinhard, 2008), la limite du 0°C va monter en altitude ce qui aura pour corollaire de décaler la limite moyenne de l'enneigement de 86 m / 10 ans.

En ce qui concerne la part des précipitations neigeuses par rapport aux précipitations totales hivernales, on peut s'attendre à ce que la diminution se poursuive dans le même ordre de grandeur que celle observée depuis 1979, soit entre 801 et 1100 m de 6 à 13% / 10 ans et entre 1101 et 1400 m de 4 à 10% / 10 ans.

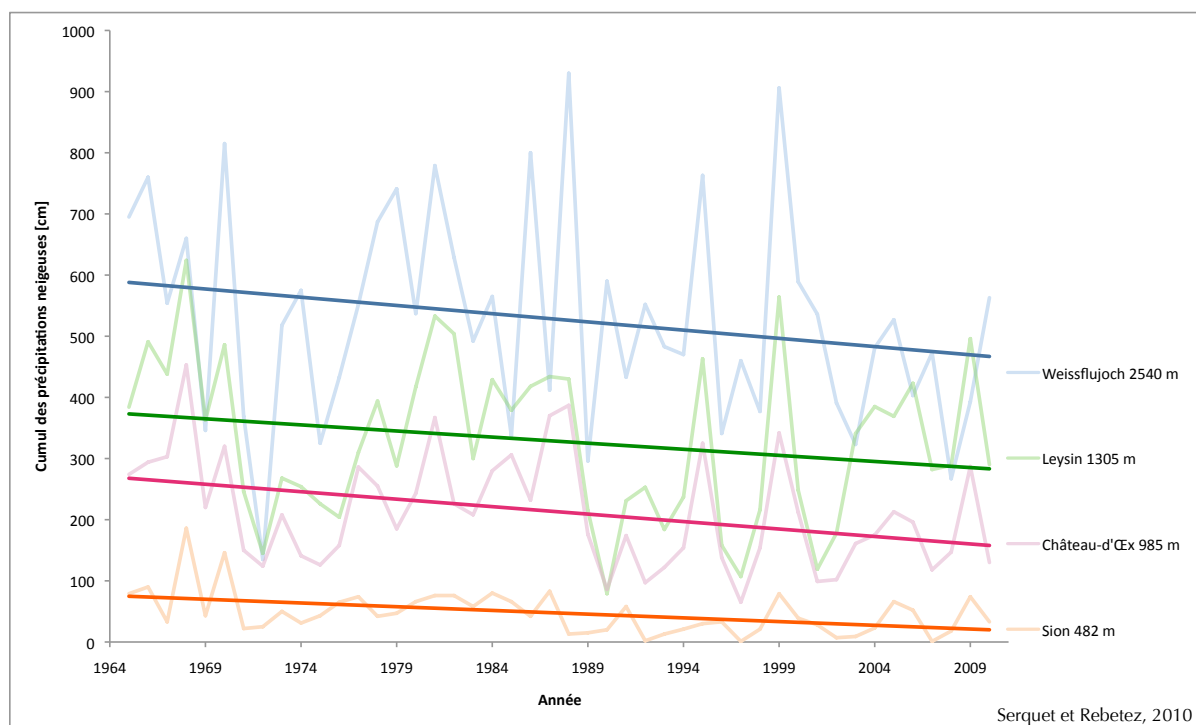


Figure 3.3.3 : Cumul des précipitations neigeuses de décembre à mars [cm] à Château-d'Oex en comparaison avec d'autres stations météorologiques d'altitudes différentes (source des données : MétéoSuisse et MétéoLeysin)

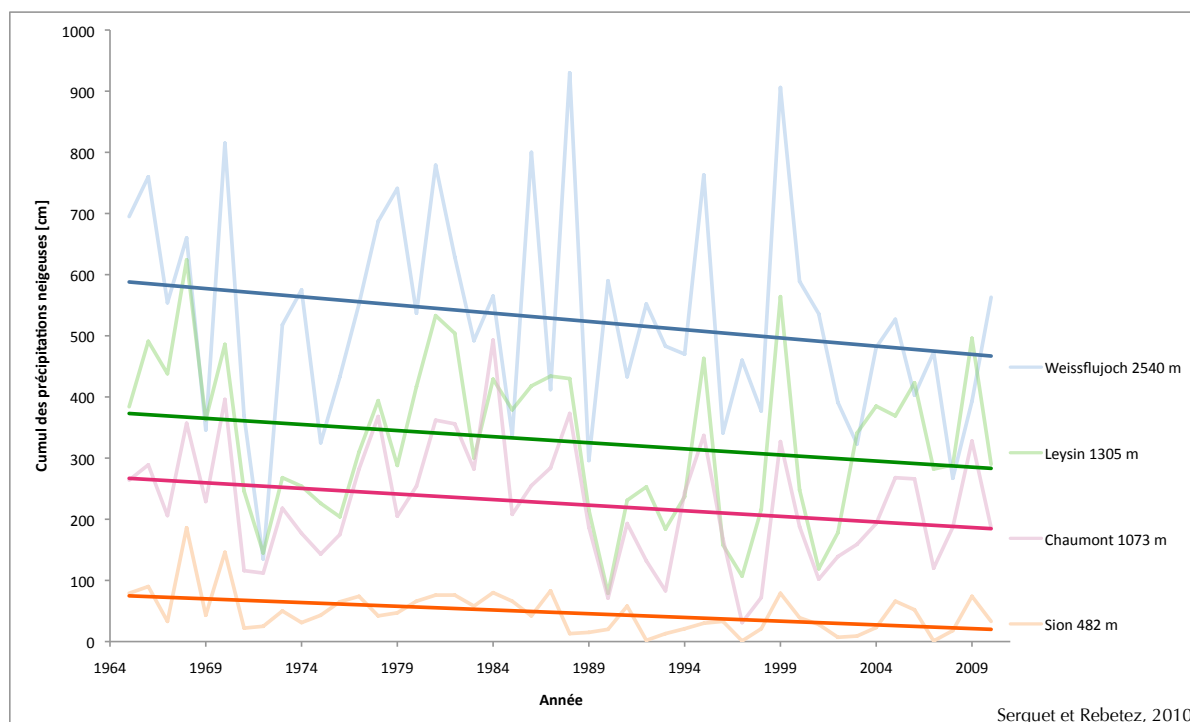


Figure 3.3.4 : Cumul des précipitations neigeuses de décembre à mars [cm] à Chaumont en comparaison avec d'autres stations météorologiques d'altitudes différentes (source des données : MétéoSuisse et MétéoLeysin)

3.4. SYNTHÈSE PROVISOIRE

On s'attend à l'avenir à la poursuite de l'augmentation des températures observée en Suisse depuis le milieu des années 1970, soit environ 0.57°C par décennie en moyenne annuelle, 0.38°C par décennie en hiver et 0.86°C par décennie en été. On s'attend également à une augmentation particulièrement importante du nombre de jours très chauds en été.

Cette augmentation de la température depuis le milieu des années 1970 implique un décalage de l'enneigement hivernal de l'ordre de 86 m par décennie. Par ailleurs, en hiver, 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. D'ici 2050, il pourrait se situer aux alentours de 1300 m. Cette évolution de l'isotherme 0°C aura pour conséquence la poursuite de la diminution de la part des précipitations neigeuses par rapport au total des précipitations hivernales. Cette diminution est la plus forte à basse altitude, modérée à altitude moyenne et pour l'instant inexistante en hiver à haute altitude. A toutes les altitudes, la variabilité, d'un mois à l'autre et d'une année à l'autre, est cependant importante et elle le restera au moins autant à l'avenir. De 1979 à 2008, on a mesuré une diminution de la proportion des précipitations neigeuses hivernales de 6 à 13 % par décennie aux altitudes situées entre 800 et 1100 m et de 4 à 10 % par décennie entre 1100 et 1400 m. On s'attend à la poursuite de cette diminution. A basse et moyenne altitude, il en résultera une alternance de plus en plus fréquente de précipitations neigeuses et pluvieuses, qui font fondre la neige.

La poursuite de l'augmentation des températures aura également pour conséquence un net accroissement de la durée des conditions « estivales » en montagne avec des possibilités d'extension des activités touristiques de cette saison sur le printemps et l'automne. Cette augmentation concernera particulièrement les altitudes des stations des Alpes et du Jura vaudois.

Concernant les précipitations, l'évolution générale va dans le sens d'une augmentation des épisodes de précipitations intenses. Parallèlement, on s'attend à ce que la Suisse connaisse davantage de jours et de périodes de sécheresse.

4. PERSPECTIVES POUR L'HIVER

4.1. SÉCURITÉ DE L'ENNEIGEMENT

Une quantité d'enneigement suffisante durant la saison hivernale est un des principaux facteurs de la réussite d'une saison pour la majorité des prestataires touristiques et notamment pour les remontées mécaniques et les centres nordiques. Avec l'augmentation des températures ces dernières années et la diminution de l'enneigement (cf. chapitre 3), 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 avenir.

Plusieurs études et rapports suisses (Abegg, 1996; Abegg et al., 2007; Bürki, 2000; Elsasser and Buerki, 2002; Koenig and Abegg, 1997; Müller and Weber, 2008; OcCC-ProClim, 2007) se sont intéressés à la sécurité d'enneigement pour les domaines skiables suisses, c'est-à-dire au nombre de jours minimal avec une quantité de neige suffisante pour que les remontées mécaniques soient viables. Ces études ont également défini la ligne de sécurité d'enneigement, soit l'altitude la plus basse à laquelle l'enneigement naturel est assuré durant un certain nombre de jours. Les résultats de ces études 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'une station soit viable (table 4.1.1 et 4.1.2⁵).

