

## Master of Science in Geography

Evolution des chutes de neige dans les Alpes vaudoises et stratégies d'adaptation liées à la ressource « Neige » dans les stations de Villars et des Diablerets (VD)

Evolution of snowfall in the Vaud Alps and strategies for adapting the « snow » resource in the resorts of Villars and Les Diablerets (VD)

Gilles Gebhard

Sous la direction du MER Jean-Michel Fallot et de la Prof. Leïla Kébir



« Ce travail n'a pas été rédigé en vue d'une publication, d'une édition ou diffusion. Son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n'engagent pas l'Université de Lausanne. Ce travail n'en est pas moins soumis aux règles sur le droit d'auteur. A ce titre, les citations tirées du présent mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l'auteur·e sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d'auteur est en outre applicable. ».

## Résumé

Dans ce travail, l'évolution passée et future des chutes de neige a été évaluée pour le Nord des Alpes et les Alpes vaudoises en Suisse. Depuis 1900, les chutes de neige annuelles ont été assez basses de 1940 à 1950 et ont légèrement augmenté dans les années 1960, avant de diminuer de manière progressive depuis 1980 à toutes les altitudes. Pour la période future, les chutes de neige ont été projetées à l'aide de formules empiriques à l'horizon 2085, pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du GIEC. Les projections des chutes de neige futures pour la période hivernale dans les Alpes vaudoises montrent une diminution marquée en dessous de 1400m (RCP 4.5 : -13.5% à -15.7% / RCP8.5 : -23.6% à -27.1%), une baisse plus faible jusqu'à 2000m (RCP 4.5 : -8.1% / RCP8.5 : -14.5%) et même une augmentation des chutes de neiges en hiver à partir de 2500m (2500m : RCP 4.5 +1.5% ; RCP8.5 : +2.5% / 2700m : RCP4.5 +3.9% / RCP8.5 +7.1%). Cette évolution est inquiétante pour l'avenir de la ressource « Neige » dans les Alpes vaudoises, car la majorité des stations se situent en dessous de 2000m d'altitude. Ainsi, la ressource « Neige » montre aujourd'hui une dynamique de pénurie dans le Alpes vaudoises, ce qui provoque des vulnérabilités territoriales liées à la spécialisation dans le tourisme d'hiver. Par conséquent, des mesures d'adaptation ont été mise en place dans le cadre de la stratégie « Alpes vaudoises 2020 ». Pour les stations de Villars et des Diablerets, cette stratégie d'adaptation a permis d'améliorer les infrastructures du domaine skiable, mais la diversification des activités touristiques n'est pas encore suffisante pour se passer de la ressource « Neige » dans ces stations.

### Mots-clés :

Evolution des chutes neige – Changement climatique – Alpes vaudoises

Ressource territoriale – Vulnérabilité – Stratégies d'adaptation

## Abstract

In this study, the past and future evolution of snowfall was evaluated for the Northern Alps and the Vaud Alps in Switzerland. Since 1900, annual snowfall was quite low from 1940 to 1950 and increased slightly in the 1960s, before gradually decreasing since 1980 at all altitudes. For the future period, snowfall was projected using empirical formula to the year 2085 for the scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 of IPCC. Projections of future snowfall for the winter period in the Vaud Alps show a marked decrease below 1400m (RCP 4.5: -13.5% to -15.7% / RCP8.5: -23.6% to -27.1%), a smaller decrease up to 2000m (RCP 4.5: -8.1% / RCP8.5: -14.5%) and even an increase in winter snowfall from 2500m (2500m : RCP 4.5 +1.5% ; RCP8.5 : +2.5% / 2700m : RCP4.5 +3.9% / RCP8.5 +7.1%). This evolution is worrying for the future of the "Snow" resource in the Vaud Alps, as the majority of resorts are located below 2000m. Thus, the "Snow" resource is now showing a dynamic of scarcity in the Vaud Alps, which is causing territorial vulnerabilities linked to the specialisation in winter tourism. As a result, adaptation measures have been put in place under the strategy "Vaud Alps 2020". For the resorts of Villars and Les Diablerets, this adaptation strategy has made it possible to improve the infrastructure of the ski area, but the diversification of tourist activities is not yet sufficient to do without the "snow" resource in these resorts.

### Keywords :

Evolution of snowfall - Climate change - Vaud Alps

Territorial resource - Vulnerability - Adaptation strategies

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail et qui m'ont permis de mener à bien cette étude.

Tout d'abord, merci à Jean-Michel Fallot pour avoir accepté de collaborer avec moi sur ce sujet et pour son encadrement tout au long du mémoire.

Merci aussi à Leïla Kébir pour ses conseils et son expertise, concernant la partie II de ce travail.

Merci également à Sergei Aschwanden pour sa disponibilité lors de notre entretien.

Finalement, merci à mon entourage, ma famille et mes amis pour m'avoir soutenu à travers la finalisation ce mémoire.

## Table des matières

<b>RESUME</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>IV</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>IX</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE</b> .....	<b>1</b>
<b>PARTIE I : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGE</b> .....	<b>2</b>
<b>1. ETAT DE L'ART</b> .....	<b>2</b>
1.1 CHANGEMENT CLIMATIQUE ET CONDITIONS DE NEIGE.....	2
1.2 SCENARIOS CLIMATIQUES.....	7
1.3 CLIMAT DES ALPES VAUDOISES ET EVOLUTION.....	8
<b>2. QUESTIONS DE RECHERCHE ET OBJECTIFS</b> .....	<b>10</b>
<b>3. METHODE</b> .....	<b>11</b>
3.1 METHODOLOGIE.....	11
3.2 ETAPES DU TRAVAIL.....	12
<b>4. RESULTATS</b> .....	<b>14</b>
4.1 EVOLUTION PASSEE DES CHUTES DE NEIGE.....	14
4.2 FORMULES DES REGRESSIONS ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS MEASUREES.....	18
4.3 EVOLUTION FUTURE DES CHUTES DE NEIGE.....	20
<b>5. DISCUSSION</b> .....	<b>25</b>
<b>PARTIE II : RESSOURCE « NEIGE » ET STRATEGIES D'ADAPTATIONS</b> .....	<b>30</b>
<b>1. ETAT DE L'ART</b> .....	<b>30</b>
1.1 LA NOTION DE RESSOURCE ET DYNAMIQUE TERRITORIALE.....	30
1.2 LA NOTION DE VULNERABILITE TERRITORIALE.....	32
1.3 LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LA NEIGE DANS LES ALPES.....	33
<b>2. QUESTIONS DE RECHERCHE ET OBJECTIFS</b> .....	<b>35</b>
<b>3. METHODE</b> .....	<b>36</b>
<b>4. SITUATION ET CONTEXTE DE L'ETUDE</b> .....	<b>37</b>
4.1 DESCRIPTION DES STATIONS DE VILLARS ET DES DIABLERETS.....	37
4.2 CONTEXTE ET DYNAMIQUE DE LA RESSOURCE « NEIGE » AUX ALPES VAUDOISES.....	39
4.3 ELEMENTS DE VULNERABILITE TERRITORIALE POUR VILLARS ET LES DIABLERETS.....	40
<b>5. RESULTATS</b> .....	<b>42</b>
5.1 LES STRATEGIES D'ADAPTATION DES STATIONS DE SKI.....	42

5.2 STRATEGIE « ALPES VAUDOISES 2020 » POUR VILLARS ET LES DIABLERETS .....	44
<b>6. DISCUSSION .....</b>	<b>47</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>48</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>50</b>
PARTIE I .....	50
PARTIE II .....	51
<b>ANNEXES .....</b>	<b>55</b>
ANNEXE 1 : RAPPORTS R ENTRE LES PRECIPITATIONS ET LES CHUTES DE NEIGE .....	55
ANNEXE 2 : GRAPHIQUES DE TOUTES LES COURBES DE REGRESSION ENTRE LES RAPPORTS R MOYENS MENSUELS ET LES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES .....	56
ANNEXE 3 : PROJECTIONS DES TEMPERATURES (CH2018, 2018) .....	64
ANNEXE 4 : PROJECTIONS DES PRECIPITATIONS (CH2018, 2018).....	65
ANNEXE 5 : ENTRETIEN AVEC M. SERGEI ASCHWANDEN .....	66

## Liste des figures

FIGURE 1 : ETAPES ET DEMARCHE DU MEMOIRE .....	1
FIGURE 2 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE CO <sub>2</sub> (PPM) SELON LES DIFFERENTS SCENARIOS D'EMISSIONS RCP JUSQU'EN 2100 (IPCC, 2014).....	2
FIGURE 3 : AUGMENTATION DES TEMPERATURES PAR RAPPORT A LA PERIODE 1861-1880 (C°) EN FONCTIONS DES EMISSIONS CUMULEES DEPUIS 1870 DE CO <sub>2</sub> (GTCO <sub>2</sub> ) AVEC LES VALEURS CORRESPONDANT AUX DIFFERENTS SCENARIOS D'EMISSIONS A L'HORIZON 2100 (IPCC, 2014).....	3
FIGURE 4 : EVOLUTION DE LA COUVERTURE DE NEIGE DURANT LE 21 <sup>EME</sup> SIECLE DANS L'HEMISPHERE NORD AU PRINTEMPS (MARS-AVRIL) CALCULEE PAR LES MODELES CLIMATIQUES POUR LES 4 SCENARIOS RCP AVEC UN INTERVALLE DE CONFIANCE DE 5% (IPCC, 2013).....	3
FIGURE 5 : EVOLUTION DE 3 PARAMETRES DU MANTEAU NEIGEUX DE 1970-2015 A) EVOLUTION DE LA DATE MOYENNE D'APPARITION DU MANTEAU NEIGEUX B) EVOLUTION DE LA DATE MOYENNE DE DISPARITION DU MANTEAU NEIGEUX C) EVOLUTION DE LA DUREE MOYENNE DU MANTEAU NEIGEUX EN JOURS (KLEIN ET AL., 2016) .....	4
FIGURE 6 : EVOLUTION DE L'ISOTHERME DU 0°C EN HIVER EN SUISSE DE 1864 A 2018 (CH2018, 2018) .....	5
FIGURE 7 : FORÇAGE RADIATIF SELON LES DIFFERENTS SCENARIOS RCP ET SRES (CH2018, 2018) .....	7
FIGURE 8 : PRECIPITATIONS MENSUELLES MOYENNES DE DIFFERENTES STATIONS DES ALPES VAUDOISES EVALUEE DE 1961 A 1990 AVEC LE NOMBRE MENSUEL MOYEN DE JOURS DE PLUIE (EN NOIR) ET LES HAUTEURS D'EAU MOYENNES PAR MOIS EN MM (EN GRIS) (REBETEZ & SERQUET, 2013) .....	8
FIGURE 9 : LOCALISATION DES STATIONS DE MESURES DE METEOSUISSE SELECTIONNEES POUR CETTE ETUDE.....	12
FIGURE 10 : COURBE DE REGRESSIONS ENTRE LES TEMPERATURES ET LES RAPPORTS R DE L'ENSEMBLE DES 12 STATIONS ETUDIEES ...	13
FIGURE 11: EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGE AU NORD DES ALPES SUISSES DE 500 A 1100M/MER DEPUIS 1900 (VALEURS BRUTES) .....	14
FIGURE 12 : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGE AU NORD DES ALPES SUISSES DE 500 A 1100M/MER DEPUIS 1900 (MOYENNE MOBILES SUR 5 ANS).....	14
FIGURE 13 : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGE AU NORD DES ALPES SUISSES DE 1300 A 2500M/MER DEPUIS 1930 (VALEURS BRUTES).....	15
FIGURE 14 : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGE AU NORD DES ALPES SUISSES DE 1300 A 2500M/MER DEPUIS 1930 (MOYENNES MOBILES SUR 5 ANS).....	15
FIGURE 15 : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGE DANS LES ALPES VAUDOISES DE 900 A 1300M/MER DEPUIS 1955 (VALEURS BRUTES) .....	17
FIGURE 16 : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGE DANS LES ALPES VAUDOISES DE 900 A 1300M/MER DEPUIS 1955 (MOYENNES MOBILES SUR 5 ANS).....	17
FIGURE 17 : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGES MOYENNES ANNUELLES (DE SEPTEMBRE A MAI) A DIFFERENTES ALTITUDES POUR LA SUISSE AVEC LES SCENARIOS RCP 4.5 ET RCP 8.5 POUR LA PERIODE 2085 (CH2018, 2018) .....	26
FIGURE 18 : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGES MOYENNES ANNUELLES (DE SEPTEMBRE A MAI) A DIFFERENTES ALTITUDES POUR LA SUISSE AVEC LES SCENARIOS RCP 4.5 ET RCP 8.5 POUR LA PERIODE 2085 (FREI ET AL., 2018) .....	26
FIGURE 19 : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGES MOYENNES MENSUELLES (DE SEPTEMBRE A MAI) POUR DIFFERENTES CLASSES D'ALTITUDE EN SUISSE AVEC LES SCENARIOS RCP 4.5 ET RCP 8.5 POUR LA PERIODE 2085 (CH2018, 2018).....	27
FIGURE 20 : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGES MOYENNES MENSUELLES (DE SEPTEMBRE A MAI) POUR DIFFERENTES CLASSES D'ALTITUDE EN SUISSE AVEC LES SCENARIOS RCP 4.5 ET RCP 8.5 POUR LA PERIODE 2085 (FREI ET AL., 2018).....	28
FIGURE 21 : EVOLUTION DES CHUTES DE NEIGE MOYENNES MENSUELLES (DE SEPTEMBRE A MAI) DANS LES ALPES VAUDOISES AVEC LES SCENARIOS RCP 4.5 ET RCP 8.5 POUR LA PERIODE 2085 .....	28
FIGURE 22 : POURCENTAGE DES STATIONS GARANTISSANT LA NEIGE EN FONCTION DES TEMPERATURES (ABEGG ET AL., 2007) .....	34
FIGURE 23 : DOMAINE SKIABLE DE LA SOCIETE DE « TELE VILLARS-GRYON-DIABLERETS » CREEE EN 2015 (SOURCE : <a href="https://fr.skiinfo.ch">HTTPS://FR.SKIINFO.CH</a> ) .....	37
FIGURE 24 : STRATEGIE D'ADAPTATION DES STATIONS DE SKI (ELSASSER ET BÜRKI, 2002).....	42
FIGURE 25 : RAPPORTS R MOYENS MENSUELS DES DIFFERENTES STATIONS POUR CHAQUE CLASSE D'ALTITUDE DE 1981-2011 .....	55
FIGURE 26 : EVOLUTION DES TEMPERATURES PAR RAPPORT A LA PERIODE ACTUELLE (1981-2010) CALCULEE PAR LES MODELES CLIMATIQUES REGIONAUX POUR LES NOUVEAUX SCENARIOS D'EMISSIONS DES GAZ A EFFET DE SERRE EN SUISSE (CH2018, 2018, P.223) .....	64
FIGURE 27 : EVOLUTION DES PRECIPITATIONS PAR RAPPORT A LA PERIODE ACTUELLE (1981-2010) CALCULEE PAR LES MODELES CLIMATIQUES REGIONAUX POUR LES NOUVEAUX SCENARIOS D'EMISSIONS DES GAZ A EFFET DE SERRE EN SUISSE (CH2018, 2018, P.226) .....	65