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 4.1.1 : Nombre de stations de ski avec une sécurité d'enneigement en 2000 (Bürki, 2000; Koenig and Abegg, 1997)

Aux températures actuelles (2000), on considère que l'enneigement naturel est assuré dès 1200 m (table 4.1.1). Selon ces études, les stations qui ont certaines ou toutes leurs pistes en dessous de ce seuil sont déjà en difficulté. Il s'agit pour le canton de Vaud essentiellement de la région du Jura. Avec une

⁵ Il est à noter que le rapport de Suisse Tourisme « 2030: le tourisme suisse face aux changements climatiques » reprend les mêmes résultats que ceux présentés dans la table 4.1.2.

augmentation de 2°C, soit les prévisions pour environ 2050, seules un peu plus de la moitié des stations des Alpes vaudoises verraient leur enneigement naturel assuré (figure 4.1.2).

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

Plusieurs remarques sont à faire concernant les résultats de ces études et leur pertinence pour le canton de Vaud. Tout d'abord, la définition d'une sécurité d'enneigement fixée à 100 jours du 1^{er} décembre au 15 avril avec au minimum 30 cm de neige est une définition qui privilégie l'altitude. En effet, plus les stations sont situées à haute altitude plus leur enneigement est assuré. Ceci n'est pas incorrect mais ne reflète pas toute la réalité des conditions permettant l'enneigement minimal requis pour la pratique du ski alpin. De plus, ces études ne se sont intéressées qu'aux domaines skiables. Aucune étude importante ne s'est intéressée à la sécurité de l'enneigement pour les autres activités touristiques extérieures telles le ski nordique, les randonnées en raquettes, la luge, etc.

C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous présentons les différents facteurs qui vont influencer l'enneigement des zones d'activités touristiques en extérieur liées à la neige. Pour ce faire, nous avons procédé à des entretiens semi-directifs auprès des responsables techniques, des pisteurs, des responsables administratifs et/ou des directeurs des remontées mécaniques et/ou des centres nordiques des Alpes et du Jura vaudois. Au total 21 personnes ont été rencontrées.

4.2. FACTEURS INFLUENÇANT L'ENNEIGEMENT

Suite à nos entretiens, il ressort clairement que de nombreux facteurs déterminent l'enneigement minimal nécessaire à la pratique des activités touristiques extérieures. Nous les avons classés en neuf facteurs distincts. Pour la plupart de ces facteurs, il est difficile de définir de manière précise leur impact en

termes quantitatifs sur l'enneigement total. Ce d'autant plus qu'ils sont généralement couplés les uns aux autres. Par ailleurs, il arrive fréquemment qu'une zone d'activité, telle une piste de ski, ait plusieurs types d'un seul facteur qui se succèdent de haut en bas, notamment en termes de type de sol ou d'orientation.

4.2.1. Précipitations hivernales régionales

Au chapitre 2, nous avons présenté les différences régionales des précipitations (figure 2.1.1, 2.1.2 et 2.1.3). Il en ressort que certaines régions sont bien plus arrosées que d'autres. En hiver, si les températures sont négatives ou proche de 0°C, les régions qui bénéficient de quantités de précipitations importantes auront ainsi plus rapidement l'enneigement permettant la pratique des activités extérieures liées à la neige. Il faut cependant toujours garder à l'esprit que, sous nos latitudes, les quantités de précipitations varient fortement d'une année à l'autre.

4.2.2. Qualité de la neige

Il existe une multitude de types de neige fraîche qui vont essentiellement dépendre de la température de l'air au moment des précipitations. La neige se forme dans l'atmosphère à des températures inférieures à 0°C mais peut traverser des couches d'air de plus de 0°C sans fondre. Dans ce genre de situation, la limite de l'enneigement se situe ainsi en générale 300 m en dessous de l'isotherme 0°C (Fauve et al., 2002). Plus l'air est chaud, plus la neige est humide, compacte et lourde (figure 4.2.1).

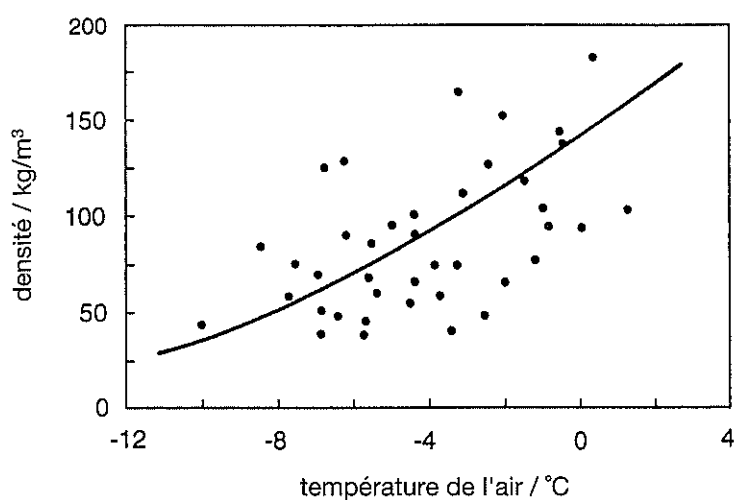


Figure 4.2.1 : Influence de la température de l'air sur la densité de la neige fraîche (Pomeroy and Gray, 1995 modifié par Fauve et al., 2002)

Deux méthodes principales permettent aux spécialistes de comparer le type de neige : la température et la densité. Une neige à -10°C, par exemple, sera extrêmement poudreuse. Lors du damage d'une piste de ski alpin, par exemple, il faut compter sur une perte de 80% de son épaisseur. Selon les spécialistes, la meilleure neige est celle qui a une température de -3°C, ce qui entraîne une perte de 50% de son épaisseur lors du damage. La densité moyenne de la neige d'une piste de ski alpin se situe entre 400 et 500 kg/m³. La densité de la neige fraîche naturelle varie entre 20 et 300 kg/m³ avec une moyenne à 100

kg/m³. La neige artificielle, quant à elle, a une densité comprise entre 300 et 500 kg/m³ (Fauve et al., 2002).

Les données de neige fournies tous les jours par les stations de mesures d'enneigement n'indiquent ni la température de la neige, ni sa densité. L'usage des données de hauteur de neige tel quel pose ainsi problème. Ce d'autant plus qu'après quelques jours, la neige se tasse naturellement et son épaisseur diminue.

4.2.3. Vent

Une zone d'activités sportives hivernales exposée au vent comme une crête par exemple nécessitera plus de neige tombée qu'une autre entourée de forêt. En effet, le vent déplace la neige et diminue les quantités de neige des zones exposées. Il est cependant possible de les protéger en créant des barrières à vent, soit par la pose de filets, soit en construisant des tas de neige. Ceci peut se faire de manière artificielle à l'aide de canons à neige ou en déplaçant la neige naturelle.

Le vent a également une influence sur la température de la neige. Plus le vent est fort, plus l'échange thermique sera important. La température de l'air en cas de vent joue bien évidemment un rôle important. Par vent chaud, tel le fœhn, le processus de fonte en surface est considérablement accéléré alors qu'un vent fort par températures basses accentue le refroidissement (Fauve et al., 2002).

4.2.4. Altitude

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) (cf. chapitre 2), les zones d'activités touristiques extérieures hivernales de haute altitude sont moins exposées à la fonte de la neige ou aux précipitations sous forme de pluie. Avec la poursuite de l'augmentation moyenne des températures observées en Suisse depuis 1970, la limite du 0°C va monter en altitude ce qui aura pour corollaire de décaler la limite moyenne de l'enneigement de 86 m / 10 ans (cf. chapitre 3).

4.2.5. Rayonnement solaire et orientation

Les zones d'activités touristiques en plein air peuvent recevoir deux types de rayonnement : le rayonnement solaire à ondes courtes (ultra-violet) qui provient directement du soleil et le rayonnement terrestre à ondes longues (infrarouge). En cas de couverture nuageuse, le rayonnement infrarouge se réverbère dans les nuages et contribue à chauffer. Durant la journée, la perte d'énergie par rayonnement infrarouge est compensée en partie par l'apport du rayonnement solaire direct. Même en cas de couverture nuageuse, une partie des rayons solaires atteignent la surface neigeuse.

Le rayonnement net est généralement utilisé pour comprendre l'influence des rayonnements ultra-violet et infrarouge sur les propriétés de la neige. Celui-ci correspond à la différence entre le rayonnement solaire à ondes courtes et celui à ondes longues émis et captés (Fauve et al., 2002). Si cette différence est positive, soit que la surface neigeuse reçoit plus de rayonnement qu'elle n'en émet, sa température

augmente. À l'inverse, sa température diminue lorsque le bilan est négatif. La neige réagit cependant différemment si sa température est inférieure à 0°C ou exactement de 0°C. Dans le premier cas, elle va simplement se réchauffer lors d'un rayonnement net positif et se refroidir lorsqu'il est négatif. Par contre, si elle a une température de 0°C, elle commence à fondre en surface lorsque le rayonnement net est positif et à geler s'il est négatif (Fauve et al., 2002). Ce dernier phénomène se produit généralement les nuits sans nuage. La température de la masse d'air accentuera ou réduira bien évidemment le processus de gel ou de fonte.

Le rayonnement solaire direct hivernal varie suivant les mois de l'année et les heures de la journée. En décembre, il est de 83 W/m² et augmente jusqu'en avril pour atteindre 1045 W/m² (Rey, 1986). Il en résulte un apport calorifique bien moins important durant les mois d'hiver. 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.

Le type de neige joue un rôle sur l'absorption et la réflexion du rayonnement solaire. 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).

L'orientation et le degré de déclivité d'une pente ont un effet sur le rayonnement direct du soleil qu'une zone d'activités touristiques recevra. Durant le mois de décembre, par exemple, une zone 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). Les orientations nord et est, quant à elles, ne subissent qu'un faible rayonnement solaire en hiver. Cela a pour conséquence que la neige y restera plus longtemps poudreuse.

Il est à noter que les zones d'activités sportives orientées au sud et à l'ouest sont généralement plus appréciées des touristes car elles sont plus ensoleillées.

4.2.6. Type de sol

Le type de sol, ou la rugosité du sol, affecte considérablement les besoins minimaux en enneigement. Un pierrier nécessite, par exemple, une couverture neigeuse quatre à six fois plus importante qu'une prairie uniforme. Nous les avons répertoriés en sept types différents que l'on retrouve dans les Alpes et le Jura vaudois.

Marais ou prairie uniforme et sans cailloux avec < 10% de pente

Les marais ou prairies peu pentues sont des terrains qui ne nécessitent que peu de neige (5 – 7 cm de neige tassée) voire pas du tout. En effet, avec une bonne couche de givre, il est possible d'y skier. Ces sols n'ont pas de cailloux. Pour le ski alpin, ils présentent le désavantage de ne pas être pentus. Ils seront dès lors plus favorables à d'autres activités telles le ski de fond, les raquettes à neige, etc.



Figure 4.2.2 : Marais

Prairie uniforme et sans cailloux

Les prairies uniformes et sans cailloux sont des terrains qui nécessitent peu d'enneigement, 10 – 15 cm de neige tassée pour le ski alpin, par exemple, tout en pouvant être pentus. Il est cependant délicat de n'avoir que ce type de terrain en termes de paysages et de biodiversité comme nous le mentionnons au point 4.3.

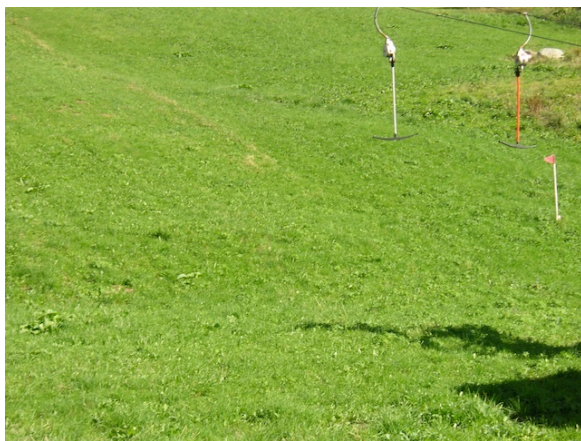


Figure 4.2.3 : Prairie uniforme et sans cailloux

Glacier

Les glaciers sont évidemment très intéressants en terme d'enneigement car, le sol étant gelé, la neige qui tombe s'y accumule facilement. Les crevasses sont par contre un problème car, suivant leur profondeur, elles ont besoin de grandes quantités de neige pour être comblées. Des travaux d'aménagement ou le tracé des pistes et chemins doivent être prévus en conséquence.

Avec le changement climatique et le retrait des glaciers, certaines zones d'activités touristiques qui se trouvaient anciennement sur de la glace se situent actuellement sur du rocher et des pierriers, ce qui a des conséquences sur l'enneigement minimal requis pour la pratique des activités sportives.

S'il n'y a pas de crevasses et que le glacier est homogène, 15 – 20 cm de neige tassée suffisent pour skier.



Figure 4.2.4 : Glacier (à gauche) et rocher et pierrier après le retrait du glacier (à droite)

Bordure de forêt

Nous entendons par bordure de forêt les espaces qui ont des troncs coupés ou qui sont défrichés. Les zones dessouchées deviennent des prairies ou des pâturages. La hauteur des souches va évidemment influencer les besoins minimaux en enneigement. En moyenne, 15 – 25 cm de neige tassée suffisent pour le ski alpin.

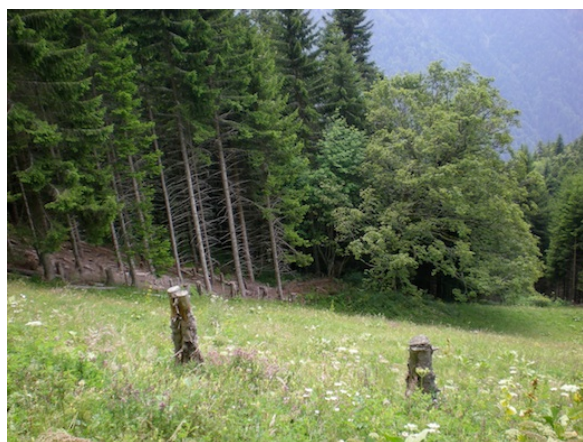


Figure 4.2.5 : Bordure de forêt

Pâturage sans gros cailloux

Nous distinguons les pâturages sans gros cailloux des prairies car ceux-ci ne présentent pas un sol uniforme contrairement aux prairies. Le bétail crée de petites terrasses tout au long de la pente ce qui amène de fortes irrégularités au sol. Les besoins minimaux en enneigement sont donc plus importants. Une piste de ski qui est traversée par une route carrossable a également besoin de plus de neige car il y a rupture dans la pente. Des aménagements sont parfois prévus afin de supprimer cette rupture. Ceci a lieu, par exemple, lorsque la route traverse la piste d'un télésiège. Les routes peuvent par contre être appréciées pour y faire passer les sentiers raquettes ou les pistes de ski de fond. En règle générale, 25 –

40 cm de neige damée sont suffisants pour l'ouverture d'une piste de ski alpin sur un pâturage sans gros cailloux.



Figure 4.2.6 : Pâturage sans gros cailloux (à gauche) et pâturage traversé par une route (à droite)

Pâturage avec gros cailloux

En plus des terrasses dues au piétinement du bétail, les gros cailloux présentent des obstacles à un enneigement optimal. Plus le sol d'une piste est mouvementé, plus il nécessite de neige. L'on compte un minimum de 45 – 60 cm de neige damée pour skier sur ce type de sol.

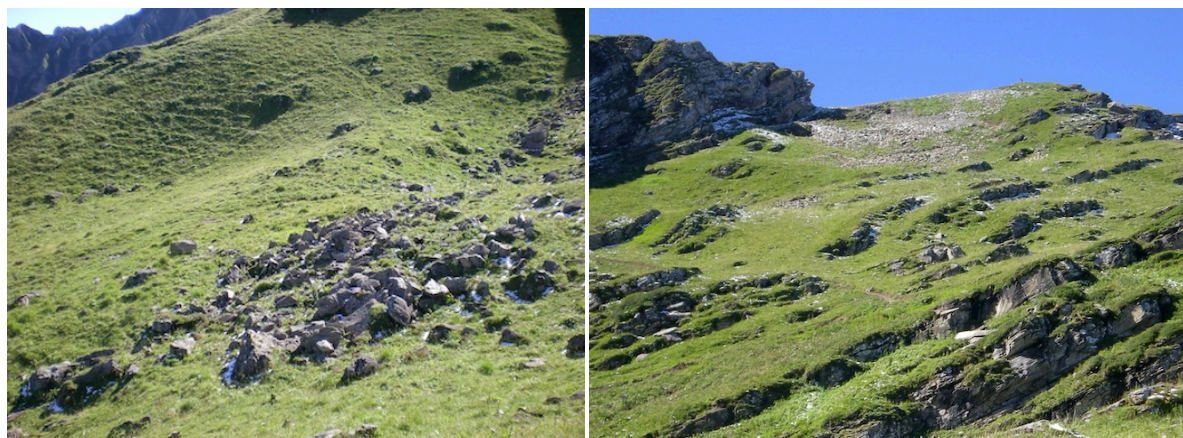


Figure 4.2.7 : Pâturages avec gros cailloux (à gauche) et pâturage non uniforme (à droite)

Pierrier

Il existe différents types de pierriers. Les pierriers avec de petites pierres sont évidemment plus favorables que ceux avec de gros rochers. Les pistes sur pierriers se situent le plus généralement à haute altitude. Il faut un minimum de 60 cm de neige tassée pour pouvoir skier sur pierrier.



Figure 4.2.8 : Pierrier avec petites pierres (à gauche) et avec de gros rochers (à droite)

Besoins minimaux en enneigement par type de sol

La table 4.2.1 résume les besoins en enneigement qui permettent l'ouverture des pistes de ski alpin en fonction du type de sol. Les autres activités touristiques extérieures liées à la neige demandent le plus souvent moins de neige. Le ski nordique, par exemple, requiert environ 15 cm de neige damée puisque les pistes sont généralement peu pentues et évitent les terrains trop tourmentés.

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

Table 4.2.1 : Types de sol et besoins minimaux en neige fraîche à -3°C [cm] et correspondance en neige damée [cm]

Profil fréquent dans les Alpes et le Jura vaudois

La plupart des pistes de ski alpin des Alpes et du Jura vaudois sont sur pâturages, avec ou sans gros cailloux, ou sur prairies. Cependant, certains hauts de pistes des Alpes vaudoises sont situés sur des pierriers.

Le ski nordique, les raquettes à neige, les tours en chiens de traîneaux, le ski jöring, etc. se pratiquent essentiellement sur des pâturages enneigés, des bordures de forêts voire dans la forêt et des routes forestières ou goudronnées.

La luge et le bob se pratiquent généralement sur des routes enneigées ou sur des pâturages.

4.2.7. Déclivité et largeur de la pente

Les pentes qui présentent une déclivité supérieure à 25%, soit les pistes rouges et noires pour le ski alpin, nécessitent plus de neige. Les skieurs faisant généralement plus de virages sur ce type de pistes, celle-ci est fortement poussée vers l'aval. 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 car les skieurs se répartissent sur un espace réduit. 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, cela nécessite de remonter tous les soirs la neige poussée vers l'aval par les skieurs.

La déclivité est moins importante pour les besoins en enneigement des autres activités sportives hivernales.

4.2.8. Fréquentation

Le nombre de skieurs alpins ou nordiques fréquentant une piste a un effet sur son usure. Il en va de même pour toutes les activités. Ainsi, une zone fortement fréquentée sera rapidement usée. Ce phénomène est cependant plus extrême encore avec le ski alpin vu que les skieurs déplacent de manière accrue la neige sur les côtés et en aval. Il est généralement admis qu'une piste de ski alpin avec deux fois plus de skieurs nécessite deux fois plus de neige à remonter avec les dameuses.

4.2.9. Préparation des pistes

La préparation des pistes de ski alpin a énormément évolué ces dernières années avec l'usage généralisé des dameuses. L'utilisation de câbles permettant de treuiller les dameuses afin qu'elles puissent remonter la neige poussée en aval des pentes raides a également fortement amélioré la qualité des pistes. Enfin, l'utilisation de plus en plus fréquente de GPS dans le but de déterminer les besoins en enneigement précis de chaque zone de pistes est un autre exemple de l'optimisation au maximum de l'usage de la neige. Des projets pilotes sont actuellement en cours dans plusieurs stations des Alpes. La mise à profit maximal de l'enneigement existant est devenue importante pour la plupart des stations de ski alpin.