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 : COURBES DE REGRESSION CALCULEES ENTRE LES RPCN (y) ET LES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES (x) AVEC LEUR COEFFICIENT DE DETERMINATION ( $R^2$ ) POUR LE NORD DES ALPES SUR L'ENSEMBLE DE LA PERIODE 1981-2011 .....	18
TABLEAU 2 : DIFFERENCE (%) ENTRE LES CHUTES DE NEIGE MOYENNES MENSUELLES CALCULEES A PARTIR DES RPCN MOYENS ET CELLES MESUREES SUR L'ENSEMBLE DE LA PERIODE 1981-2011 .....	19
TABLEAU 3 : EVOLUTION MOYENNE DES CHUTES DE NEIGE ESTIMEES AU NORD DES ALPES (AVEC MONTANA ET WEISSFLUHJOCH) PAR RAPPORT A LA PERIODE 1981-2011 POUR LE SCENARIO D'EMISSIONS DES GAZ A EFFET DE SERRE RCP 4.5 EN 2085 (2070-2100).....	20
TABLEAU 4 : EVOLUTION MOYENNE DES CHUTES DE NEIGE ESTIMEES AU NORD DES ALPES (AVEC MONTANA ET WEISSFLUHJOCH) PAR RAPPORT A LA PERIODE 1981-2011 POUR LE SCENARIO D'EMISSIONS DES GAZ A EFFET DE SERRE RCP 8.5 EN 2085 (2070-2100).....	21
TABLEAU 5 : EVOLUTION MOYENNE DES CHUTES DE NEIGE ESTIMEES DANS LES ALPES VAUDOISES RAPPORT A LA PERIODE 1981-2011 POUR LE SCENARIO D'EMISSIONS DES GAZ A EFFET DE SERRE RCP 4.5 EN 2085 (2070-2100) .....	22
TABLEAU 6 : EVOLUTION MOYENNE DES CHUTES DE NEIGE ESTIMEES DANS LES ALPES VAUDOISES RAPPORT A LA PERIODE 1981-2011 POUR LE SCENARIO D'EMISSIONS DES GAZ A EFFET DE SERRE RCP 8.5 EN 2085 (2070-2100) .....	23
TABLEAU 7 : APPROXIMATION DE LA DIMINUTION DES CHUTES DE NEIGE MOYENNES ANNUELLES (SEPTEMBRE A MAI) POUR DIFFERENTES CLASSES D'ALTITUDE AVEC LES SCENARIOS RCP 4.5 ET RCP 8.5 A L'HORIZON 2085 D'APRES LES DONNEES DE LA FIGURE 17 (FREI ET AL., 2018) ET DE LA FIGURE 18 (CH2018, 2018).....	27
TABLEAU 8 : DIMINUTION DES CHUTES DE NEIGE MOYENNES ANNUELLES (SEPTEMBRE A JUIN) POUR DIFFERENTES CLASSES D'ALTITUDE AVEC LES SCENARIOS RCP 4.5 ET RCP 8.5 A L'HORIZON 2085 POUR LE NORD DES ALPES ET LES ALPES VAUDOISES.....	27
TABLEAU 9 : TYPOLOGIE DE LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES (KEBIR ET CREVOISIER, 2004).....	31
TABLEAU 10 : CONFIGURATION D'ECONOMIE TOURISTIQUE DANS LES STATIONS ALPINE (PEYRACHE-GADEAU, 2007).....	32
TABLEAU 11 : DYNAMIQUE TERRITORIALE DE LA RESSOURCE « NEIGE » SELON KEBIR ET CREVOISIER (2004).....	39

## Liste des abréviations

CITAV : Communauté d'intérêt des Alpes Vaudoises

GCMS : Modèles Climatiques Généraux

GIEC : Groupement Intergouvernemental d'Experts du Climat

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

JOJ : Jeux Olympiques de la Jeunesse

RCMs : Modèles Climatiques Régionaux

RCP : Representative Concentration Pathways (scénarios GIEC)

RPCN : Rapport entre les Précipitations et Chutes de Neige (Rapport R)

SSPT : Stations Sites de Production Touristique

STET : Stations-Territoire d'Economie Touristique

## Introduction générale et problématique

Avec le changement du climat mondial, une diminution des quantités de neige est observée dans l'hémisphère Nord et notamment dans les Alpes (IPCC, 2013 ; Klein et al., 2016). En effet, l'augmentation des températures entraîne une baisse des chutes de neige par rapport aux précipitations et cette diminution est plus marquée pour les basses altitudes (Serquet et al., 2011). De plus, bien que les hivers froids aient tendance à être plus secs et les hivers doux plus humides que la moyenne en Suisse (CH2011, 2011), la quantité de neige à basse altitude pourrait selon les scénarios diminuer de moitié d'ici à l'an 2060 (CH2018, 2018).

Malgré le fait que les questions sur le changement climatique et l'influence des températures sur les précipitations sous forme de neige soient étudiées depuis de nombreuses années (Frei et al., 2018 ; Klein et al., 2016 ; Serquet et al., 2011 ; Serquet et al., 2013), l'évolution des chutes de neige en lien avec l'augmentation des températures n'a pas encore été étudiée dans les Alpes vaudoises. Cependant, cette région des Préalpes étant située principalement en dessous de 2000m d'altitude, Villars et Les Diablerets, deux stations importantes de la région, risquent d'être fortement touchées par la baisse des chutes de neige à venir.

Par conséquent, cette évolution est inquiétante car la diminution des chutes de neige peut avoir un impact important sur le tourisme et l'économie des stations d'hiver dans les régions de montagne (Abegg et al., 2007 ; Serquet et al., 2013). Dans ce contexte, une brève description, de la ressource « Neige » et de sa dynamique selon Kebir et Crevoisier (2004) mais aussi des vulnérabilités territoriales selon Peyrache-Gadeau (2007), permettra de faire ressortir les enjeux de la baisse des chutes de neige pour les Alpes vaudoises. Ensuite, une revue de littérature concernant les stratégies d'adaptations sera effectuée, afin d'analyser les mesures prises pour s'adapter à ces nouvelles conditions de neige, dans le cadre de la stratégie « Alpes vaudoises 2020 » à Villars et aux Diablerets.

Ce travail constitue donc une étude régionale de l'évolution des chutes de neige pour les Alpes vaudoises avec les nouveaux scénarios climatiques du rapport CH2018 (2018) et une recherche sur les stratégies d'adaptations liées à la ressource « Neige », avec une étude de cas pour les stations de Villars et des Diablerets (Figure 1).

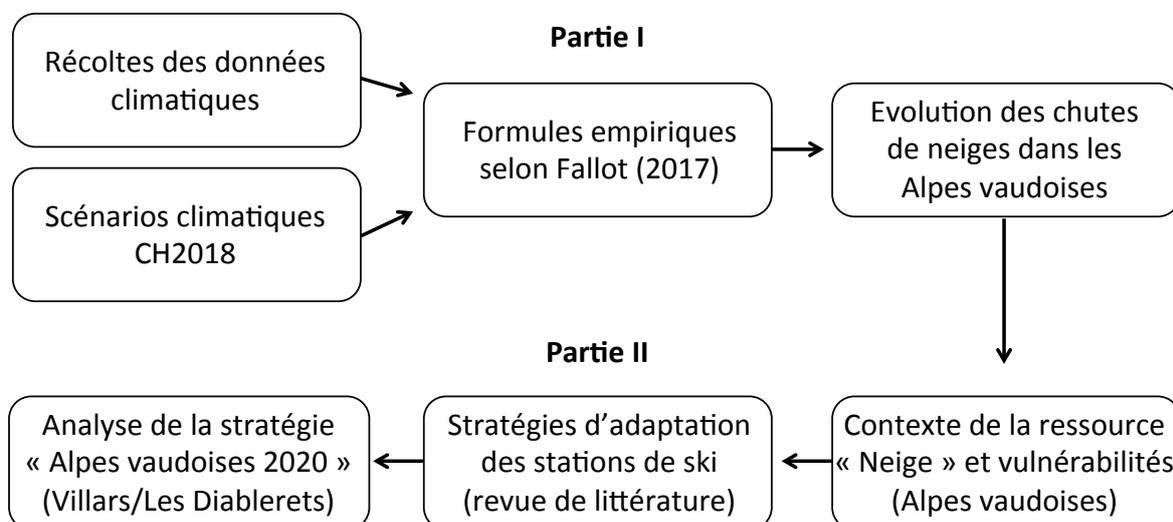


Figure 1 : Etapes et démarche du mémoire

## Partie I : Evolution des chutes de neige

Dans cette première partie, l'évolution des chutes de neige va être analysée pour la région des Alpes vaudoises. Tout d'abord, un état de l'art permet de présenter les différentes études déjà réalisées sur ce sujet, afin de présenter le contexte scientifique. Ensuite, les différentes questions de recherche et hypothèses permettent de définir les objectifs principaux, qui sont suivis de la description des méthodes utilisées dans ce travail. Finalement, les différents résultats sont présentés concernant les chutes de neige passées et futures de la région d'étude et une discussion permet de comparer les données obtenues et de faire ressortir les éléments principaux.

### 1. Etat de l'art

#### 1.1 Changement climatique et conditions de neige

Depuis l'ère préindustrielle, les activités humaines sont à l'origine d'une hausse d'environ 1°C (de 0.8°C à 1.2°C) des températures moyennes annuelles globales observée à la surface de la terre (GMST), à ce rythme la hausse atteindra 1.5°C entre les années 2030 à 2052 (IPCC, 2018). Le GIEC, Groupement Intergouvernemental d'Experts du Climat ou IPCC en anglais, a modélisé plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effets de serre. Cette modélisation permet de simuler l'évolution des températures jusqu'à la fin du siècle, en fonction des activités anthropiques (Figures 2 et 3). Ces différents scénarios se composent de plusieurs RCP (Representative Concentration Pathways), à savoir le scénario RCP 8.5 correspondant à des émissions de gaz à effet de serre sans mesures d'atténuation, les scénarios RCP 6 et 4.5 étant des cas intermédiaires avec une atténuation insuffisante pour limiter le réchauffement à moins de 2°C et le scénario RCP 2.6 représentant un scénario très ambitieux, dans lequel les mesures d'atténuation permettraient de maintenir une augmentation des températures en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels.

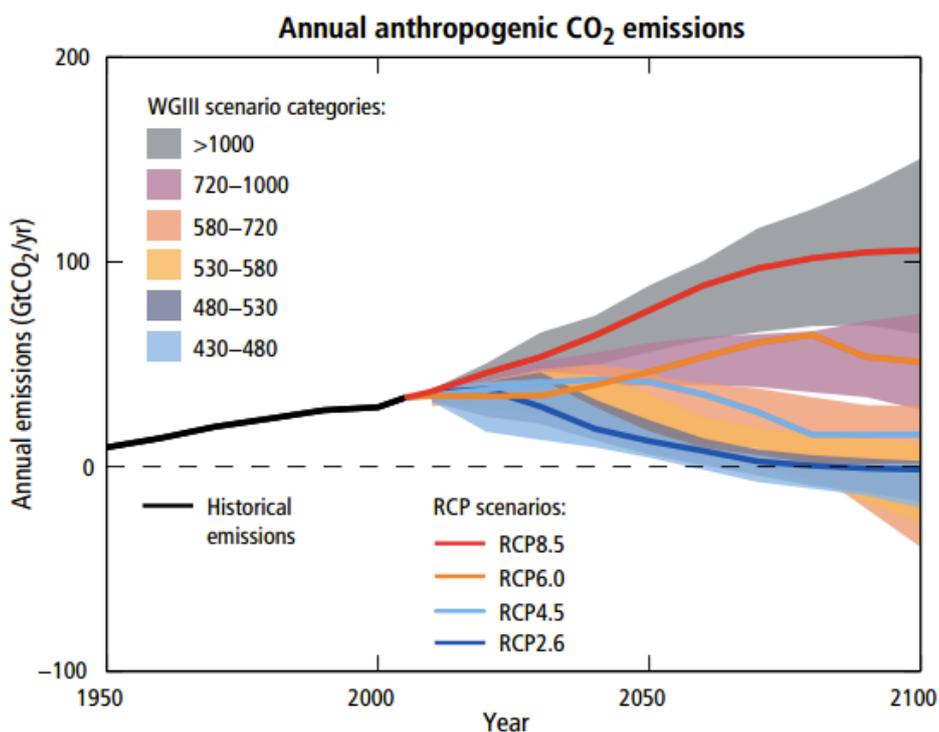


Figure 2 : Evolution des concentrations de CO<sub>2</sub> (ppm) selon les différents scénarios d'émissions RCP jusqu'en 2100 (IPCC, 2014)

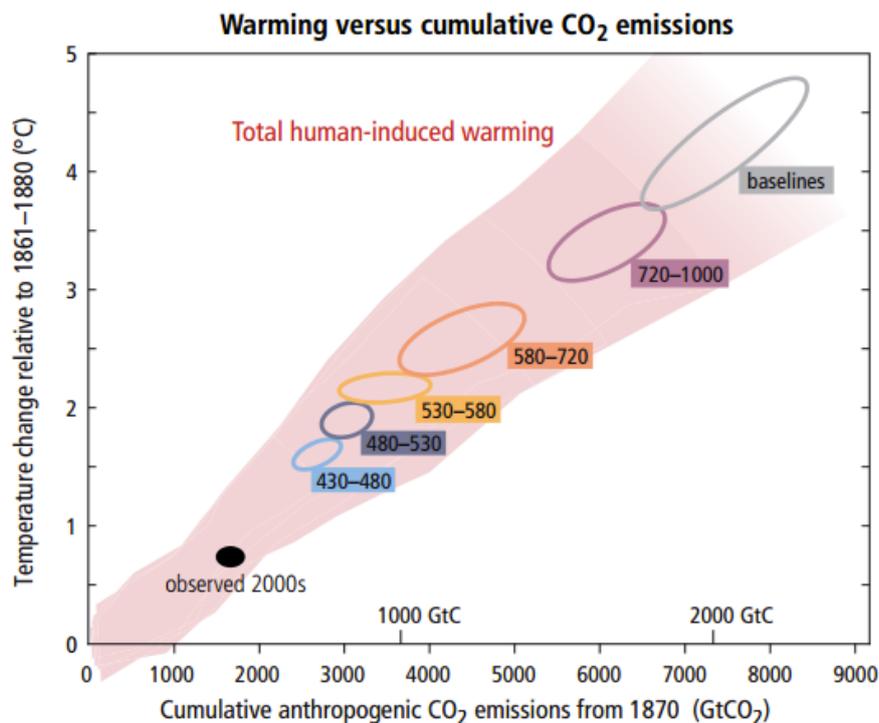


Figure 3 : Augmentation des températures par rapport à la période 1861-1880 (C°) en fonctions des émissions cumulées depuis 1870 de CO2 (GtCO2) avec les valeurs correspondant aux différents scénarios d'émissions à l'horizon 2100 (IPCC, 2014)

Cette hausse des températures est deux à trois fois plus importante que la moyenne globale pour la zone arctique (IPCC, 2018), ce qui engendre non seulement une fonte des glaces mais aussi une baisse de la couverture de neige dans l'hémisphère Nord. Selon les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 (Figure 4), la diminution de la couverture de neige globale dans l'hémisphère Nord à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle sera respectivement de 7% (RCP 2.6) et 25% (RCP 8.5) par rapport à aujourd'hui (IPCC, 2013). Entre 1967 et 2012, la couverture de neige dans l'hémisphère Nord a diminué d'environ 1.6% (de 0.8 à 2.4%) par décennie pour la période mars/avril et de 11.7% pour la période de juin (IPCC, 2013).