Bien évidemment un minimum d'enneigement de base sera toujours requis. Par contre, une fois ce seuil atteint, les progrès en matière de préparation des pistes permettent, et permettront certainement encore de manière accrue, de rentabiliser au maximum la neige à disposition.

Les pistes de ski de fond sont également préparées à l'aide de dameuses. En fonction de l'enneigement, il est nécessaire de refaire les traces tous les jours. Ceci permet également d'optimiser au maximum la neige présente.

D'autres activités (pistes de luge, sentiers pour les randonnées en raquettes, etc.) font parfois également l'objet de préparation à l'aide de dameuses. Ceci permet d'offrir de meilleures conditions aux utilisateurs mais également de garder la neige plus longtemps. Le travail effectué est cependant nettement moins régulier que pour le ski alpin et le ski nordique.

4.2.10. Enneigement artificiel

L'enneigement artificiel est la mesure d'adaptation la plus répandue dans les domaines skiables des Alpes suisses (Gonseth, 2008). Durant l'hiver 2007-2008, le pourcentage de la longueur totale des pistes de ski suisses enneigées artificiellement s'est élevé à plus de 30% (figure 4.2.9) (RMS, 2008). Pourtant, les études qui se sont intéressées à la viabilité des domaines skiables suisses (Abegg, 1996; Abegg et al., 2007; Bürki, 2000; Elsasser and Buerki, 2002; Koenig and Abegg, 1997; Müller and Weber, 2008; OcCC-ProClim, 2007) 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 que l'enneigement artificiel a été inclus dans les analyses (Scott et al., 2006).

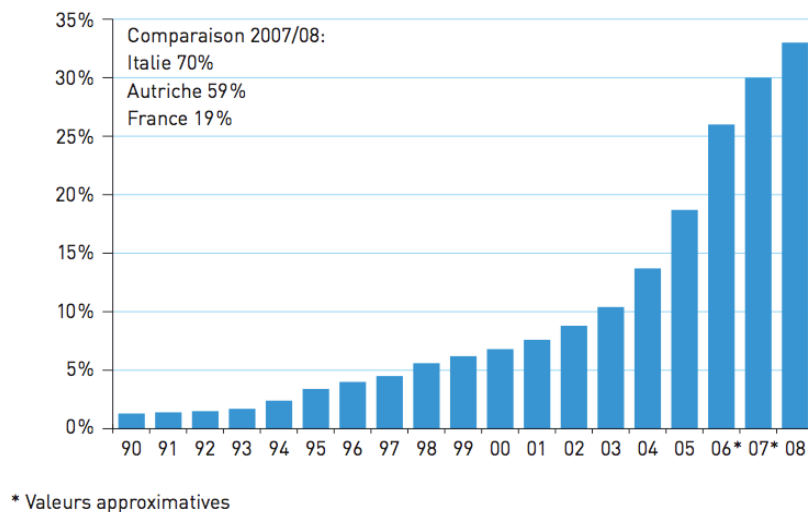


Figure 4.2.9 : Part des pistes enneigées techniquement sur l'ensemble de la surface de pistes préparées en Suisse (RMS, 2008)

Les responsables des remontées mécaniques des Alpes et du Jura vaudois mentionnent plusieurs raisons qui les ont poussés à opter pour l'enneigement mécanique :

- créer une couche de fond,
- garantir de la neige aux périodes clés (début de saison, vacances de Noël et de février),

- garantir de la neige jusqu'à la station ou sur des pistes qui font la jonction avec d'autres parties du domaine,
- enneiger des zones de pistes qui manquent régulièrement de neige à cause du type de sol, de l'orientation ou pour d'autres raisons.

Suivant les moyens financiers à disposition et les besoins en enneigement, les acteurs concernés des Alpes et du Jura vaudois ont privilégié des enneigeurs à basse pression ou à haute pression (figure 4.2.10). Les premiers sont généralement posés sur roulettes et déplaçables sur les pistes en fonction des besoins alors que les seconds sont des lances fixes situées au bord de la piste.



Figure 4.2.10 : Enneigeurs à basse pression (à gauche) et à haute pression (à droite)

Plusieurs aspects sont à considérer lors d'un enneigement artificiel. Premièrement, l'investissement (Dawson et al., 2007) qui, en Suisse, est partiellement assumé par les collectivités publiques. Le canton de Vaud, par exemple, fait partie des cantons où les investissements dans des installations d'enneigement artificiel dépendent jusqu'à maintenant le plus fortement de l'aide publique (Gonseth, 2008).

Deuxièmement, il faut considérer l'impact écologique de l'enneigement artificiel. L'utilisation de ressources en eau peut s'avérer problématique pour une station qui voit déjà sa demande en eau croître avec l'arrivée des touristes. Il peut donc y avoir conflit d'usage en période de pointe hivernale (Badré et al., 2009). L'utilisation d'additifs pose également problème, mais pour la flore. En effet, l'ajout d'additif rend les prairies plus grasses et change ainsi leur composition. Il est à noter qu'en France, l'usage des additifs a été banni (Badré et al., 2009) et que, selon les spécialistes consultés dans les Alpes et le Jura vaudois, ils ne sont pas utilisés. Les raisons mentionnées sont essentiellement liées aux coûts supplémentaires qu'ils génèrent. La fonte plus tardive de la neige artificielle par rapport à la neige

naturelle peut également altérer la composition de la végétation (Teich et al., 2007). L'énergie utilisée pour fabriquer de la neige artificielle est également à prendre en considération dans le bilan global des impacts environnementaux.

Troisièmement, plusieurs études (p. ex. Scott et al., 2003; Scott et al., 2007b; Scott et al., 2006; Steiger, 2007; Steiger and Mayer, 2008) montrent qu'il est important de tenir compte du changement climatique si l'on souhaite évaluer la viabilité de l'enneigement artificiel. Le changement climatique va directement affecter l'enneigement artificiel futur 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. Des températures moyennes plus chaudes vont réduire la durée et le nombre de possibilités de fabriquer de la neige artificielle et augmenter le coût de l'enneigement artificiel à moyen terme. A court terme, l'augmentation moyenne des températures pourrait être compensée par les nouvelles générations de canons à neige permettant la production de neige artificielle à des températures plus élevées et consommant moins d'énergie. Cependant, à moyen terme, même des canons à neige de nouvelles générations ne suffiront probablement pas à palier l'augmentation des températures à basse et moyenne altitude.
4. Les changements dans les régimes hydrologiques et de précipitations (plus de ruissellement prévus durant les mois d'hiver) vont affecter l'offre en eau disponible pour l'enneigement artificiel.

De nos jours, l'enneigement artificiel est garanti sous nos latitudes aux altitudes supérieures à 1000 m de décembre à février pour 90 % de la durée des hivers (Steiger and Mayer, 2008). Avec l'augmentation des températures prévues, le nombre de jours potentiels favorables à la production de la neige artificielle diminuera (Hennessy et al., 2008; Pickering and Buckley, 2010; Scott and Dawson, 2007; Scott et al., 2007a; Scott and McBoyle, 2007; Scott et al., 2003; Scott et al., 2007b; Scott et al., 2006; Steiger, 2007; Steiger and Mayer, 2008; Teich et al., 2007). Le problème se posera essentiellement pour le début de saison car, avec une augmentation de 2°C (soit approximativement pour 2050), 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 and Mayer, 2008). Cependant, il est fort probable que ça ne soit pas la diminution du nombre de jours potentiels pour la fabrication de la neige artificielle qui sera le plus problématique pour les domaines skiables. Le premier facteur limitant sera plus vraisemblablement l'augmentation des coûts liés à la production de neige artificielle (Pickering and Buckley, 2010; Scott et al., 2007b; Steiger, 2010; Steiger and 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.

4.3. INFLUENCE DES AMÉNAGEMENTS LIÉS AUX ACTIVITÉS TOURISTIQUES HIVERNALES SUR LES AUTRES SAISONS

Nous avons montré ci-dessus que de multiples facteurs influencent l'enneigement d'une zone d'activités hivernales liées à la neige. Il serait faux de penser qu'il suffit dès lors d'associer les meilleures conditions de chaque facteur pour obtenir la zone d'activités idéale. Certains facteurs sont, en effet, contradictoires. Par exemple, les aires situées sur les versants nord sont, comme nous l'avons mentionné, plus favorables à l'enneigement. Par contre, elles sont moins attrayantes pour les touristes qui privilégient le plus souvent les zones ensoleillées. D'autre part, certains aménagements ne sont pas sans conséquences sur le paysage. La création de lacs artificiels pour la fabrication de la neige artificielle ou de tranchées rectilignes au milieu des forêts sont des exemples parmi d'autres de modifications importantes du paysage liées au ski alpin. De plus, le passage des machines de chantier qui préparent le sol des pistes de ski alpin durant les saisons de printemps, d'été et/ou d'automne rend les zones de montagnes concernées peu attractives pour les touristes.

Des compromis sont donc à trouver entre écologie, protection du paysage et activités estivales d'une part, et intérêts pour les pistes de ski alpin et les autres activités touristiques hivernales d'autre part.

4.4. MESURES D'ADAPTATION

Même si les résultats des tables 4.1.1 et 4.1.2 sont à reconsidérer pour la région vaudoise, il est clair que la tendance générale est à l'augmentation des températures et à la diminution de l'enneigement des stations de basses et moyennes altitudes. Ces stations touristiques doivent dès lors songer à mettre en place des stratégies d'adaptation si elles veulent pouvoir survivre dans un avenir plus ou moins proche (Elsasser and Buerki, 2002; Elsasser and Messerli, 2001). La figure 4.1.1 illustre les options qui ont actuellement été répertoriées (Elsasser and Buerki, 2002). Elles sont classées en deux catégories, celles proposant le maintien du ski et celles proposant son remplacement par d'autres activités hivernales et/ou en développant plus les autres saisons.