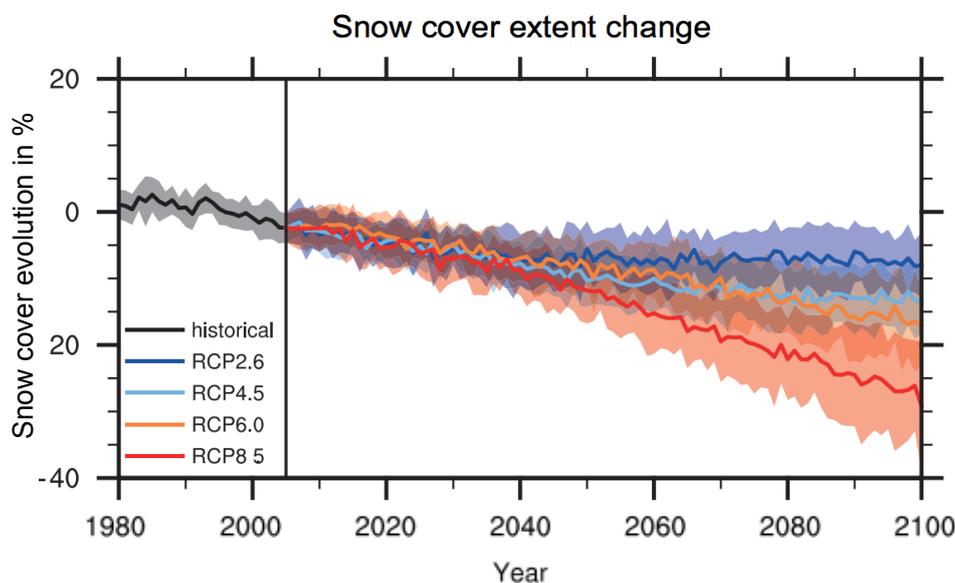


Figure 4 : Evolution de la couverture de neige durant le 21<sup>ème</sup> siècle dans l'hémisphère Nord au printemps (mars-avril) calculée par les modèles climatiques pour les 4 scénarios RCP avec un intervalle de confiance de 5% (IPCC, 2013)

Concernant l'isotherme du 0°C, la limite d'altitude a augmenté d'environ 300-400 mètres depuis les années 1960 (IPCC, 2013). En conséquence, la diminution des jours enneigés et des chutes de neige depuis 1970 est de 20% pour les surfaces situées à 2000 m d'altitude et de 50 % pour celles en dessous de 800 m d'altitude (IPCC, 2013).

Concernant les Alpes, selon Frei et al. (2018), les chutes moyennes de neige pour la période septembre-mai pourraient diminuer de 25% avec le scénario RCP 4.5 et de 45% pour le RCP 8.5 suivant les altitudes jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Pour ce dernier scénario, les régions alpines de basse altitude pourraient même voir une diminution des chutes de neige de 80%. Ces diminutions importantes des chutes de neige sont fortement liées à la hausse des températures à venir et donc à la baisse de la fréquence des précipitations solides par rapport au précipitations totales (Frei et al., 2018). D'ailleurs, contrairement aux régions de basses altitudes, les régions de hautes altitudes pourraient observer une légère augmentation des chutes de neiges notamment pour les chutes importantes de neige, qui résulterait d'une possible augmentation générale des précipitations en hiver (Frei et al., 2018).

Dans les Alpes suisses, la proportion de jours enneigés par rapport aux jours de précipitations a été analysée par Serquet et al. (2011). Cette étude permet d'évaluer l'impact du changement de températures sur les chutes de neiges indépendamment de la variabilité d'intensité et de fréquence des précipitations. Les résultats, obtenus pour une période 100 ans sur 76 stations météorologiques situées en Suisse, ont montré une nette diminution des chutes de neige par rapport aux précipitations. Cette diminution est plus marquée pour les faibles altitudes, ce qui est principalement lié à l'augmentation des températures. Un seuil limite des températures saisonnières a pu être défini au-delà duquel les chutes de neige diminuent fortement. Pour l'hiver, ce seuil se situe à  $-2.7^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$  et pour le printemps à  $-3.8^{\circ}\text{C} \pm 0.6^{\circ}\text{C}$  (Serquet et al., 2011).

Peu de données sur le long terme concernant la neige sont disponibles, spécialement en haute altitude. Klein et al. (2016) ont analysé certaines caractéristiques du manteau neigeux pour la période 1970-2015 sur 11 stations météorologiques dans les Alpes suisses (Figure 5).

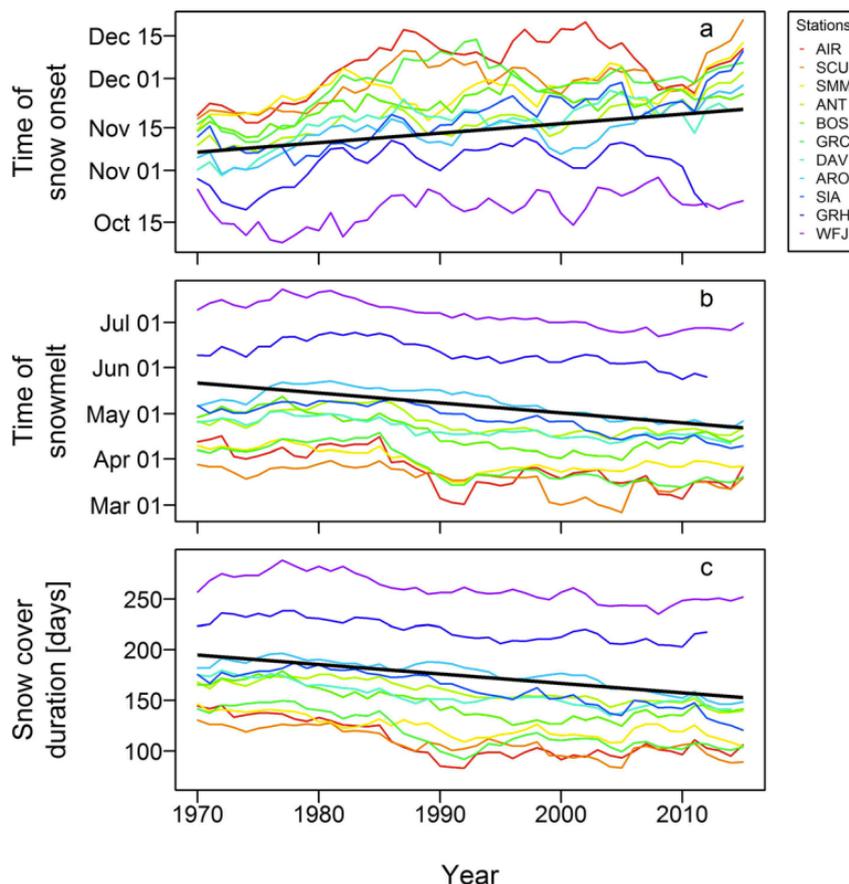


Figure 5 : Evolution de 3 paramètres du manteau neigeux de 1970-2015 a) Evolution de la date moyenne d'apparition du manteau neigeux b) Evolution de la date moyenne de disparition du manteau neigeux c) Evolution de la durée moyenne du manteau neigeux en jours (Klein et al., 2016)

La durée d'enneigement a fortement baissé sur tous les sites avec une diminution moyenne de 8.9 jours par décennie (Klein et al. 2016). Cette diminution est principalement causée par une fonte plus précoce du manteau neigeux au printemps, mais aussi partiellement par une couverture de neige plus tardive en automne. En moyenne, la saison d'enneigement commence 12 jours plus tard et finit 26 jours plus tôt en 2015 par rapport à 1970 (Klein et al. 2016). Globalement, la hauteur maximale du manteau neigeux a diminué de 3.9 à 10.6% par décennie et le nombre de jours avec de la neige au sol a significativement diminué à toutes les altitudes et pour toutes les régions (Klein et al. 2016). Ces résultats montrent un déclin marqué dans tous les paramètres du manteau neigeux en Suisse quelque soit l'altitude ou la région, pour les climats sec ou humide, avec une fonte de la neige plus précoce au printemps qui est liée au réchauffement renforcé durant cette saison.

A travers ces différentes études, les températures apparaissent comme étant un facteur prépondérant dans l'évolution des chutes de neiges. Selon Frei et al. (2018), les températures exercent une influence directe sur la couverture de neige de deux manières: premièrement, la somme des chutes de neige diminue à cause de la diminution de probabilité des précipitations solides; deuxièmement, la fonte de la neige est plus importante et plus rapide dans des conditions de températures élevées.

D'autre part, en fonction des conditions météo, le rapport conventionnel de 1 :10, qui fixe que 1 mm de précipitation est égal à 1 cm de neige fraîche, peut varier de 1 :3 à 1 :100 selon les situations (Roebber et al., 2003). Cette variation est due à plusieurs facteurs comme la radiation solaire, la température mais aussi l'humidité relative et la compaction relative (Roebber et al., 2003). En plus, plusieurs phénomènes peuvent influencer la densité de la neige comme la structure, la taille et l'agrégation des cristaux mais aussi la fonte et la sublimation dans les nuages ou des processus de compaction et de métamorphisme du manteau neigeux (Roebber et al., 2003).

Un autre élément essentiel est l'évolution de l'isotherme du 0°C, car il détermine la limite entre les précipitations liquides et les précipitations solide. Depuis les années 1864, l'évolution de l'isotherme du 0°C en hiver montre une nette tendance à la hausse en altitude, bien qu'il existe une certaine variabilité entre les décennies (CH2018, 2018). Sur la période plus récente, cette limite a augmenté d'environ 300 à 400m d'altitude entre 1961 et aujourd'hui (Figure 6). Cette évolution montre un lien entre l'élévation en altitude de l'isotherme du 0°C et la hausse des températures d'environ 150 à 200 m par degré °C de réchauffement (CH2018, 2018).

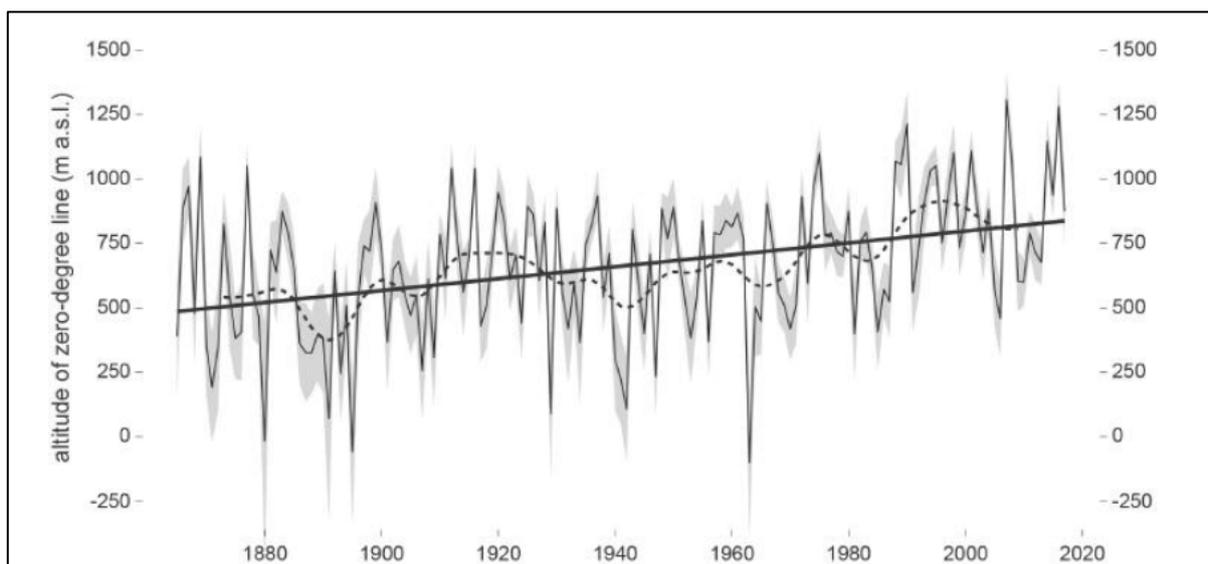


Figure 6 : Evolution de l'isotherme du 0°C en hiver en Suisse de 1864 à 2018 (CH2018, 2018)

Pour conclure, la hausse de températures est donc la principale cause de la diminution de la couverture de neige dans les Alpes (Serquet et al., 2011). En effet, la réduction de la durée d'enneigement peut être causée par une fonte accélérée de la neige au printemps (Serquet et al., 2013), mais aussi par une diminution du rapport entre les précipitations solides et liquides (Serquet et al. 2011 ; Serquet et al. 2013). D'autre part, les chutes de neiges peuvent également être influencées par une modification des précipitations globales pendant l'hiver (Frei et al., 2018 ; CH2018, 2018).

Même si l'arrivée de la neige est plus tardive en automne, la fonte accélérée au printemps a un impact plus fort sur la diminution de la couverture de neige (Klein et al., 2016). Dans leur étude, Serquet et al. (2013) montrent qu'il pourrait y avoir un raccourcissement de la période enneigée, qui allait autrefois de novembre à mars et qui pourrait se limiter de décembre à février dans le futur. La limite de l'isotherme du 0°C a également une forte influence sur la couverture de neige, car plus elle monte en altitude, plus le rapport entre les précipitations solides et liquides diminue (Klein et al., 2016). C'est pourquoi les chutes de neiges devraient diminuer fortement à basse altitude alors qu'elles devraient rester assez stables en haute altitude.

## 1.2 Scénarios climatiques

Les scénarios climatiques suisses CH2018 sont des projections du changement climatique, basées sur les simulations climatiques régionales EURO-CORDEX (CH2018, 2018). Ces simulations projettent le changement climatique pour trois scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) élaborés par le GIEC (IPCC, 2013). Les différents scénarios RCP ont remplacé les anciens scénarios SRES du GIEC, utilisés lors du rapport précédent en Suisse (CH2011, 2011). Ces nouveaux scénarios RCP simulent les différents effets du changement climatique selon l'évolution des activités anthropiques (Figure 7). Le scénario RCP 8.5 correspond à des émissions sans mesures d'atténuation, le scénario RCP 4.5 est un cas intermédiaire et le scénario RCP 2.6 représente un scénario avec des mesures d'atténuation très importantes (IPCC, 2013).

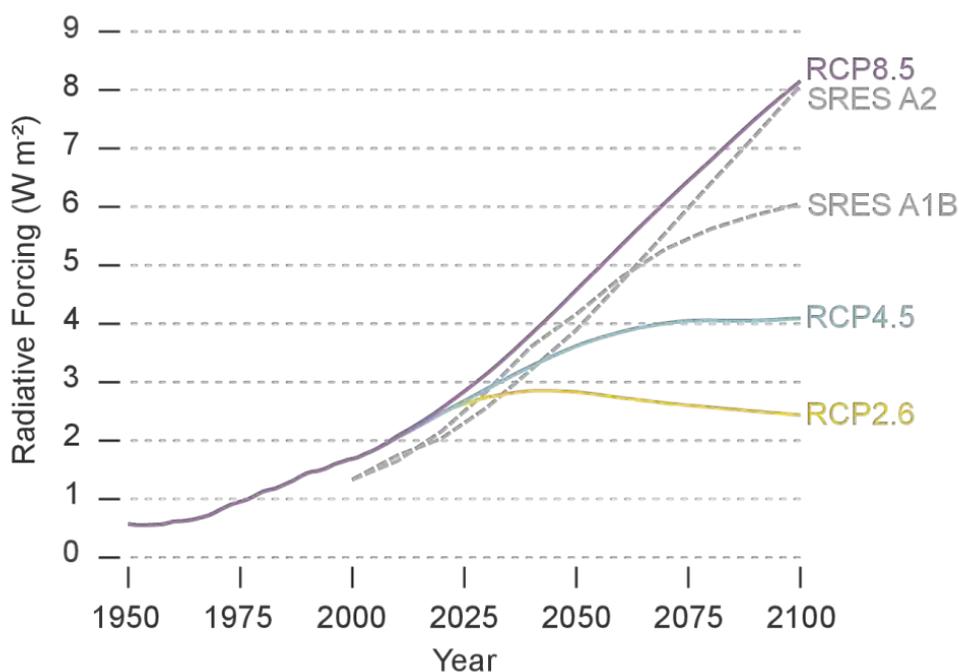


Figure 7 : Forçage radiatif selon les différents scénarios RCP et SRES (CH2018, 2018)

Les projections, basées sur ces différents scénarios d'émissions, sont constituées de plusieurs ensembles de données illustrant les effets du changement climatique en Suisse, concernant l'évolution des températures mais aussi des précipitations et notamment sous forme de neige, ce qui est une nouveauté pour ce rapport de 2018. Les résultats concernant les différentes régions climatiques de Suisse et trois périodes de temps couvrant le 21<sup>e</sup> siècle sont utilisées, à savoir les périodes 2035 (2020-2049), 2060 (2045-2074) et 2085 (2070-2100).

Les résultats concernant les derniers scénarios climatiques pour la Suisse pour la période 2085 (CH2018, 2018) montrent que la moyenne des précipitations sous forme de neige aura tendance à diminuer en dessous de 2000m d'altitude. Les réductions à prévoir sont d'environ 15% pour le scénario RCP 4.5 et de 35% pour le scénario RCP 8.5. Si on considère les altitudes en dessous de 750 m avec le scénario RCP 4.5 et en dessous de 1250 m avec le scénario RCP 8.5, la diminution des chutes de neige pourrait même atteindre 50% (CH2018, 2018). Bien que les chutes de neiges montrent une forte diminution, les précipitations totales auront tendance à augmenter pendant l'hiver. Cette augmentation pourra aller de 12% à 22% suivant les régions (CH2018, 2018).

### 1.3 Climat des Alpes vaudoises et évolution

En Suisse, le climat régional est principalement influencé par le régime des précipitations, mais aussi par la température qui joue un rôle important, ainsi que de manière secondaire par l'ensoleillement (Rebetez & Serquet, 2013).

Le régime des précipitations est influencé par des courants dominants qui soufflent du sud-ouest et du nord-ouest depuis l'Atlantique, qui amènent de l'air humide et doux (air tropical) ou frais (air polaire) suivant la provenance des masses d'air et la direction des vents. Ces courants fluctuent selon les années et les saisons en Suisse occidentale. De plus, le régime des précipitations est lié non seulement à la région mais aussi à la topographie. Dans les Alpes vaudoises, l'été est la saison qui a le plus de précipitations à cause des orages, tandis qu'en automne les précipitations sont moins fréquentes. En comparaison avec les autres régions suisses, les Alpes vaudoises reçoivent en moyenne moins de précipitations que les Préalpes centrales et orientales mais sont en moyenne plus importantes que le Plateau suisse, le Valais central ou le Haut-Valais. Ceci peut potentiellement donner d'abondantes chutes de neige en hiver, si les températures sont assez basses (Rebetez & Serquet, 2013). En effet, l'ensemble des précipitations annuelles représente en moyenne entre 1366 et 1644 mm dans les Alpes vaudoises et elles sont réparties assez équitablement sur toute l'année (Figure 8). Au printemps, les précipitations sont en moyenne entre 316 et 404 mm, en été les précipitations sont les plus abondantes, soit en moyenne entre 395 et 491 mm, l'automne a le moins de précipitations avec en moyenne entre 301 et 359 mm et finalement pendant l'hiver il tombe en moyenne entre 318 et 432 mm de précipitations (Rebetez & Serquet, 2013).

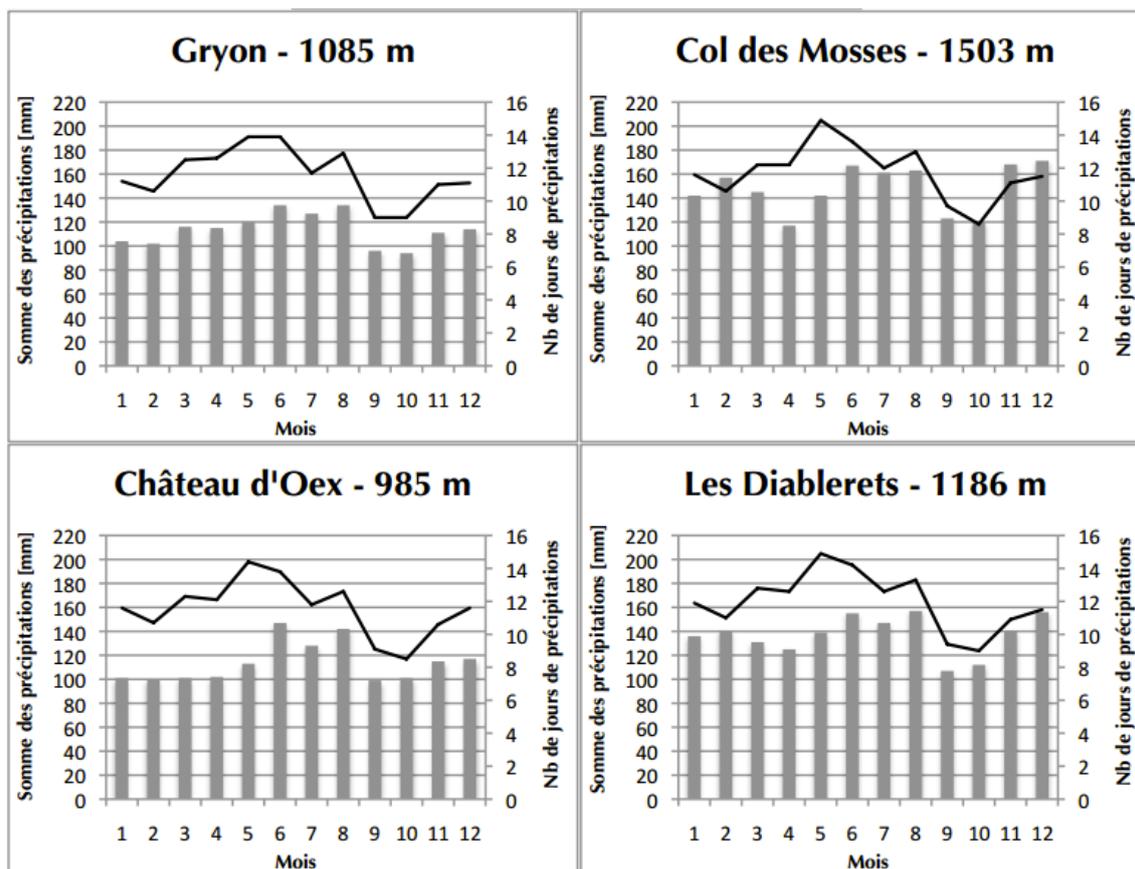


Figure 8 : Précipitations mensuelles moyennes de différentes stations des Alpes vaudoises évaluée de 1961 à 1990 avec le nombre mensuel moyen de jours de pluie (en noir) et les hauteurs d'eau moyennes par mois en mm (en gris) (Rebetez & Serquet, 2013)

Concernant la température, les deux facteurs principaux qui ont une influence sont tout d'abord la variation en fonction de l'altitude, à cause du facteur altitudinal. Le rôle de la topographie est aussi important, notamment pour les températures minimales durant les mois les plus froids, avec la création de lac d'air froid. En moyenne, le facteur altitudinal correspond au printemps et en été à  $-0,68$  °C/100m d'altitude, en automne à  $-0,52$  °C/100m et en hiver à  $-0,44$  °C/100m (Rebetez & Serquet, 2013). Les Alpes vaudoises ayant peu de secteurs à haute altitude, les températures restent assez douces par rapport aux stations de haute montagne.

Par rapport à l'ensoleillement, toutes les régions ont moins d'ensoleillement en hiver qu'en été, en raison de l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport au soleil (Rebetez & Serquet, 2013). Pendant l'hiver, l'ensoleillement est inférieur en plaine à cause du brouillard et en été, c'est le contraire à cause de la nébulosité et des orages plus fréquents en montagne. Par ailleurs, les stations des Alpes vaudoises possèdent un ensoleillement relatif un peu inférieur à celui des Alpes valaisannes et de l'Engadine (Rebetez & Serquet, 2013).

En ce qui concerne l'évolution du climat, l'augmentation des températures observée en Suisse, depuis le milieu des années 1970, devrait se poursuivre également dans les Alpes vaudoises. En effet, l'isotherme du 0 °C est monté de 300 m depuis les années 1960 et se situait en moyenne à environ 900 m d'altitude en hiver à la fin des années 1990 (Rebetez & Serquet, 2013). Par conséquent, la diminution de la part des précipitations neigeuses, par rapport au total des précipitations hivernales, sera de plus en plus importante et cette diminution sera plus forte à basse et à moyenne altitude. Pour l'avenir, la limite moyenne de l'enneigement subira un décalage en altitude de 150 à 230 m par degré d'augmentation de la température hivernale. De 1979 à 2008, la diminution de la part des précipitations sous forme de neige, par rapport au total des précipitations en hiver, était de 6 à 13% par décennie entre 800 et 1100 m et de 4 à 10% par décennie entre 1100 et 1400 m (Rebetez & Serquet, 2013). Actuellement, entre 800 et 1100m, le rapport entre les précipitations hivernales solides et l'ensemble des précipitations est environ de 50% et avec l'augmentation des températures à venir, ce rapport pour les altitudes entre 1100 et 1400 m devrait également atteindre ce seuil de 50% durant les mois d'hiver (Rebetez & Serquet, 2013). Toutefois, ces tendances sont générales et une grande variabilité d'une année à l'autre et d'un mois à l'autre persistera et ceci à toutes les altitudes.

## 2. Questions de recherche et objectifs

Dans ce travail, les objectifs d'études vont être définis à partir des différentes questions de recherche et de plusieurs hypothèses, qui ont été développées sur la base de la littérature évoquée dans l'état de l'art.

Sur la base des données climatiques de MétéoSuisse, de quelle manière le réchauffement des températures a-t-il influencé les chutes de neiges ? Quelle a été l'évolution des chutes de neiges depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle dans le Nord des Alpes en Suisse ?

Selon les scénarios CH2018, quelle pourrait être l'évolution future des chutes de neiges pour la région des Alpes vaudoises ? Quelle sera l'importance de la baisse des précipitations sous forme de neige pour les stations de moyennes altitudes situées dans cette région ?

Sur la base de ces questions de recherches, quatre hypothèses seront testées à travers ce travail, à savoir :

**H1** : À cause du changement climatique et de l'augmentation des températures, l'isotherme du 0°C aura tendance à être plus haut en altitude pendant l'hiver, ce qui impactera fortement les chutes de neige.

**H2** : Les régimes de précipitations semblent augmenter légèrement durant l'hiver, ce qui peut influencer positivement les chutes de neiges en haute altitude.

**H3** : Selon les projections des températures à venir (IPCC, 2013 ; IPCC, 2018 ; CH2018, 2018), les chutes de neiges devraient diminuer de manière importante pour les régions de basse et de moyenne altitude en hiver dans les Alpes.

**H4** : Les stations de Villars et des Diablerets étant situées en dessous de 2000 m/mer, l'évolution des chutes de neiges devrait être fortement impactée par le réchauffement des températures à venir.

A partir de ces questions de recherches et hypothèses présentées ci-dessus, les différents objectifs, de cette partie I : Evolution des chutes de neige, peuvent être décrits de la manière suivante :

- Récolte et analyse des données climatiques de différentes stations, afin d'établir un historique servant de période de référence
- Analyse de l'évolution passée des chutes des neiges pour le Nord des Alpes et les Alpes vaudoises
- Application de la méthode empirique selon Fallot (2017), afin d'estimer les chutes de neige de la région d'étude, à partir des précipitations et des températures moyennes de l'air mesurées
- Sur la base des scénarios climatiques pour la Suisse (CH2018, 2018), estimation des chutes de neige futures pour différents scénarios et classes d'altitude dans les Alpes vaudoises
- Discussion des résultats sur l'évolution future des chutes pour la région d'étude et comparaison des données

## 3. Méthode

### 3.1 Méthodologie

Pour estimer l'évolution des chutes de neiges, plusieurs méthodes sont envisageables. La plupart des études utilisent des modèles, afin de générer des simulations climatiques. Ces modèles se basent sur de nombreux paramètres et peuvent être utilisés à différentes échelles. On distingue ainsi les modèles climatiques généraux (GCMs) aux modèles climatiques régionaux (RCMs). Pour effectuer des simulations, il est important de se baser sur des périodes de référence afin de calibrer le modèle et ensuite pouvoir faire de prévisions à l'aide de différents scénarios (CH2018, 2018). Les scénarios utilisés sont souvent basés sur les différents RCP (Representative Concentration Pathways) élaborés par le GIEC (IPCC, 2013).

A l'échelle de la Suisse, seuls les modèles climatiques régionaux (RCMs) peuvent permettre une résolution suffisante pour obtenir des résultats valables (CH2018, 2018). Bien que ces modèles soient assez efficaces pour estimer l'évolution des températures, ils ne sont pas très précis pour estimer les précipitations, notamment sous forme de neige (Flato et al., 2013). De plus, étant donné la complexité de la topographie à petite échelle et des processus atmosphériques complexes notamment liés au cycle de l'eau, les modèles globaux et régionaux ne permettent pas d'avoir des résultats précis pour une localisation particulière (CH2018, 2018). Comme ce travail a pour objectif d'estimer les chutes de neiges pour une région assez restreinte, les modèles climatiques ne seront pas utilisés de manière directe. Ainsi, l'analyse de l'évolution des chutes de neiges sera effectuée à l'aide de formules empiriques, se basant sur les données de températures et de précipitations (Fallot, 2017).

En Suisse, les réseaux de mesures sont assez denses et comprennent de nombreuses stations mais comme ces stations sont de plus en plus automatisées, les mesures particulières comme les chutes de neige tendent à disparaître (Fallot, 2017). Seules, les stations possédant des mesures de la température, des précipitations et des chutes de neige sur une période de 20 ou 30 ans peuvent être utilisées pour déterminer des formules empiriques permettant de calculer des chutes de neige, à partir des températures et précipitations moyennes mensuelles mesurées par ces stations. Ces formules empiriques permettent ensuite d'estimer les chutes de neige en d'autres endroits où elles ne sont pas mesurées à partir des températures et précipitations moyennes mesurées à ces endroits-là. Si les données de températures ne sont pas disponibles, il est possible de calculer les températures moyennes mensuelles sur des périodes de 20 ou 30 ans à partir de mesures effectuées par les stations MétéoSuisse en d'autres endroits de la Suisse (Fallot, 2012), ce qui peut être utile pour certaines stations.