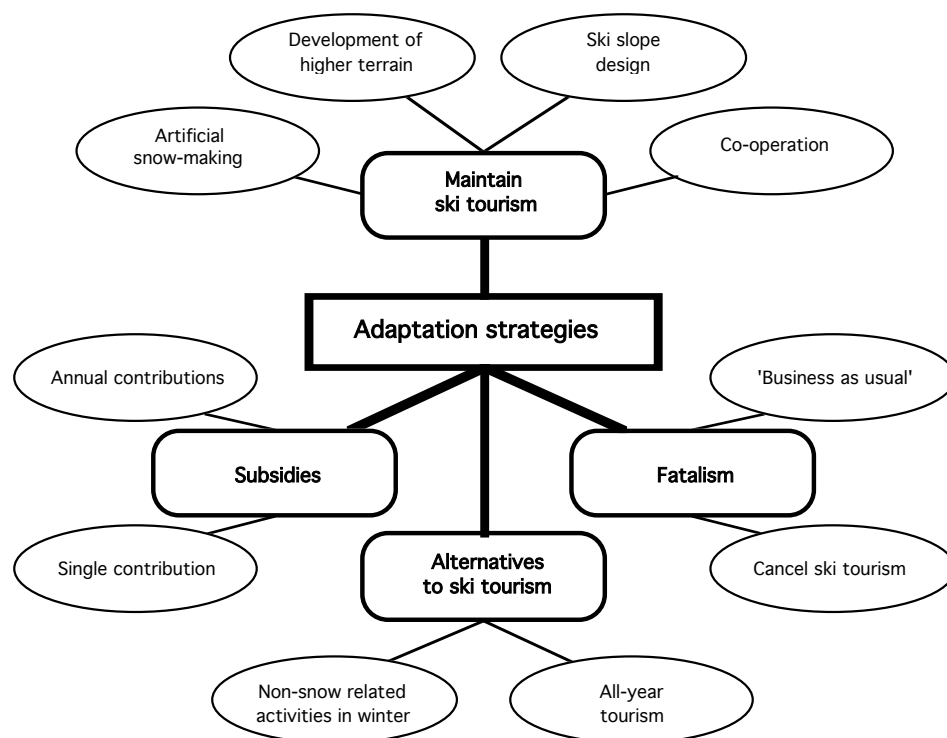


Figure 4.4.1 : Stratégie d'adaptation des stations de ski (Elsasser and Buerki, 2002)

4.5. SYNTHÈSE PROVISOIRE

Les études concernant la viabilité des remontées mécaniques se sont jusqu'ici essentiellement basées sur des critères d'enneigement liés à l'altitude. De nombreux autres facteurs sont pourtant à prendre en considération : caractéristiques régionales des précipitations hivernales, qualité de la neige, vent, rayonnement solaire et orientation, type de sol, déclivité et largeur de la pente, fréquentation, préparation des pistes et enneigement artificiel. La réalité est plus complexe que sa réduction au seul facteur altitudinal. Parmi ces autres facteurs, plusieurs sont favorables aux Alpes et Jura vaudois situés par ailleurs à altitude relativement basse.

Avec l'augmentation des températures et la diminution de l'enneigement dans les stations de basse et moyenne altitude, les stations touristiques mettent en place depuis plusieurs années des stratégies d'adaptation pour pouvoir poursuivre les activités durant les prochaines décennies.

L'enneigement artificiel est actuellement la mesure d'adaptation la plus répandue dans les domaines skiables des Alpes suisses, même s'il implique certains aspects négatifs (investissements et coûts supplémentaires, impacts environnementaux). De nos jours, l'enneigement artificiel est garanti sous nos latitudes aux altitudes supérieures à 1000 m de décembre à février pour 90 % de la durée des hivers. Avec l'augmentation des températures prévues, le nombre de jours potentiels favorables à la production de la neige artificielle diminuera. Le problème se posera essentiellement pour le début de saison car, avec une augmentation de 2°C (soit approximativement pour 2050), 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. Le premier facteur limitant sera plus vraisemblablement l'augmentation des coûts liés à la production de neige artificielle que les limites climatique de sa fabrication.

5. PERSPECTIVES POUR L'ÉTÉ

5.1. RÉORIENTATION DES DESTINATIONS DES TOURISTES LIÉE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Avec une augmentation générale des températures et du nombre de journées caniculaires, plusieurs études (Amelung and Viner, 2006; Ceron and Dubois, 2000; Hamilton et al., 2005; Perch-Nielsen et al., 2010; Rutty and Scott, 2010) prévoient une réorientation des destinations des touristes lors des grandes chaleurs (juin – juillet – août). 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 5.1.1).

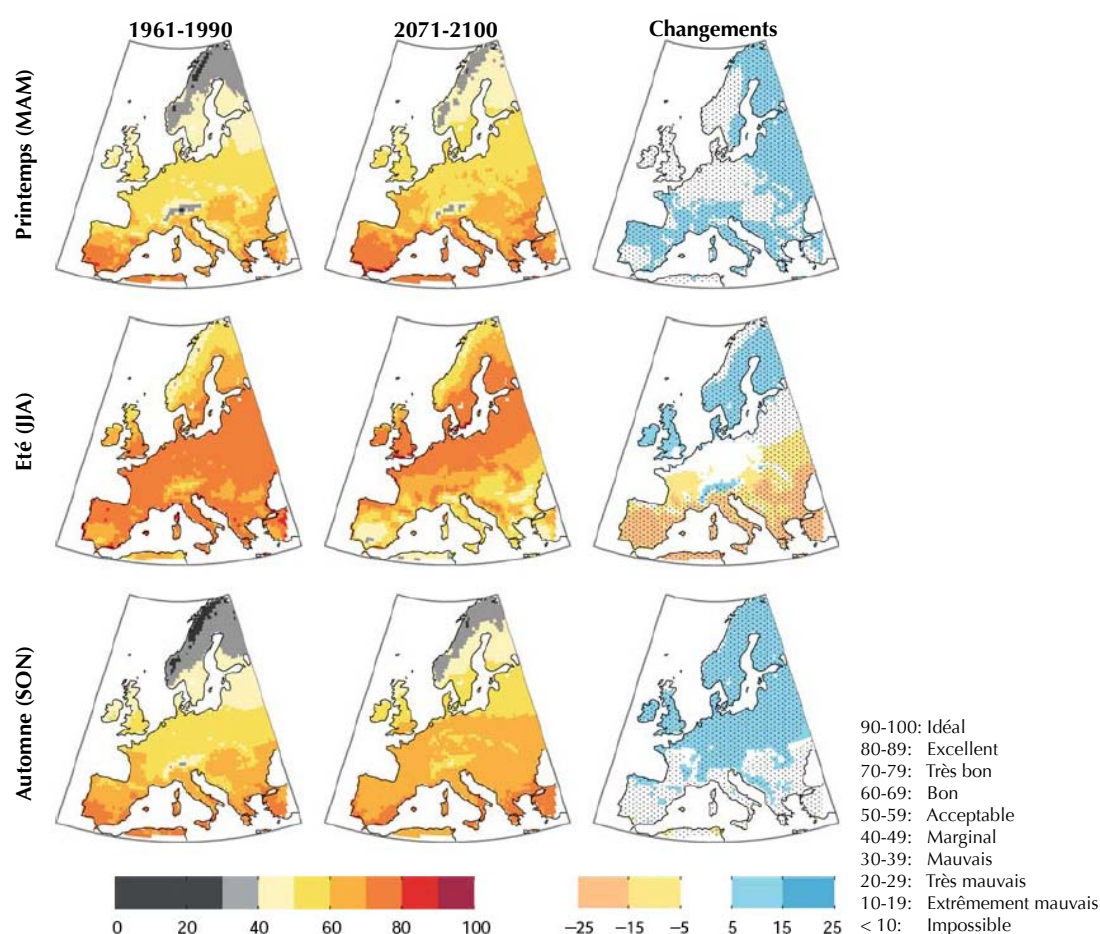


Figure 5.1.1 : Evolution des conditions climatiques favorables aux pratiques touristiques estivales en Europe et en Afrique du Nord (Perch-Nielsen et al., 2010). Pour chaque saison (printemps (mars – avril – mai), été (juin – juillet – août), automne (septembre – octobre – novembre)), la situation de 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).

5.2. IMPACT DE L'AUGMENTATION DES TEMPÉRATURES ET DES PÉRIODES CANICULAIRES SUR LE TOURISME DES ALPES ET DU JURA VAUDOIS

Afin de déterminer si les périodes de grandes chaleurs auront bien une influence sur la fréquentation touristique de montagne, les manifestations potentielles de l'impact actuel de l'augmentation des températures et des périodes caniculaires sur le tourisme de montagne ont été analysées. Cette étude (Serquet and Rebetez, à paraître) analyse l'impact des journées chaudes sur la fréquentation hôtelière des hôtes suisses de toutes les stations de montagne qui offrent plus de 500 lits.

Les résultats montrent que la fréquentation hôtelière dans les Alpes vaudoises est en augmentation lors de températures élevées en plaine. Ceci ressort essentiellement en juin, qui est le mois avec la durée de séjour moyen la plus courte. Les Alpes vaudoises réagissent plus fortement que d'autres régions (Grisons et Alpes valaisannes) plus éloignées des grands bassins de population. L'étude montre ainsi que la proximité des stations de montagne à un bassin de population joue un rôle important. Les Alpes et le Jura vaudois sont dès lors tout particulièrement concernés, avec une augmentation des nuitées durant les périodes de grandes chaleurs.

A l'heure actuelle, ce sont les séjours courts et réservés à la dernière minute qui sont les plus susceptibles de croître lors de fortes températures en plaine lorsque les touristes sont attirés par la fraîcheur des montagnes⁶.

5.3. IMPACT DU RETRAIT DES GLACIERS ET DE LA FONTE DU PERGÉLISOL SUR LE TOURISME DES ALPES VAUDOISES

Une des conséquences majeures de l'augmentation des températures sur les zones de hautes montagnes est la fonte des glaciers (figure 5.3.1) et du pergélisol. Le Jura vaudois n'est pas concerné. Pour les Alpes vaudoises, seule la région qui part du massif des Diablerets jusqu'aux Dents de Morcles l'est (figure 5.3.2).