Tout d'abord, il s'agit de déterminer le rapport moyen entre les chutes de neige et les précipitations moyennes d'un mois en fonction de sa température (Fallot, 2017). Après avoir établi ce rapport en fonction des températures, il est possible d'estimer les chutes de neige moyennes pour différentes périodes et différentes classes d'altitudes, à l'aide de courbes de régression. Une fois les formules correctement calibrées, il est possible de faire des projections sur les chutes de neige futures, grâce à des données de températures et de précipitations qui correspondent aux différents scénarios climatiques pour la Suisse (CH2018, 2018).

### 3.2 Etapes du travail

Tout d'abord lors de la première étape du travail, toutes les informations concernant l'historique des chutes de neige de la zone d'étude ont été récoltées, selon les données disponibles. Ce premier travail a permis de déterminer l'évolution passée des chutes de neige pour les stations situées au Nord des Alpes, dont le climat est similaire à celui des Alpes vaudoises.

Ensuite, la deuxième étape de travail a consisté à récolter les données mensuelles, concernant les chutes de neiges (cm), les températures (°C) et les précipitations en (mm), pour les stations de mesures où ces paramètres sont disponibles. Ces données sont principalement issues du portail IDAWEB, permettant d'avoir accès au réseau de mesures de MétéoSuisse, dont seules 12 stations mesurant les chutes de neige, les températures de l'air et les précipitations ont pu être utilisées pour le Nord des Alpes (Figure 9).

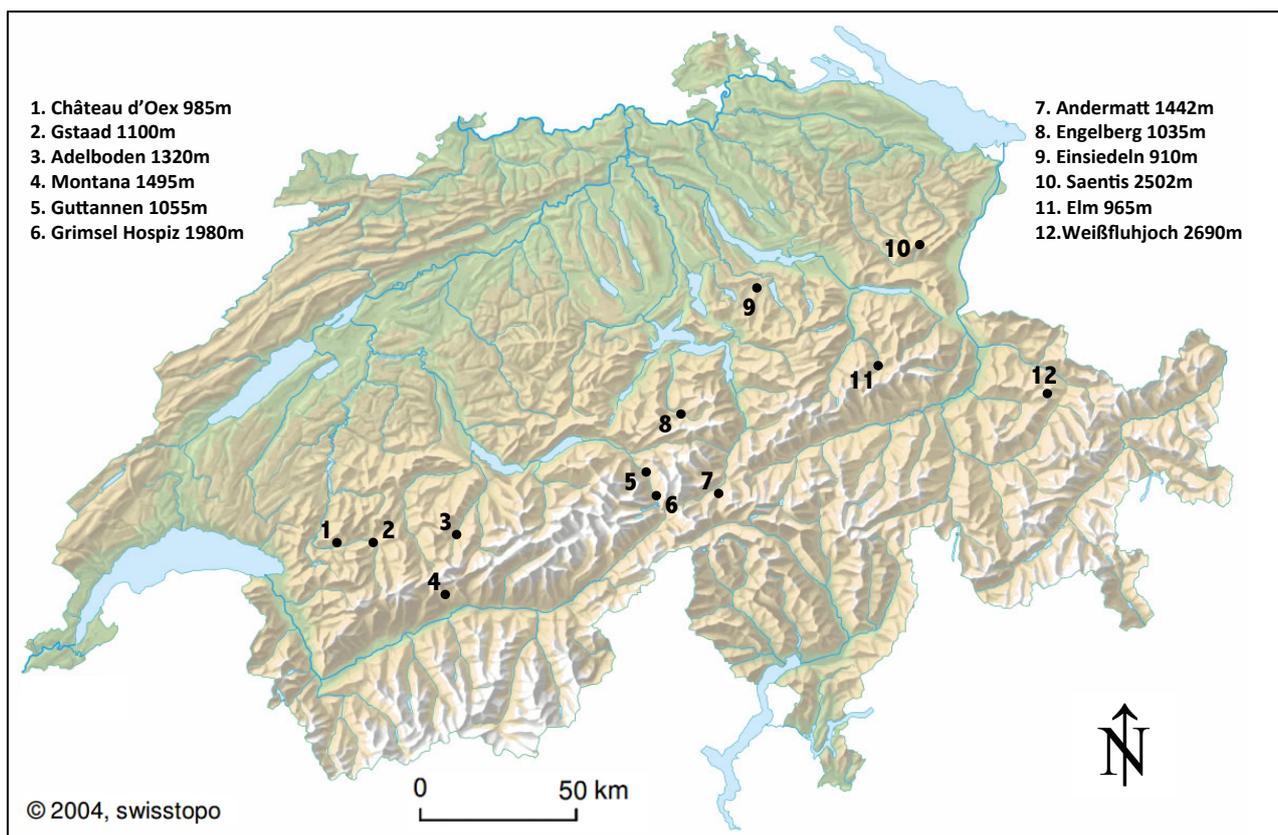


Figure 9 : Localisation des stations de mesures de MétéoSuisse sélectionnées pour cette étude

Après avoir récolté toutes les données, les moyennes mensuelles de chaque paramètre ont été calculées pour tous les mois de l'année sur une période de 31 ans (1981-2011), dans les différentes stations sélectionnées. Ceci a permis de déterminer pour chaque mois de l'année un rapport R moyen entre les données mensuelles des précipitations et les chutes de neige (RPCN) (Annexe 1).

Puis des régressions ont été calculées entre ces différents RPCN (Rapport R) et les températures mensuelles pour chaque mois sur l'ensemble de la période de référence de 1981 à 2011 (Figure 10). Ces régressions ont permis d'analyser la variation des RPCN en fonction de la température, aux différents endroits étudiés (Fallot, 2017).

Pour vérifier les résultats, les valeurs calculées à l'aide des formules des régressions ont été comparées aux données mesurées par les différentes stations sur la période de référence, afin de connaître la marge d'erreur des estimations.

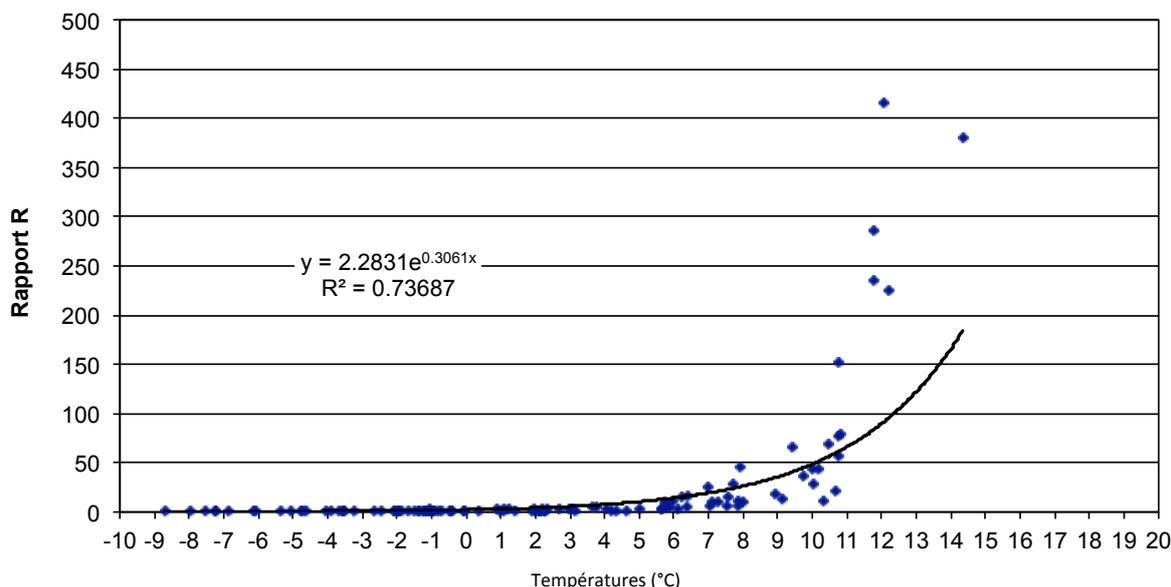


Figure 10 : Courbe de régressions entre les températures et les rapports R de l'ensemble des 12 stations étudiées

Bien que le coefficient de détermination  $R^2$  soit assez élevé pour la courbe de régression effectuée sur l'ensemble des stations, on constate que les données ne s'ajustent pas correctement à la courbe. Par conséquent, il a fallu distinguer les stations de manière empirique, à partir de la qualité d'ajustement des courbes et de leur situation altitudinale (Fallot, 2017). Ainsi les différentes stations ont été séparées en plusieurs tranches d'altitude et différentes périodes de l'année (Annexe 2).

Cette étape a permis d'obtenir des formules de régression, qui possèdent un coefficient de détermination  $R^2$  le plus élevé possible et un bon ajustement des données avec la courbe. Cette opération est assez délicate et demande de bien analyser les résultats, pour effectuer des régressions qui correspondent aux données et qui permettent de faire des projections fiables. En effet, les RPCN ne dépendent pas seulement de la température, mais aussi de la radiation solaire, de l'humidité relative et de la compaction relative (Roebber et al., 2003). De plus, le vent peut perturber fortement les mesures de la neige et des précipitations suivant les endroits, notamment sur les sommets exposés (Fallot, 2017).

Une fois ces courbes de régressions validées, l'évolution des chutes de neige a pu être estimée à partir de températures et précipitations moyennes saisonnières présentées dans les scénarios climatiques futurs pour la Suisse (CH2018, 2018). Cette évolution a été calculée pour différentes périodes de temps durant le 21<sup>ème</sup> siècle pour le Nord des Alpes et pour les Alpes vaudoises avec différents scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5). Ces scénarios permettent de simuler l'évolution à venir pour les différentes régions climatiques en Suisse, non seulement pour les températures moyennes saisonnières (Annexe 3) mais aussi pour les précipitations moyennes saisonnières (Annexe 4). Les différentes stations sélectionnées sont situées dans les régions climatiques suivantes :

- **La Suisse occidentale (CHW)** : Adelboden (1320m), Château-d'Oex (985m) et Gstaad (1100m)
- **La Suisse du Nord-Est (CHNE)** : Guttannen (1055m), Andermatt (1440m), Grimsel Hospiz (1980m), Saentis (2502m), Elm (965m), Engelberg (1035m) et Einsiedeln (910m)
- **Les Alpes orientales suisses (CHAE)** : Weissfluhjoch (2690m)
- **Les Alpes occidentales suisses (CHAW)** : Montana (1495m)

## 4. Résultats

### 4.1 Evolution passée des chutes de neige

Pour faire part de l'évolution des chutes de neige en lien avec les Alpes vaudoises, toutes les stations situées sur le versant Nord des Alpes ont été sélectionnées. En effet, comme il y a peu de stations dans les Alpes vaudoises avec des mesures de chutes de neige sur une longue période, les mesures d'autres stations situées sur le versant Nord des Alpes ont dû être utilisées. Ceci permet d'estimer l'évolution des chutes de neige sur une assez longue période dans le passé sur l'ensemble du versant Nord des Alpes, auquel les Alpes vaudoises se rattachent climatiquement. Les valeurs de chutes de neige moyennes mensuelles ont été additionnées, afin d'obtenir des valeurs des chutes de neige annuelles en mètre pour chaque station pour plusieurs tranches d'altitudes. Ensuite, comme les données présentaient une forte variabilité entre les années, une moyenne mobile sur 5 ans a été calculée, pour obtenir une meilleure visualisation de l'évolution des chutes de neige.

Tout d'abord, les stations de Meiringen (589 m), d'Einsiedeln (910 m) et de Guttannen (1055 m), ont été choisies pour les altitudes situées entre 500 et 1100m (Figures 11 et 12). Les valeurs obtenues pour ces stations sont très intéressantes, puisqu'elles permettent de montrer l'évolution des chutes de neiges depuis les années 1900 jusqu' à 2018.

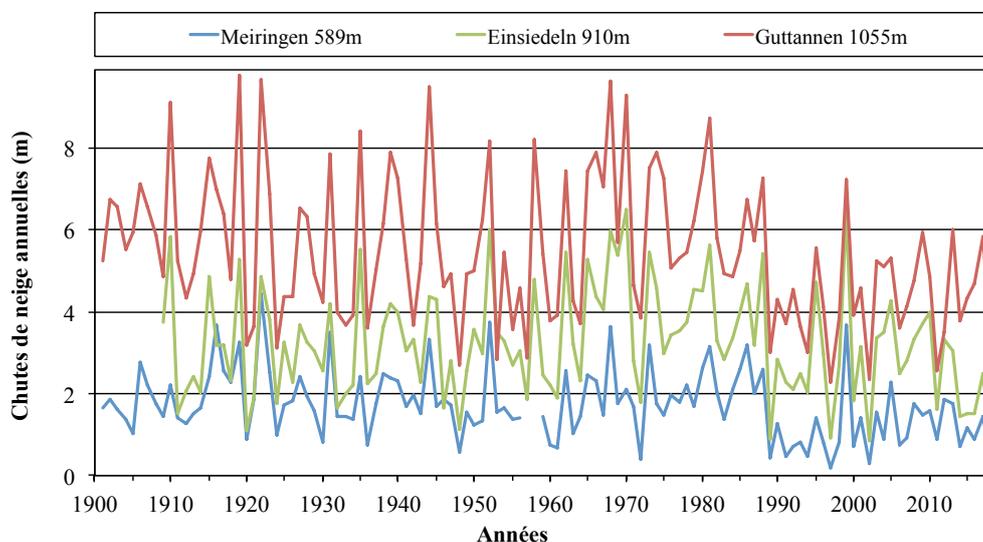


Figure 11: Evolution des chutes de neige au Nord des Alpes suisses de 500 à 1100m/mer depuis 1900 (valeurs brutes)

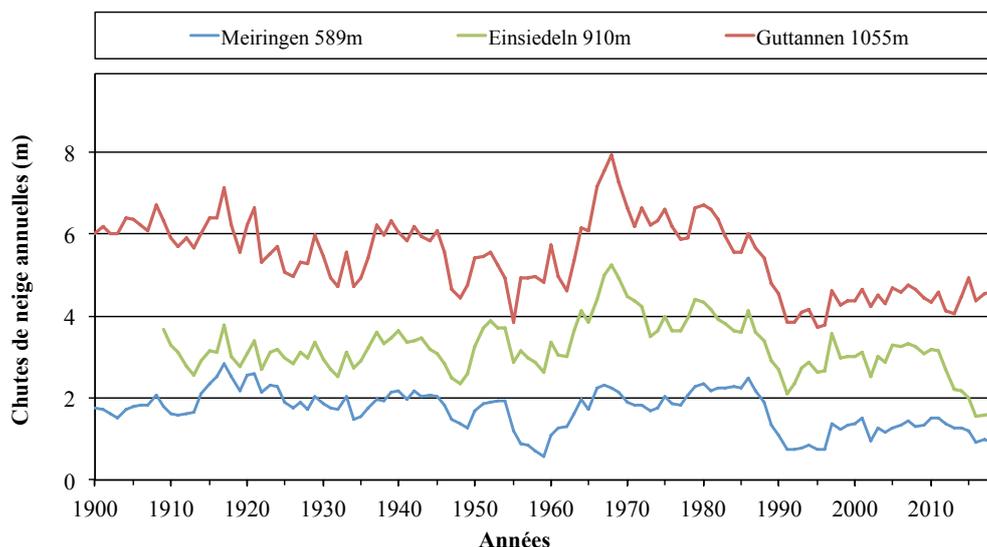


Figure 12 : Evolution des chutes de neige au Nord des Alpes suisses de 500 à 1100m/mer depuis 1900 (moyenne mobile sur 5 ans)

On observe sur ces graphiques, que les valeurs des chutes de neige annuelles sont premièrement fortement liées à l'altitude. En effet, la station de Meiringen (589m) possède des valeurs proches de 2m de précipitations neigeuses par année en moyenne, alors que celle de Guttannen (1055m) peut atteindre jusqu'à 8m de chutes de neige annuelles. Ensuite, le changement depuis le début du XXème siècle est très visible et montre une diminution nette des chutes de neiges entre les années 1900 et aujourd'hui. Il est également intéressant de voir que cette évolution n'est pas linéaire et que l'on peut observer une augmentation des précipitations solides de 1960 à la fin des années 1970. Ce phénomène est dû au fait que les températures ont légèrement diminué pendant cette période, ce qui a permis d'augmenter les chutes de neige à ces altitudes. La baisse la plus importante concerne la station de Guttannen, qui pouvait mesurer en moyenne 6m de précipitations neigeuses par an en 1900, alors qu'en 2018 la valeur est légèrement supérieure à 4m. Toutefois, les stations de Meiringen et d'Einsiedeln montrent également une forte diminution des chutes de neiges avec des valeurs proches de 1m en 2018, ce qui montre que cette tranche d'altitude (500-1100m) est fortement touchée par la baisse des précipitations sous forme de neige.

La deuxième série de données (Figures 13 et 14) concerne les stations situées entre 1300 et 2500m d'altitude, à savoir Adelboden (1320m), Andermatt (1440m), Grimsel Hospiz (1980m) et Saentis (2502m). Seule la station du Saentis possède des données depuis 1931, pour les 3 autres stations les données commencent seulement dans les années 1960.

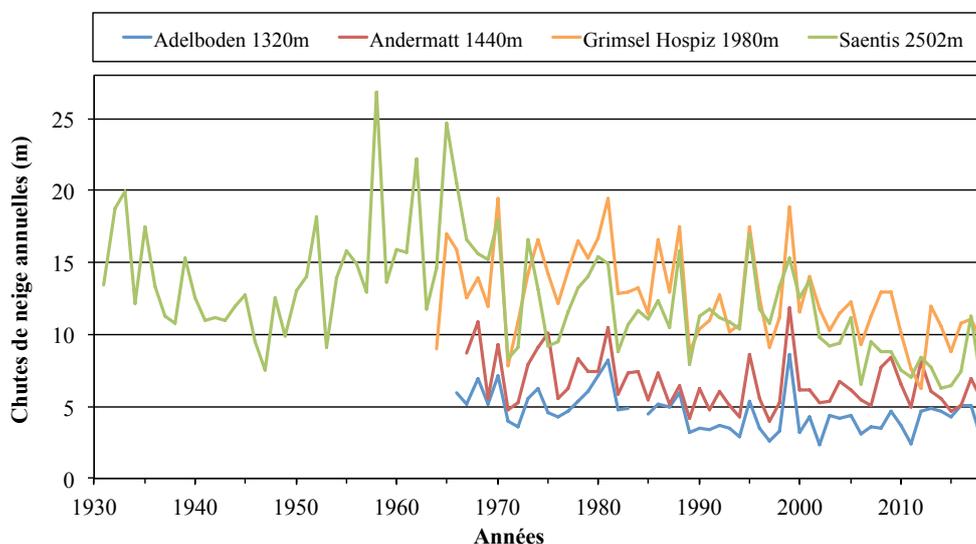


Figure 13 : Evolution des chutes de neige au Nord des Alpes suisses de 1300 à 2500m/mer depuis 1930 (valeurs brutes)

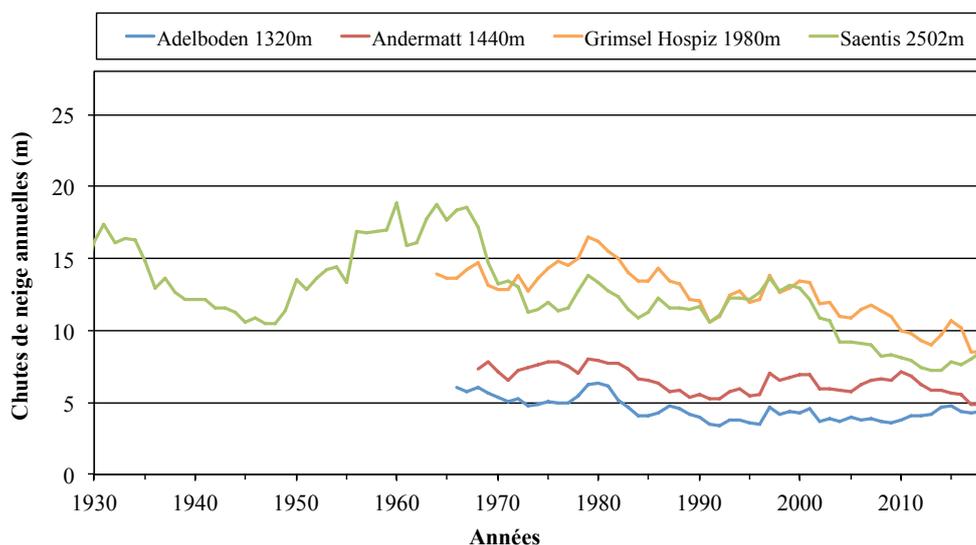


Figure 14 : Evolution des chutes de neige au Nord des Alpes suisses de 1300 à 2500m/mer depuis 1930 (moyennes mobiles sur 5 ans)

La variabilité des données est assez importante, notamment pour les stations du Saentis et de Grimsel Hospiz, ce qui pourrait montrer une fluctuation plus importante des chutes de neige en haute altitude. Cependant, la tendance est beaucoup plus claire sur les moyennes mobiles et comme pour les stations entre 500 et 1100m, on observe une variation marquée des précipitations neigeuses au cours du XXème siècle pour la station du Saentis (2502 m), avec une baisse entre 1940 et 1950 suivie d'une augmentation assez importante de 1960 à 1970. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que les années 1940-1950 ont été légèrement plus chaudes que les années 1960-1970 en Europe.

Bien que les chutes de neige annuelles soient légèrement plus importantes pour ces stations situées entre 1300 à 2500m, avec des valeurs autour 5m par année pour la plus basse Adelboden (1320m) et jusqu'à 19 m pour Saentis (2502m) la plus haute, la tendance est une diminution générale des chutes de neiges entre la fin des années 1960 et aujourd'hui pour l'ensemble des stations. En effet, cette diminution est particulièrement marquée pour les stations les plus élevées (Saentis et Grimsel Hospiz), avec des valeurs de chutes de neige annuelles mesurées à environ 15m en 1970 et inférieures à 10m en 2018. Cette baisse est moins visible pour les stations d'Adelboden et Andermatt, dont les précipitations neigeuses annuelles ont diminué d'environ 2m pour Andermatt et autour de 1m pour Adelboden entre les années 1970 et 2018.

Ces différents graphiques montrent les modifications des chutes de neige au cours du XXème siècle pour le Nord des Alpes à différentes altitudes. Du fait de conditions climatiques similaires, les Alpes vaudoises ont dû subir une évolution plus ou moins analogue depuis les années 1900. Cette évolution est marquée tout d'abord par une différence des chutes de neiges entre les stations à cause du facteur altitudinal, avec un cumul plus important pour les altitudes élevées que pour les altitudes plus basses. Ceci s'explique par le fait que la part des précipitations solides par rapport au total des précipitations est plus importante en haute altitude, à cause de la baisse de la température due au gradient altitudinal. En outre, les précipitations moyennes augmentent avec l'altitude.

Ensuite, on observe également une fluctuation assez importante du cumul des chutes de neige depuis les années 1900, avec une légère baisse entre 1940-1950, suivie d'une augmentation entre 1960-1970 et finalement une baisse progressive depuis 1980. En effet, les chutes de neige annuelles ont sensiblement diminué dans les années 1980 et elles sont assez constantes depuis 1990 pour les stations du Nord des Alpes, situées au-dessous de 1500 m/mer (sauf à Einsiedeln). De plus depuis l'an 2000, les chutes de neige annuelles ont sensiblement diminué au-dessus de 1500 m/mer (Grimsel Hospiz, Saentis), peut-être à cause d'une baisse marquée en saison chaude. Une telle baisse n'apparaît pas plus bas, car les précipitations tombent essentiellement sous forme de pluie en saison chaude, même avant les années 2000.

Finalement, certaines données ont pu être compilées pour des stations des Alpes vaudoises (Figure 15 et 16), à savoir Château-d'Oex (985m), Gstaad (1100m), Gryon (1146m) et Leysin (1250m). Ces données sont incomplètes et ne couvrent pas l'entier de la période, mais elles permettent d'illustrer l'évolution des chutes de neige dans les Alpes vaudoises. En effet, seule la station de Château d'Oex possède des données assez complètes, qui remontent à la fin des années 1950. Pour la station de Leysin, les chutes de neige annuelles ont été calculées seulement du mois d'octobre à mai, mais ceci n'a que peu d'influence sur les valeurs globales, car les précipitations neigeuses se produisent principalement durant cette période de l'année. La station de Gstaad a mesuré les chutes de neige de 1981 à 2010, elles étaient auparavant mesurées à Saanen de 1966 à 1980, situé à 1368 m/mer.

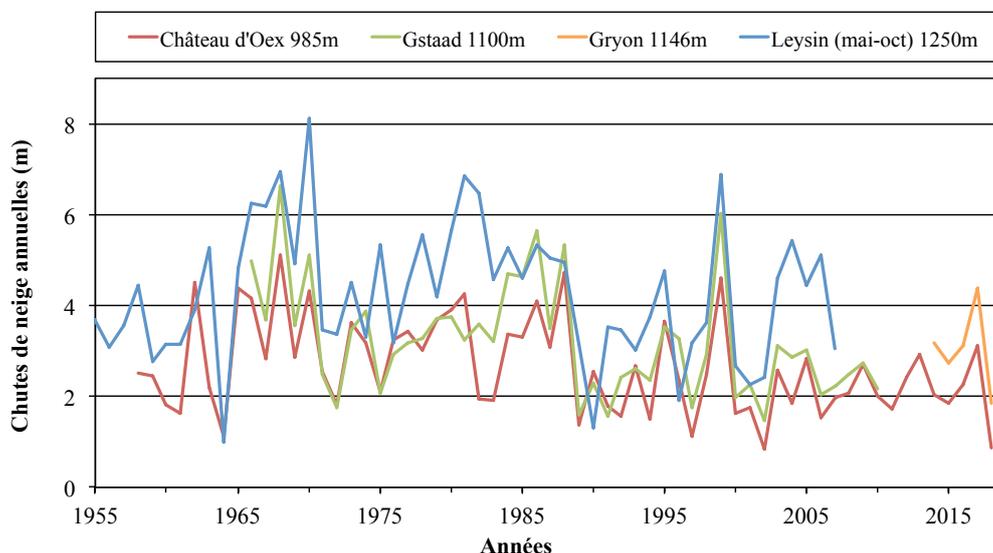


Figure 15 : Evolution des chutes de neige dans les Alpes vaudoises de 900 à 1300m/mer depuis 1955 (valeurs brutes)

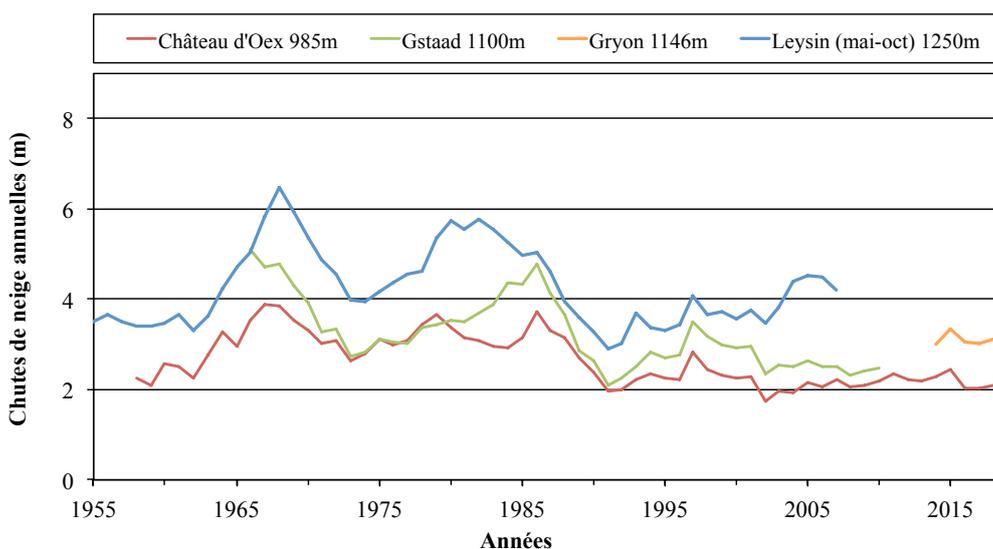


Figure 16 : Evolution des chutes de neige dans les Alpes vaudoises de 900 à 1300m/mer depuis 1955 (moyennes mobiles sur 5 ans)

A travers ces données, on observe également une fluctuation importante des chutes de neige depuis 1955 dans les Alpes vaudoises. Comme pour les stations du Nord des Alpes, une augmentation de précipitations neigeuses est bien visible entre les années 1960 et 1970. De plus, on constate également une diminution générale des chutes de neige annuelles depuis 1980, avec une baisse d'environ 2m pour les stations de Château d'Oex et Gstaad. Concernant la station de Leysin, les valeurs montrent une légère hausse depuis les années 2000, mais cela est certainement dû aux chutes de neige importantes des années 2004 et 2006, qui modifient de manière trop accentuée la moyenne mobile puisque les mesures s'arrêtent en 2007.

De manière globale, l'évolution des chutes de neige pour le Nord des Alpes semble être analogue aux Alpes vaudoises, au vu des données sur les années communes. En effet, les précipitations neigeuses annuelles sont semblables dans les Alpes vaudoises que dans le Nord des Alpes et les fluctuations des chutes de neige au cours du XXème semblent également correspondre entre les deux régions. Par conséquent, les valeurs obtenues pour les stations du Nord des Alpes aux différentes altitudes peuvent être une bonne image de l'évolution des chutes de neige dans les Alpes vaudoises.

## 4.2 Formules des régressions et comparaison avec les valeurs mesurées

Pour cette partie, la récolte des données a pu être effectuée pour 12 stations météorologiques, qui possédaient des mesures pour les paramètres de la température moyenne mensuelle à 2m du sol (°C), la somme mensuelle des précipitations (mm) et la somme mensuelle des chutes de neige (cm). Ces 12 stations sont comprises entre 900-2700 m d'altitude et sont situées au Nord des Alpes, à l'exception de Montana (VS) et du Weissfluhjoch (GR). En effet, il a fallu inclure la station de Montana, qui est proche des Alpes bernoises, et celle du Weissfluhjoch dans les Grisons, pour avoir davantage de stations en altitude afin de déterminer et calibrer les formules empiriques. Les données ont été rassemblées sur une période de 31 ans, afin de pouvoir calculer des valeurs de références robustes. Cette période a été sélectionnée, en fonction de la disponibilité des données pour avoir les valeurs les plus récentes possible, et s'étend donc de 1981 à 2011. Ainsi, les données de ces différentes stations ont permis d'estimer les chutes de neige à différentes altitudes avec les formules empiriques sur le versant Nord des Alpes, auquel se rattache climatiquement les Alpes vaudoises.