⁶ Afin d'affiner ces résultats, une analyse des conditions météorologiques quotidienne sur la fréquentation des Alpes et du Jura vaudois est en cours.

Mesures des variations de longueur entre 1884 et 2009

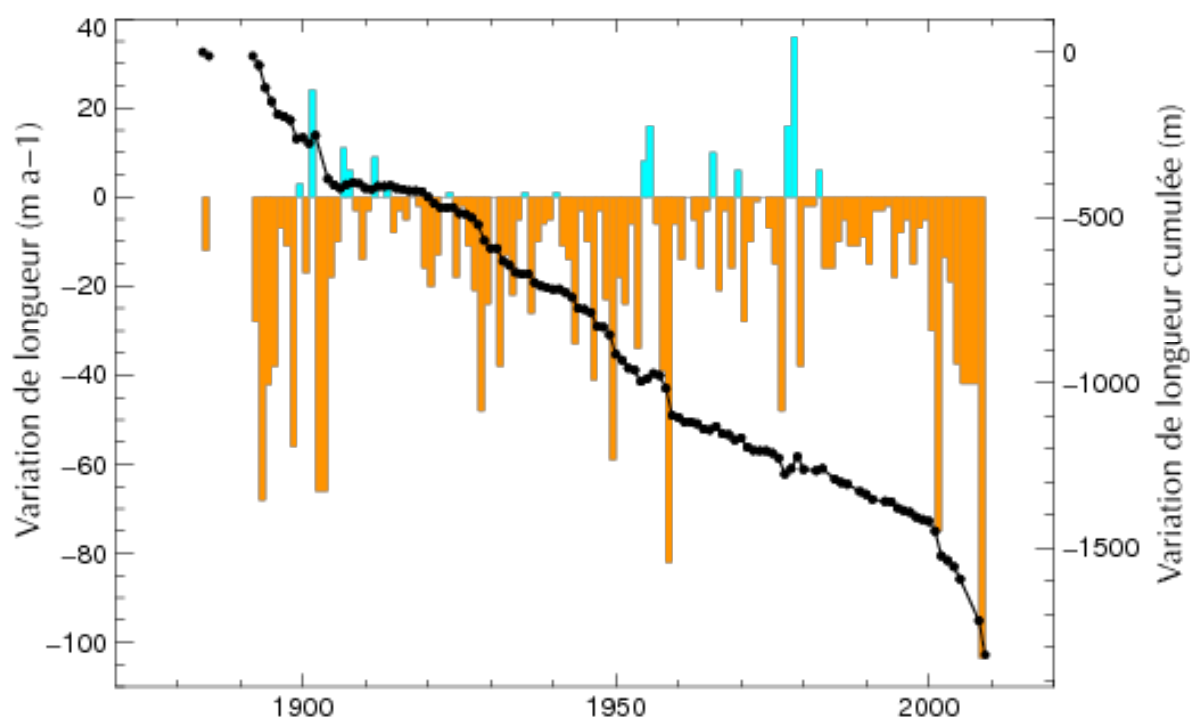


Figure 5.3.1 : Mesures des variations de longueur [m/année et m] du glacier de Tsanfleuron entre 1884 et 2009 (source : ETHZ - VAW, Réseau suisse des observations glaciaires <http://glaciology.ethz.ch/messnetz/index.html>)

Le recul des glaciers combiné à la fonte des zones de pergélisol et des modifications thermiques atteignant de plus grandes profondeurs dans des parois gelées devraient augmenter le nombre d'éboulements et leur ampleur (OcCC-ProClim, 2007).

Au niveau touristique, la fonte des glaciers du massif des Diablerets jusqu'aux Dents de Morcles pourrait amener une perte de l'attractivité paysagère. De plus, des éboulements de grande ampleur pourraient potentiellement causer des dégâts aux infrastructures touristiques. Les risques qui sont les plus probables dans les prochaines années pour cette région sont cependant plutôt liés à l'accroissement des précipitations extrêmes qui, si elles tombent sur des zones de pergélisol dégelé, risquent d'emporter le matériel devenu meuble et de former des glissements de terrain, des éboulements ou des laves torrentielles. Si ces dernières atteignent les zones d'activités touristiques ou leurs accès, des dégâts sont à prévoir.

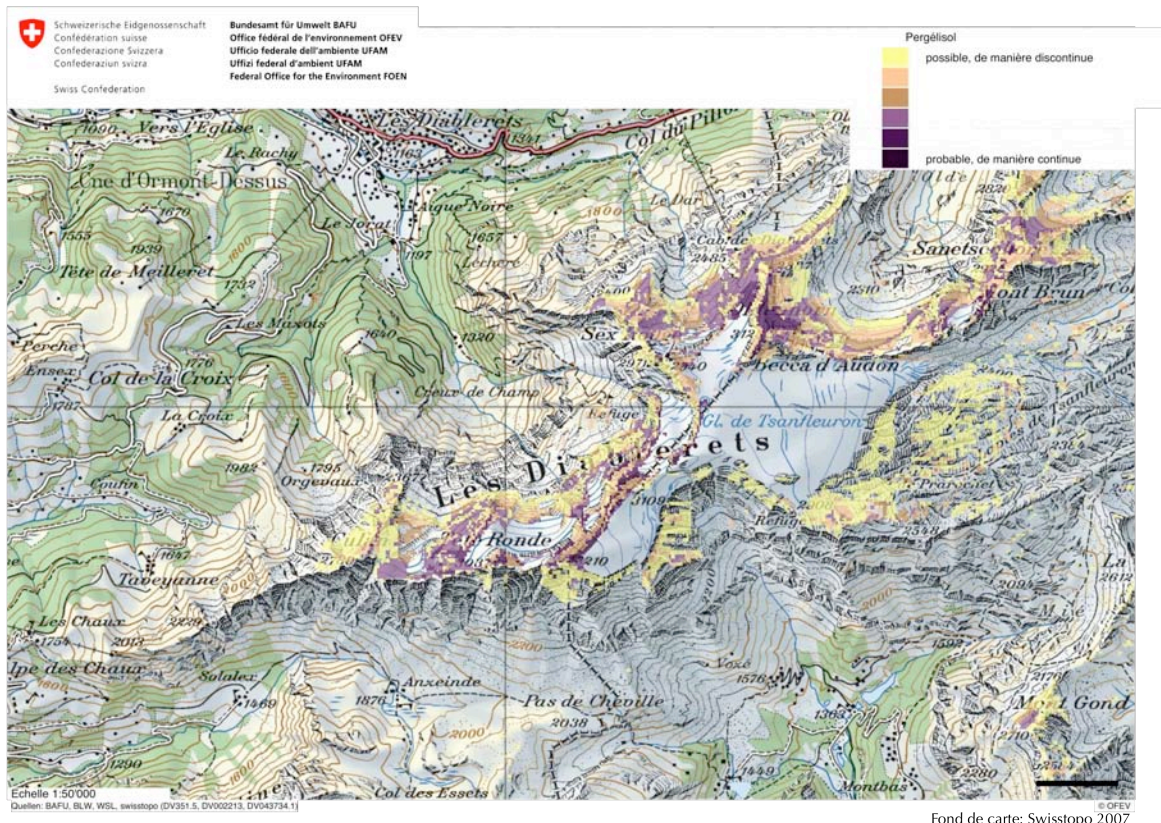


Figure 5.3.2 : Zones de pergélisol possibles et probables autour du massif des Diablerets (source : BAFU, BWL, Swisstopo
http://umweltzustand.admin.ch/?reset_session&initialState=permafrost&lang=fr)

5.4. SYNTHÈSE PROVISOIRE

A l'heure actuelle, en été, ce sont les séjours courts et réservés à la dernière minute qui sont les plus susceptibles de croître lors de températures élevées en plaine. Les touristes sont attirés par la fraîcheur des montagnes. Ce phénomène se manifeste particulièrement en juin. La proximité des stations de montagne à un bassin de population joue un rôle important. Les Alpes vaudoises et le Jura vaudois sont dès lors tout particulièrement bénéficiaires de ces séjours estivaux.

Une des conséquences majeures de l'augmentation des températures sur les zones de hautes montagnes est la fonte des glaciers et du pergélisol qui devrait augmenter le nombre d'éboulements et leur ampleur. L'accroissement des précipitations extrêmes aura aussi des conséquences négatives importantes car, si elles tombent sur des zones de pergélisol dégelé, elles peuvent emporter le matériel devenu meuble et former des glissements de terrain, des éboulements ou des laves torrentielles.

Au niveau touristique, cela pourrait entraîner d'une part une perte de l'attractivité paysagère et d'autre part, suite à des éboulements de grande ampleur, des dégâts aux infrastructures et potentiellement à l'image des stations.

6. SYNTÈSE GÉNÉRALE PROVISOIRE (2010)

On s'attend à la poursuite de l'augmentation des températures observée en Suisse depuis le milieu des années 1970, soit environ 0.57°C par décennie en moyenne annuelle, 0.38°C par décennie en hiver et 0.86°C par décennie en été. On s'attend également à une augmentation particulièrement importante du nombre de jours très chauds en été.

Cette évolution aura pour conséquence une nette augmentation de la durée des conditions « estivales » en montagne avec des possibilités d'extension des activités touristiques de cette saison. Cette augmentation concernera particulièrement les altitudes des stations des Alpes et du Jura vaudois. Les stations les plus proches des importants bassins de population du Moyen-Pays seront particulièrement concernées par les visites d'une clientèle fuyant les périodes de canicules en plaine.