Tout d'abord, les moyennes mensuelles des différents paramètres (températures, précipitations et chutes de neige) ont été calculées pour les différentes stations sur l'ensemble de la période de référence 1981-2011. Ensuite, selon la méthode de Fallot (2017), les RPCN (Rapport entre les Précipitations et Chutes de Neige) ont été calculés pour chaque mois de l'année pour les différentes stations (Annexe 1). A cette étape, les données des mois les plus chauds, qui possédaient une valeur infinie à cause de l'absence de chutes de neige, ont été supprimées pour la suite du travail.

Une fois les RPCN établis pour chaque station, des courbes de régressions ont été calculées avec le logiciel Excel entre les différents RPCN et les valeurs de températures de l'air. Durant cette étape, plusieurs tranches d'altitudes et périodes de l'année ont été testés sur des graphiques de manière empirique, pour avoir les meilleurs résultats possibles et une bonne qualité d'ajustement de la courbe par rapport aux mesures (Annexe 2). Cette phase a permis de sélectionner 5 tranches d'altitudes principales et 4 périodes de l'année, afin d'obtenir des courbes de régression les mieux ajustées aux données et des coefficients de détermination  $R^2$  au minimum supérieur à 0.6 (Tableau 1). Les formules ainsi obtenues présentent des coefficients de détermination assez élevés, ce qui garantit une bonne fiabilité des résultats à venir.

Tableau 1 : Courbes de régression calculées entre les RPCN (y) et les températures moyennes mensuelles (x) avec leur coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour le Nord des Alpes sur l'ensemble de la période 1981-2011

Mois/Période	900-1000m/mer	1000-1400m/mer	1400-2000m/mer	2500m/mer (Sa)	2700m/mer (We)
Jan-Avril (I-IV)	$y = 2.0746e^{0.1196x}$ $R^2 = 0.89339$	$y = 1.3589e^{0.1081x}$ $R^2 = 0.89899$	$y = 1.2769e^{0.0697x}$ $R^2 = 0.87379$	$y = 1.8518e^{0.0319x}$ $R^2 = 0.62035$	$y = 0.856e^{0.0201x}$ $R^2 = 0.87439$
Mai-Juin (V-VI)	$y = 0.0267e^{0.7432x}$ $R^2 = 0.98411$	$y = 2E-05e^{1.4061x}$ $R^2 = 0.90904$	$y = 0.1097e^{0.5828x}$ $R^2 = 0.92335$	$y = 2.4377e^{0.1974x}$ $R^2 = 0.9197$	$y = 1.5628e^{0.2809x}$ $R^2 = 0.92995$
Sept-Oct (IX-X)	$y = 0.0149e^{1.0191x}$ $R^2 = 0.99237$	$y = 0.033e^{0.765x}$ $R^2 = 0.96883$	$y = 0.1943e^{0.5649x}$ $R^2 = 0.9432$		
Nov-Déc (XI-XII)	$y = 2.6675e^{0.1317x}$ $R^2 = 0.9079$	$y = 1.6009e^{0.1164x}$ $R^2 = 0.85007$	$y = 1.4975e^{0.1049x}$ $R^2 = 0.85695$	$y = 1.8518e^{0.0319x}$ $R^2 = 0.62035$	$y = 0.856e^{0.0201x}$ $R^2 = 0.87439$

Sa=Saentis/We=Weissfluhjoch

Les classes d'altitudes ont été définies de la manière suivante pour les différentes stations : **900-1000m** : Château d'Oex (985m), Einsiedeln (910m) et Gstaad (1100m) ; **1000-1400m** : Elm (965m), Engelberg (1035m), Guttanen (1055m) et Adelboden (1320m) ; **1400-2000m** :

Andermatt (1442m), Montana (1495m) et Grimsel Hospiz (1980m); **2500m** : Saentis (2502m) ; **2700m** : Weissfluhjoch (2690m).

Concernant les stations de Gstaad (1100m) et d'Elm (965m), elles ont été placées dans des classes qui ne correspondent pas à leur altitude. En effet, dans l'étude sur les chutes de neige pour l'ensemble de la Suisse (Fallot, 2017), la station d'Elm montre des rapports RPCN semblables aux stations situées au-dessus de 1000 m/mer, alors que c'est l'inverse pour la station de Gstaad. Pour la tranche d'altitude 1400-2000m, les chutes de neige moyennes mensuelles et saisonnières ont d'abord été calculées avec les stations de Davos et d'Arosa situées dans les Grisons. Les valeurs ainsi estimées, à partir des formules empiriques pour cette tranche d'altitude, se sont souvent montrées trop basses à Davos et Arosa par rapport aux valeurs mesurées, alors que c'était l'inverse pour les stations d'Andermatt et de Grimsel Hospiz. Cela provient du fait que le régime pluviométrique et des chutes de neige semblent différent dans les Grisons de celui du Nord des Alpes, à cause des différences climatiques régionales. Par conséquent ces 2 stations des Grisons ont été enlevées et les résultats ont été bien meilleurs.

En ce qui concerne les périodes de l'année des classes d'altitude 900-1000m, 1000-1400m et 1400-2000m, les formules empiriques ont été calculées pour les mois de janvier-avril, de mai-juin, de septembre-octobre et de novembre-décembre. Le choix de ces périodes correspond aux mois durant lesquelles le régime des chutes de neige et donc les RCPN se ressemblent. Pour les stations du Saentis (2502m) et du Weissfluhjoch (2692m), les conditions sont si particulières qu'elles ont chacune leur propre courbe de régression. Ainsi, les formules empiriques ont été calculées pour 2 périodes, une pour la saison froide (novembre-avril) et l'autre pour la saison chaude (mai-octobre). Comme les chutes de neige sont pratiquement inexistantes durant les mois de juillet et d'août sur ces 2 sommets, les formules obtenues pour cette période n'ont pas été utilisées dans la suite du travail.

Les formules empiriques ainsi obtenues, pour chaque période de l'année et pour les différentes classes d'altitudes, permettent de bien représenter les chutes de neiges mesurées dans les stations sélectionnées sur l'ensemble de la période 1981-2011 (Tableau 2). En effet, les différences entre les valeurs mesurées et calculées sont généralement assez faibles ( $\leq 15\%$ ).

**Tableau 2 : Différence (%) entre les chutes de neige moyennes mensuelles calculées à partir des RPCN moyens et celles mesurées sur l'ensemble de la période 1981-2011**

Mois/Saison	900-1000m/mer	1000-1400m/mer	1400-2000m/mer	2500m/mer (Sa)	2700m/mer (We)
I	112.6%	107.3%	103.8%	104.0%	101.9%
II	94.0%	98.8%	98.3%	93.5%	99.6%
III	87.5%	92.0%	97.5%	101.9%	98.2%
IV	109.9%	104.3%	102.0%	100.4%	100.9%
V	100.2%	93.6%	106.2%	110.0%	115.1%
VI	-	100.8%	112.9%	103.9%	99.7%
VII	-	-	-	-	-
VIII	-	-	-	-	-
IX	112.1%	105.5%	106.9%	97.4%	102.0%
X	106.0%	101.7%	104.4%	89.5%	84.1%
XI	100.1%	100.5%	101.7%	97.1%	99.5%
XII	100.5%	100.1%	98.7%	103.4%	99.9%
<b>Hiver</b>	101.9%	101.5%	99.7%	100.4%	100.5%
<b>Print.</b>	93.9%	95.6%	101.2%	102.8%	102.8%
<b>Été</b>	-	119.3%	100.9%	103.8%	99.7%
<b>Aut.</b>	100.3%	99.8%	102.3%	94.9%	95.7%
<b>An</b>	100.0%	99.7%	100.0%	100.2%	100.2%

Sa=Saentis/ We=Weissfluhjoch

### 4.3 Evolution future des chutes de neige

Dans la partie précédente, les régressions effectuées permettent de calculer de manière assez précise les chutes de neige pour le Nord des Alpes pour la période actuelle (1981-2011). Par conséquent, il est possible d'utiliser les formules obtenues à l'aide de ces régressions, afin d'effectuer des projections sur les chutes de neiges à venir. En effet, ces formules utilisées avec les données de températures et de précipitations des scénarios climatiques du rapport CH2018 (Annexes 3 et 4), peuvent permettre de calculer l'évolution des chutes de neige en lien avec le changement climatique pour différentes périodes du XIXème siècle. Ainsi, les valeurs moyennes des précipitations et températures projetées des annexes 3 et 4 (med.) ont été utilisées pour calculer les chutes de neige futures, à l'horizon 2085 avec les 2 scénarios RCP 4.5 et 8.5.

Premièrement, le scénario RCP 4.5, qui simule une augmentation modérée des émissions des gaz à effet de serre, a été utilisé pour la période 2085 allant de 2070 à 2100 (Tableau 3). Ce scénario permet de faire une projection des chutes de neige dans le Nord des Alpes, avec une élévation modérée des températures jusqu'à la fin du siècle. Les données sont présentées par classes d'altitude, avec les valeurs minimales (Min) et maximales (Max) de chaque classe montrant la dispersion des données entre les stations. Pour les classes de 2500m et 2700m seules une station a pu être utilisée pour chacune d'elles, à savoir Saentis (2502m) et Weissfluhjoch (2690m).

**Tableau 3 : Evolution moyenne des chutes de neige estimées au Nord des Alpes (avec Montana et Weissfluhjoch) par rapport à la période 1981-2011 pour le scénario d'émissions des gaz à effet de serre RCP 4.5 en 2085 (2070-2100)**

Mois/Saison	900-1000m/mer		1000-1400m/mer		1400-2000m/mer		Saentis 2500m/mer	Weissfluhjoch 2700m/mer
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
<b>I</b>	-12.9%	-15.0%	-10.8%	-13.0%	-3.7%	-7.7%	+3.9%	+3.2%
<b>II</b>	-12.9%	-15.0%	-10.8%	-13.0%	-3.7%	-7.7%	+3.9%	+3.2%
<b>III</b>	-12.1%	-12.9%	-10.5%	-11.4%	-5.0%	-12.6%	+0.8%	-0.5%
<b>IV</b>	-12.1%	-12.9%	-10.5%	-11.4%	-5.0%	-12.6%	+0.8%	-0.5%
<b>V</b>	-66.0%	-66.8%	-87.5%	-88.2%	-57.3%	-66.0%	-22.2%	-38.4%
<b>VI</b>	-	-	-96.1%	-96.8%	-75.0%	-82.5%	-40.5%	-54.4%
<b>VII</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>VIII</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>IX</b>	-86.1%	-86.6%	-77.4%	-78.0%	-67.0%	-74.3%	-30.7%	-49.0%
<b>X</b>	-86.1%	-86.6%	-77.4%	-78.0%	-67.0%	-74.3%	-30.7%	-49.0%
<b>XI</b>	-20.8%	-21.9%	-18.3%	-19.5%	-16.4%	-25.0%	-3.1%	-3.9%
<b>XII</b>	-15.0%	-17.1%	-12.3%	-14.5%	-10.3%	-14.6%	+3.9%	+3.2%
<b>Hiver</b>	-13.6%	-15.7%	-11.3%	-13.5%	-5.8%	-10.0%	+3.9%	+3.2%
<b>Print.</b>	-13.7%	-15.3%	-12.8%	-17.6%	-11.8%	-15.2%	-3.4%	-8.8%
<b>Été</b>	-	-	-96.1%	-98.5%	-75.7%	-82.5%	-66.8%	-73.9%
<b>Aut.</b>	-27.5%	-28.5%	-25.4%	-28.9%	-28.0%	-34.1%	-15.4%	-22.8%
<b>An</b>	-15.3%	-17.2%	-13.7%	-16.9%	-11.6%	-15.3%	-7.2%	-12.1%

Pour cette projection, les résultats montrent une diminution générale des chutes de neige annuelles à toutes les altitudes, allant de -7.2% pour la classe 2700m et jusqu'à -17.2% pour la classe 900-1000m. De manière générale, on observe une diminution progressive en fonction des classes, à cause du gradient altitudinal et des températures plus élevées à basse altitude. D'ailleurs, on constate que la baisse des chutes de neige est plus marquée pour les classes 900-1000m et 1000-1400m.

En ce qui concerne les périodes de l'année, la baisse est beaucoup plus importante pour les mois de mai-juin et septembre-octobre. Bien que les chutes de neige soient déjà faibles à

cette période, l'augmentation des températures réduira de manière très importante les précipitations neigeuses à cette époque de l'année à basse altitude. Pour les mois de novembre-décembre et janvier-avril, la baisse est plus importante au début de l'hiver, où les chutes de neige pourront diminuer de -10.3% à -25.0% suivant les altitudes.

Pour les stations du Saentis (2502m) et du Weissfluhjoch (2692m), il apparaît que les mois de décembre à avril présenteront une légère augmentation des chutes de neige pour la période hivernale. En effet, comme ces stations sont en haute altitude, les températures moyennes resteront suffisamment basses pour que toutes les précipitations tombent sous forme de neige en saison froide. Par conséquent, les chutes de neige vont légèrement augmenter à ces altitudes-là, consécutivement à la hausse des précipitations prévue d'ici à l'an 2085 pour la saison froide.

La deuxième projection du Nord des Alpes (Tableau 4) a été effectuée également pour la période 2085 (2070-2100) mais avec le scénario RCP 8.5, qui simule une hausse importante des émissions futures des gaz à effet de serre sans aucune mesure d'atténuation.

**Tableau 4 : Evolution moyenne des chutes de neige estimées au Nord des Alpes (avec Montana et Weissfluhjoch) par rapport à la période 1981-2011 pour le scénario d'émissions des gaz à effet de serre RCP 8.5 en 2085 (2070-2100)**

Mois/Saison	900-1000m/mer		1000-1400m/mer		1400-2000m/mer		Saentis 2500m/mer	Weissfluhjoch 2700m/mer
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
<b>I</b>	-26.0%	-27.1%	-22.8%	-23.8%	-12.0%	-14.4%	+1.5%	+7.9%
<b>II</b>	-26.0%	-27.1%	-22.8%	-23.8%	-12.0%	-14.4%	+1.5%	+7.9%
<b>III</b>	-26.9%	-28.6%	-24.1%	-25.9%	-13.9%	-23.6%	-2.5%	-2.8%
<b>IV</b>	-26.9%	-28.6%	-24.1%	-25.9%	-13.9%	-23.6%	-2.5%	-2.8%
<b>V</b>	-89.9%	-90.5%	-98.7%	-98.9%	-84.0%	-89.5%	-43.4%	-63.5%
<b>VI</b>	-	-	-99.9%	-99.9%	-94.0%	-96.7%	-65.8%	-79.6%
<b>VII</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>VIII</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>IX</b>	-98.1%	-98.2%	-95.1%	-95.1%	-89.3%	-92.8%	-54.8%	-72.4%
<b>X</b>	-98.1%	-98.2%	-95.1%	-95.1%	-89.3%	-92.8%	-54.8%	-72.4%
<b>XI</b>	-41.5%	-42.3%	-37.9%	-38.7%	-35.0%	-41.7%	-13.5%	-11.3%
<b>XII</b>	-29.3%	-30.3%	-25.2%	-26.2%	-22.9%	-25.4%	+1.5%	+7.9%
<b>Hiver</b>	-27.0%	-28.1%	-23.6%	-24.6%	-15.5%	-18.1%	+1.5%	+7.9%
<b>Print.</b>	-28.7%	-31.3%	-26.3%	-31.6%	-23.0%	-26.8%	-9.9%	-16.1%
<b>Été</b>	-	-	-99.9%	-99.9%	-94.1%	-96.7%	-80.9%	-88.3%
<b>Aut.</b>	-47.2%	-48.0%	-44.7%	-48.1%	-47.5%	-53.5%	-31.9%	-36.9%
<b>An</b>	-30.0%	-30.8%	-27.9%	-29.7%	-23.5%	-27.7%	-14.6%	-16.6%

Avec le scénario RCP 8.5, les diminutions des chutes de neige sont clairement plus importantes que pour la projection précédente et cela pour toutes les altitudes. En effet, les valeurs annuelles montrent une diminution progressive en fonction des classes d'altitude, avec une baisse allant jusqu'à -30.8% pour la classe 900-1000m. Cette diminution est donc assez importante pour ce scénario RCP 8.5 et les baisses des chutes de neige semblent être presque deux fois supérieures à celles du scénario RCP 4.5 pour la même période.