On s'attend à la poursuite de la diminution de la part des précipitations neigeuses par rapport au total des précipitations hivernales. Cette diminution est la plus forte à basse altitude, modérée à altitude moyenne et, pour l'instant, inexistante en hiver à haute altitude où l'on continuera toutefois d'observer une grande variabilité d'une année à l'autre. L'augmentation de la température depuis le milieu des années 1970 implique un décalage de l'enneigement hivernal de l'ordre de 86 m par décennie. De 1979 à 2008, on a mesuré une diminution de la proportion des précipitations neigeuses hivernales de 6 à 13 % par décennie aux altitudes situées entre 800 et 1100 m et de 4 à 10 % par décennie entre 1100 et 1400 m. A toutes les altitudes, la variabilité, d'un mois à l'autre et d'une année à l'autre, est importante et elle le restera au moins autant à l'avenir.

En moyenne, la fréquence des précipitations hivernales est relativement élevée dans les Alpes et le Jura vaudois qui constituent les premiers reliefs face aux perturbations arrivant de l'ouest. La différence est particulièrement marquée par rapport aux stations valaisannes ou grisonnes.

Indépendamment des paramètres climatiques, les activités liées à la neige dépendent également de nombreux autres paramètres, par exemple du type de sol ou de la proximité d'importants bassins de populations et des grands axes. Ces paramètres sont pour la plupart favorables aux Alpes vaudoises. Le ski sur des prairies ou des pâturages sans gros cailloux, par exemple, nécessite nettement moins de neige que sur un pierrier.

Concernant la variabilité des précipitations, l'évolution générale va dans le sens d'un risque accru à la fois de précipitations intenses et de périodes de sécheresses estivales. Les Alpes et le Jura vaudois ne présentent pas de vulnérabilité spécifique aux sécheresses, comme c'est le cas pour des régions plus sensibles telles que le Tessin en hiver ou le Haut-Valais en été. En revanche, la vulnérabilité face aux précipitations intenses concerne au premier chef toutes les régions montagneuses, dont les Alpes vaudoises. Le Jura est moins concerné en raison de sa géologie et de l'absence de pergélisol.

Dans les Alpes en général, y compris dans les Alpes vaudoises, dans la région allant du massif des Diablerets jusqu'aux Dents de Morcles et pour toutes les régions en aval de celle-ci, la présence avérée de pergélisol susceptible de fondre constitue une menace supplémentaire de catastrophes naturelles. Cette fonte, conjuguée aux précipitations, peut occasionner des éboulements, glissements de terrain ou

laves torrentielles pouvant momentanément mettre à mal certaines activités touristiques ou l'accès à une station.

Enfin, l'altitude relativement basse du sommet du glacier de Tsanfleuron le place dans une situation très vulnérable face à l'augmentation des températures. Son recul a déjà atteint près de 2000 m depuis le 19^{ème} siècle, se poursuit sans interruption depuis le début des années 1980 et s'est nettement intensifié depuis les années 2000.

Les tables 6.1.1 et 6.1.2 résument les atouts et faiblesses des Alpes et du Jura vaudois mis en évidence dans les chapitres précédents.

Hiver		Eté	
Socio-éco.	Géographique	Atouts	Faiblesses
		Augmentation des températures	
		Augmentation des périodes caniculaires	Augmentation des précipitations extrêmes
		Premiers reliefs à l'ouest	Premiers reliefs à l'ouest
		Moyenne altitude	Moyenne altitude
		Peu de pierriers	Peu de hautes montagnes
			Fonte du glacier de Tsanfleuron
		Proximité	
		Départ de la station indépendant de l'enneigement	
		Télécabines / trains	

Table 6.1.1 : Synthèse provisoire des atouts et faiblesses des Alpes vaudoises

Hiver		Eté	
Socio-éco.	Géographique	Atouts	Faiblesses
		Augmentation des températures	
		Augmentation des périodes caniculaires	Augmentation des précipitations extrêmes
		Premiers reliefs à l'ouest	Premiers reliefs à l'ouest
		Basse altitude	Basse altitude
		Peu de zones favorables aux catastrophes naturelles	Pas de hautes montagnes
		Proximité	

Table 6.1.2 : Synthèse provisoire des atouts et faiblesses du Jura vaudois

7. SUITE DE L'ÉTUDE

En 2011, nous continuerons l'analyse des variables climatiques passées et futures. Nous poursuivrons également l'analyse de l'impact des conditions météorologiques sur la fréquentation touristique. Enfin, nous analyserons les événements climatiques extrêmes survenus ces dernières années afin d'en présenter une synthèse.

Analyses en cours:

- climatologie régionale (ensoleillement)
- variables climatiques passées et futures pour les quatre saisons : suite des recherches concernant l'enneigement, analyse des variables concernant le brouillard et le gel des lac et analyse des variables pour les saisons de printemps et d'automne
- fréquentation touristique des Alpes et du Jura vaudois en lien avec les conditions météorologiques
- liste des catastrophes naturelles des Alpes et du Jura vaudois
- identification des opportunités et menaces du changement climatique pour le tourisme vaudois
- recommandations (scénarios pour le développement de l'offre ou du type de marketing)

8. BIBLIOGRAPHIE

Abegg, B.: 1996, Klimaänderung und Tourismus - Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen, Schlussbericht NFP 31, Zurich.

Abegg, B., Agrawala, S., Crick, F. and de Montfalcon, A.: 2007, 'Climate change impacts and adaptation in winter tourism', in Agrawala, S. (ed.), *Climate Change in the European Alps*, Organ. for Econ, Co-oper. and Dev., Paris, pp. 25-60.

Amelung, B. and 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. and Ribièrre, 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. and Roten, M.: 1997, Répartition spatiale des modifications climatiques dans le domaine alpin, vdf, Zurich.

Begert, M., Schlegel, T. and Kirchhofer, W.: 2005, 'Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000', *Int. J. Climatol.* 25, 65-80.

Bürki, R.: 2000, Klimaänderung und Anpassungsprozesse im Tourismus – dargestellt am Beispiel des Wintertourismus, Publikation der Ostschweizerischen Geographischen Gesellschaft NF H 6, St. Gallen.

Ceron, J.-P. and Dubois, G.: 2000, 'Tourisme et changement climatique', 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.

Dawson, J., Scott, D. and McBoyle, G.: 2007, 'Using an analogue approach to examine climate change vulnerability of the New England (USA) ski tourism industry', in Matzarakis, A., de Freitas, C.R. and Scott, D. (eds.), *Developments in Tourism Climatology*, Freiburg.

Della-Marta, P.M., Haylock, M.R., Luterbacher, J. and Wanner, H.: 2007a, 'Doubled length of western European summer heat waves since 1880', *J. Geophys. Res.-Atmos.* 112.

Della-Marta, P.M., Luterbacher, J., von Weissenfluh, H., Xoplaki, E., Brunet, M. and Wanner, H.: 2007b, 'Summer heat waves over western Europe 1880-2003, their relationship to large-scale forcings and predictability', *Clim. Dyn.* 29, 251-275.

Elsasser, H. and Buerki, R.: 2002, 'Climate change as a threat to tourism in the Alps', *Clim. Res.* 20, 253-257.

Elsasser, H. and Messerli, P.: 2001, 'The Vulnerability of the Snow Industry in the Swiss Alps', *Mountain Research and Development* 21, 335-339.

Environnement-Canada: 2010, '<http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=5FBF816A-1#table1>'.

Fauve, M., Rhyner, H. and Schneebeli, M.: 2002, Préparation et entretien des pistes. Manuel pour le praticien, WSL-SLF Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches, Davos, p. 133.

Gonseth, C.: 2008, Adapting Ski Area Operations to a Warmer Climate in the Swiss Alps through Snowmaking Investments and Efficiency Improvements, EPFL, Lausanne.

Hamilton, J.M., Maddison, D.J. and Tol, R.S.J.: 2005, 'Climate change and international tourism: A simulation study', Global Environmental Change Part A 15, 253-266.

Hantel, M. and Hirtl-Wielke, L.M.: 2007, 'Sensitivity of Alpine snow cover to European temperature', Int. J. Climatol. 27, 1265-1275.

Hennessy, K.J., Whetton, P.H., Walsh, K., Smith, I.N., Bathols, J.M., Hutchinson, M. and Sharples, J.: 2008, 'Climate change effects on snow conditions in mainland Australia and adaptation at ski resorts through snowmaking', Clim. Res. 35, 255-270.

IPCC: 2007a, 'Climate Change 2007. The Physical Science Basis', IPCC, Cambridge.

IPCC: 2007b, 'Europe. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability', IPCC, Cambridge, pp. 541-580.

Jones, P.D. and Moberg, A.: 2003, 'Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001', J. Clim. 16, 206-223.

Koenig, U. and Abegg, B.: 1997, 'Impacts of Climate Change on Winter Tourism in the Swiss Alps', Journal of Sustainable Tourism 5, 46-58.

Latenser, M. and Schneebeli, M.: 2003, 'Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931-99)', Int. J. Climatol. 23, 733-750.

Müller, H. and Weber, F.: 2008, '2030: le tourisme suisse face aux changements climatiques', in Tourisme, S. (ed.), Suisse Tourisme, Berne.

North, N., Kljun, N., Kasser, F., Heldstab, J., Maibach, M., Reutimann, J. and Guyer, M.: 2007, 'Changements climatiques en Suisse – Indicateurs des causes, des effets et des mesures', in l'environnement, O.f.d. (ed.), État de l'environnement n° 0728, OFEV, Berne, p. 77 p.

OcCC-ProClim: 2007, 'Climate Change and Switzerland 2050. Expected Impacts on Environment, Society and Economy'.

Perch-Nielsen, S., Amelung, B. and Knutti, R.: 2010, 'Future climate resources for tourism in Europe based on the daily Tourism Climatic Index', Clim. Change.

Pickering, C. and Buckley, R.: 2010, 'Climate Response by the Ski Industry: The Shortcomings of Snowmaking for Australian Resorts', AMBIO: A Journal of the Human Environment 39, 430-438.

Pomeroy, J.W. and Gray, D.M.: 1995, 'Snowcover: Accumulation, relocation and management', NHRI Science report 7.

- 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', *Clim. Res.* 27, 45-50.
- Rebetez, M.: 2006, *La Suisse se réchauffe*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, p. 140.
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J. and Menzel, A.: 2006, 'Heat and drought 2003 in Europe : a climate synthesis', *Ann. For. Sc.* 63 569–577.
- Rebetez, M. and Reinhard, M.: 2008, 'Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004', *Theoretical and Applied Climatology* 91, 27-34.
- Rey, L.: 1986, 'La neige, ses métamorphoses, les avalanches', ANENA.
- RMS: 2008, 'Faits et chiffres 2008', Remontées Mécaniques Suisses, Berne.
- Rutty, M. and 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. and Appenzeller, C.: 2004, 'The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves', *Nature* 427, 332-336.
- Scherrer, S.C. and Appenzeller, C.: 2006, 'Swiss Alpine snow pack variability: major patterns and links to local climate and large-scale flow', *Clim. Res.* 32, 187-199.
- Schmidli, J. and Frei, C.: 2005, 'Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century', *Int. J. Climatol.* 25, 753-771.
- Scott, D. and Dawson, J.: 2007, 'Climate change vulnerability of the US Northeast ski industry', in Matzarakis, A., de Freitas, C.R. and Scott, D. (eds.), *Developments in Tourism Climatology*, Freiburg.
- Scott, D., Jones, B., Lemieux, C., McBoyle, G., Mills, B., Svenson, S. and Wall, G.: 2007a, 'Vulnerability of winter recreation to the climate change - A Case Study Of The Lakelands Tourism Region (Southern Ontario, Canada)', in Amelung, B., Blazejczyk, K. and Matzarakis, A. (eds.), *Climate Change and Tourism Assessment and Coping Strategies*, Maastricht – Warsaw – Freiburg.
- Scott, D. and McBoyle, G.: 2007, 'Climate change adaptation in the ski industry', *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12, 1411-1431.
- Scott, D., McBoyle, G. and Mills, B.: 2003, 'Climate change and the skiing industry in southern Ontario (Canada): exploring the importance of snowmaking as a technical adaptation', *Clim. Res.* 23, 171-181.
- Scott, D., McBoyle, G. and Minogue, A.: 2007b, 'Climate change and Quebec's ski industry', *Glob. Environ. Change-Human Policy Dimens.* 17, 181-190.
- Scott, D., McBoyle, G., Minogue, A. and 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.

Seneviratne, S.I., Luthi, D., Litschi, M. and Schaer, C.: 2006, 'Land-atmosphere coupling and climate change in Europe', *Nature* 443, 205-209.

Serquet, G. and Rebetez, M.: à paraître, 'Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change', *Clim. Change*.

Serquet, G., Rebetez, M., Dulex, J.-P. and Marty, C.: en cours, 'Seasonal trends and temperature dependance of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland'.

Steiger, R.: 2007, 'Snowmaking - A suitable adaptation strategy? Examples from Tyrol/Austria', in Matzarakis, A., de Freitas, C.R. and Scott, D. (eds.), *Developments in Tourism Climatology*, Freiburg.

Steiger, R.: 2010, 'Climate change impact assessment in Winter tourism', in *Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology*, Berichte des Meteorologischen Instituts des Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, pp. 410-415.

Steiger, R. and Mayer, M.: 2008, 'Snowmaking and Climate Change Future Options for Snow Production in Tyrolean Ski Resorts', *Mountain Research and Development* 28, 292-298.

Stott, P.A., Stone, D.A. and Allen, M.R.: 2004, 'Human contribution to the European heatwave of 2003', *Nature* 432, 610-614.

Teich, M., Lardelli, C., Bebi, P., Gallati, D., Kytzia, S., Pohl, M., Pütz, M. and Rixen, C.: 2007, *Klimawandel und Wintertourismus: Oekonomische und ökologische Auswirkungen von technischer Beschneigung*, [published online 2007] Available from World Wide Web ><http://www.wsl.ch/publikationen/pdf/8408.pdf>< Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, p. 169.

LISTE DES FIGURES

Figure 2.2.1 : Moyenne des précipitations de différentes stations MétéoSuisse des Alpes vaudoises pour la période de référence 1961-1990. Les barres grises représentent la somme des précipitations [mm] et le trait noir le nombre de jours de précipitations.	11
Figure 2.2.2 : Moyenne des précipitations de différentes stations MétéoSuisse du Jura vaudois pour la période de référence 1961-1990. Les barres grises représentent la somme des précipitations [mm] et le trait noir le nombre de jours de précipitations.	13
Figure 2.2.3 : 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] et le trait noir le nombre de jours de précipitations.	16
Figure 3.1.1 : Evolution passée des températures moyennes hivernales (décembre – janvier – février) de douze stations homogénéisées de MétéoSuisse	20
Figure 3.1.2 : Evolution passée des températures moyennes hivernales (décembre – janvier – février) de la station MétéoSuisse de Château-d'Oex	20
Figure 3.1.3 : Evolution passée des températures moyennes hivernales (décembre – janvier – février) de la station MétéoSuisse de Chaumont	21
Figure 3.1.4 : Evolution passée des températures moyennes estivales (juin – juillet – août) de douze stations homogénéisées de MétéoSuisse	22
Figure 3.1.5 : Evolution passée des températures moyennes estivales (juin – juillet – août) de la station MétéoSuisse de Château-d'Oex	22
Figure 3.1.6 : Evolution passée des températures moyennes estivales (juin – juillet – août) de la station MétéoSuisse de Chaumont	23
Figure 3.1.7 : Evolution passée du nombre de jours très chauds ($T_{min} > \text{percentile } 80$) pour l'été (juin – juillet – août) de la station MétéoSuisse de Neuchâtel (adapté de Rebetez, 2004)	24
Figure 3.1.8 : Modélisation de la température moyenne pour les quatre saisons sur les versants nord des Alpes suisses pour 2030, 2050 et 2070 par rapport à 1990 (OcCC-ProClim, 2007). Ces prévisions devraient être mises à jour en 2011.	25
Figure 3.2.1 : Evolution passée de la somme des précipitations annuelles [mm] de douze stations homogénéisées de MétéoSuisse	26
Figure 3.2.2 : Modélisation des précipitations [%] pour les quatre saisons sur les versants nord des Alpes suisses pour 2030, 2050 et 2070 par rapport à 1990. Une valeur de 0.50 désigne une diminution de 50%, une valeur de 1.25 une augmentation de 25% par rapport aux conditions actuelles (OcCC-ProClim, 2007). Ces prévisions devraient être mises à jour en 2011.	27
Figure 3.2.3 : Modélisation du changement de l'intensité des précipitations pour 2080 à 2099. Les régions en vert, bleu et violet sont les régions qui connaîtront une augmentation des événements de précipitations extrêmes (IPCC, 2007a).	27
Figure 3.2.4 : Modélisation du changement pour les jours de sécheresse pour 2080 à 2099. Les régions en orange, rouge et rose sont les régions qui connaîtront une augmentation des périodes de sécheresse (IPCC, 2007a).	28
Figure 3.3.1 : 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 and Schneebeli, 2003).	29
Figure 3.3.3 : Cumul des précipitations neigeuses de décembre à mars [cm] à Château-d'Oex en comparaison avec d'autres stations météorologiques d'altitudes différentes (source des données : MétéoSuisse et MétéoLeysin)	30
Figure 3.3.4 : Cumul des précipitations neigeuses de décembre à mars [cm] à Chaumont en comparaison avec d'autres stations météorologiques d'altitudes différentes (source des données : MétéoSuisse et MétéoLeysin)	31
Figure 4.2.1 : Influence de la température de l'air sur la densité de la neige fraîche (Pomeroy and Gray, 1995 modifié par Fauve et al., 2002)	35
Figure 4.2.2 : Marais	38
Figure 4.2.3 : Prairie uniforme et sans cailloux	38
Figure 4.2.4 : Glacier (à gauche) et rocher et pierrier après le retrait du glacier (à droite)	39
Figure 4.2.5 : Bordure de forêt	39
Figure 4.2.6 : Pâturage sans gros cailloux (à gauche) et pâturage traversé par une route (à droite)	40
Figure 4.2.7 : Pâturages avec gros cailloux (à gauche) et pâturage non uniforme (à droite)	40
Figure 4.2.8 : Pierrier avec petites pierres (à gauche) et avec de gros rochers (à droite)	41
Figure 4.2.9 : Part des pistes enneigées techniquement sur l'ensemble de la surface de pistes préparées en Suisse (RMS, 2008)	43
Figure 4.2.10 : Enneigeurs à basse pression (à gauche) et à haute pression (à droite)	44
Figure 4.4.1 : Stratégie d'adaptation des stations de ski (Elsasser and Buerki, 2002)	47
Figure 5.1.1 : 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).	49
Figure 5.3.1 : Mesures des variations de longueur [m/année et m] du glacier de Tsanfleuron entre 1884 et 2009 (source : ETHZ - VAW, Réseau suisse des observations glaciaires http://glaciology.ethz.ch/messnetz/index.html)	51
Figure 5.3.2 : Zones de pergélisol possibles et probables autour du massif des Diablerets (source : BAFU, BWL, Swisstopo http://umweltzustand.admin.ch/?reset_session&initialState=permafrost&lang=fr)	52

LISTE DES TABLES

Table 2.4.1 : Différence de température [°C] pour une augmentation de 100 m en altitude (d'après Baeriswyl et al., 1997)	17
Table 2.4.2 : Température [°C] pour différentes altitudes [m] pour le printemps (mars – avril – mai), l'été (juin – juillet – août), l'automne (septembre – octobre – novembre) et l'hiver (décembre – janvier – février)	17
Table 2.4.3 : Indice et estimation du refroidissement éolien (Environnement-Canada, 2010)	18
Table 4.1.1 : Nombre de stations de ski avec une sécurité d'enneigement en 2000 (Bürki, 2000; Koenig and Abegg, 1997)	33
Table 4.1.2 : Sécurité d'enneigement dans les domaines skiables suisses (Abegg et al., 2007)	34
Table 4.2.1 : Types de sol et besoins minimaux en neige fraîche à -3°C [cm] et correspondance en neige damée [cm]	41
Table 6.1.1 : Synthèse provisoire des atouts et faiblesses des Alpes vaudoises	54
Table 6.1.2 : Synthèse provisoire des atouts et faiblesses du Jura vaudois	54