Comme pour le scénario RCP 4.5, on constate une variation de la baisse des chutes de neiges entre les différentes périodes de l'année. Ainsi, la diminution est beaucoup plus importante pour les mois de mai-juin et septembre-octobre, avec une disparition quasi totale des précipitations neigeuses à cette période pour les basses altitudes.

En ce qui concerne la période froide, la baisse est également très importante pour les classes de 900 à 2000m d'altitude, en particulier pour le mois de novembre, avec des valeurs de -35.0% à -42.3%, et aussi de manière un peu moins marquée pour le mois de décembre, avec

des valeurs de -22.9% à -30.3%. Durant les mois de janvier-avril, cette baisse reste assez importante pour les classes de 900 à 1400 m (de -24.1% à -28.6%), alors que la diminution est nettement plus faible pour la classe de 1400-2000m (de -12.0% à -23.6%). Ce résultat montre une différence de la diminution des chutes de neiges à partir de 1400m pour la période hivernale.

Pour les classes 2500m et 2700m, on constate de nouveau une augmentation des chutes de neige pendant la période hivernale, avec des valeurs de +7.9% au Weissflujoch et +1.5% au Saentis. Cette augmentation est nettement plus marquée pour le Weissfluhjoch que pour le Saentis. Cette valeur du Saentis est d'ailleurs plus faible que le scénario RCP 4.5, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que les températures moyennes ne resteront pas suffisamment basses à 2500 m avec le scénario RCP 8.5, pour que toutes les précipitations tombent sous forme de neige en saison froide. Toutefois de manière générale, la baisse des précipitations neigeuses est plus importante en saison chaude pour la station du Weissfluhjoch (2690m) que celle du Saentis (2502m), pourtant plus basse en altitude. Il en résulte une baisse moins marquée au Saentis à l'échelle annuelle, avec une valeur de -14.6%. Ceci semble dû aux valeurs des mois de mai-juin et septembre-octobre, qui présentent une diminution assez faible des chutes de neige au Saentis par rapport aux autres classes d'altitudes. Cette différence peut s'expliquer non seulement à cause du vent, qui pourrait fausser légèrement les mesures au Saentis, mais aussi par des approximations plus importantes dans les estimations des chutes de neige à partir des formules empiriques pour ces stations en saison chaude.

Finalement, l'évolution des chutes de neige dans les Alpes vaudoises a été calculée d'ici à l'an 2085, à partir des formules empiriques déterminées pour les différentes classes d'altitude sur la base d'autres stations du versant Nord des Alpes (Tableaux 5 et 6). Pour ce faire, les valeurs des températures et des précipitations, projetées par les modèles climatiques pour l'Ouest de la Suisse (CHW) d'ici à l'an 2085 avec les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, ont été utilisées.

**Tableau 5 : Evolution moyenne des chutes de neige estimées dans les Alpes vaudoises rapport à la période 1981-2011 pour le scénario d'émissions des gaz à effet de serre RCP 4.5 en 2085 (2070-2100)**

Mois/Saison	900-1000m/mer	1000-1400m/mer	1400-2000m/mer	2500m/mer	2700m/mer
<b>I</b>	-15.0%	-13.0%	-6.0%	+1.5%	+3.9%
<b>II</b>	-15.0%	-13.0%	-6.0%	+1.5%	+3.9%
<b>III</b>	-12.9%	-11.4%	-6.1%	-0.6%	+1.2%
<b>IV</b>	-12.9%	-11.4%	-6.1%	-0.6%	+1.2%
<b>V</b>	-66.0%	-87.5%	-56.7%	-22.6%	-31.8%
<b>VI</b>	-	-96.8%	-77.1%	-42.8%	-53.1%
<b>VII</b>	-	-	-	-	-
<b>VIII</b>	-	-	-	-	-
<b>IX</b>	-86.1%	-77.4%	-66.6%	-31.3%	-41.7%
<b>X</b>	-86.1%	-77.4%	-66.6%	-31.3%	-41.7%
<b>XI</b>	-21.9%	-19.5%	-17.7%	-5.0%	-2.8%
<b>XII</b>	-17.1%	-14.5%	-12.5%	+1.5%	+3.9%
<b>Hiver</b>	-15.7%	-13.5%	-8.1%	+1.5%	+3.9%
<b>Print.</b>	-14.8%	-16.0%	-12.9%	-4.6%	-6.0%
<b>Été</b>	-	-98.9%	-77.1%	-68.1%	-73.1%
<b>Aut.</b>	-28.7%	-28.4%	-30.1%	-16.8%	-19.1%
<b>An</b>	-17.0%	-16.4%	-13.6%	-9.0%	-10.2%

L'évolution des chutes de neiges, estimées dans les Alpes vaudoises en 2085 avec le scénario RCP 4.5, présente de manière générale des valeurs assez similaires à celles calculées pour le Nord des Alpes. Cependant, les résultats pour les classes 2500m et 2700m sont légèrement différents. En effet, l'augmentation des chutes de neige est moins importante pendant la période hivernale à 2500m dans les Alpes vaudoises qu'au Nord des Alpes, alors que c'est l'inverse à 2700m. De plus, on peut observer une diminution légèrement supérieure des précipitations neigeuses entre 1400 et 2000m pour les Alpes vaudoises que pour le Nord des Alpes.

Ces différences sont liées au fait que, d'après les projections des modèles climatiques régionaux (cf. Annexe 4), les précipitations vont davantage augmenter en saison froide d'ici à l'an 2085 avec le scénario RCP 4.5 dans la Suisse du Nord-Est (CHNE) par rapport à la Suisse occidentale (CHW), à laquelle se rattache les Alpes vaudoises. Comme la tranche d'altitude 1400-2000m comporte de nombreuses stations situées dans le Nord-Est de la Suisse (CHNE), lorsque les projections pour les Alpes vaudoises (CHW) sont appliquées sur ces stations, cela crée une diminution des précipitations totale et donc une baisse plus importante des chutes de neige. Le même phénomène se produit pour la station du Saentis, c'est pourquoi l'augmentation des chutes de neige est moins importante pendant la période hivernale à 2500m dans les Alpes vaudoises qu'au Nord des Alpes. Pour la station du Weissfluhjoch (GR), les modèles climatiques régionaux prévoient une hausse plus faible des précipitations à l'horizon 2085 avec le scénario RCP 4.5 en mars et avril (cf. Annexe 4) pour les Alpes orientales (CHAE) que pour la Suisse occidentale (CHW). Par conséquent, on observe une augmentation des chutes de neige un peu plus marquée pendant cette période à 2700m dans les Alpes vaudoises par rapport au Nord des Alpes.

**Tableau 6 : Evolution moyenne des chutes de neige estimées dans les Alpes vaudoises rapport à la période 1981-2011 pour le scénario d'émissions des gaz à effet de serre RCP 8.5 en 2085 (2070-2100)**

Mois/Saison	900-1000m/mer	1000-1400m/mer	1400-2000m/mer	2500m/mer	2700m/mer
<b>I</b>	-26.0%	-22.8%	-11.0%	+2.5%	+7.1%
<b>II</b>	-26.0%	-22.8%	-11.0%	+2.5%	+7.1%
<b>III</b>	-28.6%	-25.9%	-16.4%	-5.9%	-2.4%
<b>IV</b>	-28.6%	-25.9%	-16.4%	-5.9%	-2.4%
<b>V</b>	-89.9%	-98.7%	-83.3%	-44.0%	-57.0%
<b>VI</b>	-	-99.9%	-94.8%	-69.3%	-79.1%
<b>VII</b>	-	-	-	-	-
<b>VIII</b>	-	-	-	-	-
<b>IX</b>	-98.2%	-95.2%	-89.4%	-55.4%	-67.8%
<b>X</b>	-98.2%	-95.2%	-89.4%	-55.4%	-67.8%
<b>XI</b>	-42.3%	-38.7%	-35.9%	-14.7%	-10.7%
<b>XII</b>	-29.3%	-25.2%	-21.9%	+2.5%	+7.1%
<b>Hiver</b>	-27.1%	-23.6%	-14.5%	+2.5%	+7.1%
<b>Print.</b>	-30.7%	-30.3%	-25.4%	-12.8%	-14.3%
<b>Été</b>	-	-100.0%	-94.8%	-82.9%	-88.0%
<b>Aut.</b>	-48.2%	-47.4%	-49.5%	-32.9%	-34.7%
<b>An</b>	-30.5%	-29.0%	-23.9%	-15.4%	-15.9%

En ce qui concerne le scénario RCP 8.5 pour les Alpes vaudoises, la tendance est également similaire que pour le Nord des Alpes. Toutefois, certaines différences apparaissent pour la classe 2500m et 2700m dans les Alpes vaudoises, avec une diminution des chutes de neige à 2500 m et une augmentation des chutes de neige à 2700m par rapport au Nord des Alpes. De même pour la classe 1400-2000m, la diminution des chutes de neige semble légèrement

moins marquée dans les Alpes vaudoises qu'au Nord des Alpes, alors que c'était l'inverse avec le scénario RCP 4.5.

Ces divergences, entre les Alpes vaudoises et le Nord des Alpes, proviennent des différences dans l'évolution des précipitations et des températures d'ici à l'an 2085 calculées par les modèles climatiques régionaux entre les différentes régions climatiques de Suisse (cf. Annexes 3 et 4). Contrairement au scénario RCP 4.5, le scénario RCP 8.5 projette une hausse des précipitations plus importante en hiver à l'horizon 2085 en Suisse occidentale (CHW) que dans le Nord-Est de la Suisse (CHNE). Ainsi, la baisse des chutes de neige est moins marquée dans les Alpes vaudoises que dans le Nord des Alpes avec le scénario RCP 8.5 pour la classe 1400-2000m. Concernant les températures (cf. Annexe 3), les projections sont plus homogènes mais il existe certaines différences, notamment entre la Suisse occidentale (CHW) et les Alpes orientales (CHAE). En effet, les températures augmenteront un peu plus dans les Grisons (CHAE) que dans les Alpes vaudoises (CHW) d'ici à l'an 2085. Par conséquent, la hausse des chutes de neige, qui est plus importante pour les Alpes vaudoises que pour le Nord des Alpes à 2700m, peut être expliquée par le fait que la station du Weissfluhjoch est située dans les Alpes orientales (CHAE).

Malgré ces légères différences, la tendance générale est la même pour les Alpes vaudoises que pour le Nord des Alpes, avec une baisse des précipitations neigeuses généralement plus marquée avec le scénario RCP 8.5 et une diminution des chutes de neige nettement plus importante pour les altitudes comprises entre 900 et 1400m en hiver. En effet, la diminution est moins marquée pour la classe 1400-2000m, notamment pendant la période hivernale. Concernant les altitudes de 2500m et de 2700m, la baisse des chutes de neige est assez importante pour les mois de mai-juin et septembre-octobre, mais on constate une légère hausse pendant la période hivernale en lien avec l'augmentation des précipitations totales.

## 5. Discussion

A travers les différentes analyses effectuées dans ce travail, il a été possible de faire des projections des chutes de neige pour le Nord des Alpes et la région des Alpes vaudoises. Ces projections, qui sont basées sur les scénarios RCP 4.5 et 8.5 pour la période 2085 (CH2018, 2018), ont permis d'observer une nette diminution des précipitations annuelles sous forme de neige pour toutes les classes d'altitude. Cette diminution est particulièrement élevée pour les mois d'été et d'automne, alors que les valeurs fluctuent davantage en fonction de l'altitude pour les mois d'hiver.

Comme attendu, la baisse des chutes de neiges est plus importante pour les basses altitudes pendant la période hivernale et on peut observer une différence notable entre les classes 900-1000m et 1000-1400m par rapport à la classe 1400-2000m. En effet, que ce soit pour le scénario RCP 4.5 ou RCP 8.5, la diminution des précipitations neigeuses est plus marquée en dessous de 1400m pour les mois d'hiver. Par conséquent, un pallier peut être identifié dès 1400m, à partir duquel les chutes de neige hivernales seront légèrement moins impactées par la hausse de températures à venir. Ce phénomène est d'autant plus visible pour les classes de 2500m et de 2700m, car on peut observer une augmentation des chutes de neige pendant la période hivernale pour ces altitudes liée à une hausse des précipitations totales.

Ces résultats montrent l'influence des températures hivernales sur les chutes de neige, car l'isotherme du 0°C détermine la part des précipitations neigeuses, par rapport aux précipitations totales de l'hiver. Selon Rebetez & Serquet (2013), l'isotherme du 0°C était située à 900m d'altitude dans les Alpes vaudoises et pourrait s'élever de 150 à 230m par degré de réchauffement. Par conséquent, les résultats montrent bien une élévation importante de cette limite du 0° en hiver, qui pourra se situer au-delà de 1400m en 2085 selon les scénarios. En effet, la diminution importante des chutes de neige hivernales, pour les classes 900-1000m et 1000-1400m, démontre que la part des précipitations sous forme de neige, par rapport au total des précipitations, deviendra nettement plus faible en hiver en dessous de 1400m. Au-delà de cette limite, les chutes de neiges diminueront graduellement en fonction de l'altitude mais avec une baisse moins marquée. D'ailleurs à partir de 2500m, le ratio des précipitations neigeuses par rapport aux précipitations totales sera assez important pour obtenir une augmentation des chutes de neige à cette altitude, en lien avec la hausse probable des précipitations totale due au changement climatique, qui pourrait aller de 12% à 22% en hiver selon le rapport CH2018 (2018).

Premièrement, on peut comparer ces résultats avec l'étude de Fallot (2017), qui estime les chutes de neige en Suisse pour la fin du XXIème siècle. Bien que les classes d'altitudes ne soient pas les mêmes et que les scénarios utilisés ne correspondent pas aux nouveaux scénarios RCP 4.5 ou 8.5, on constate que les valeurs sont assez similaires notamment pour les altitudes inférieures à 1400m. Toutefois, l'étude de Fallot (2017) montre une diminution des chutes de neige plus importante pour la classe 1400-1800m que ce travail, avec une baisse de 26% à 28% pour la période hivernale. De plus, aucune augmentation des précipitations neigeuses n'est estimée pendant l'hiver pour la classe 2500-2700m.

Ensuite, les données peuvent également être comparées avec le rapport CH2018 (2018) et l'étude de Frei et al. (2018), qui modélisent l'évolution des chutes de neige en Suisse avec les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 pour la même période 2085. Si l'on considère les chutes de neige annuelles de septembre à mai (Figures 17 et 18), la diminution annuelle des chutes de neige paraît plus importante dans l'étude de Frei et al. (2018) et dans le rapport CH2018 (2018) que les résultats obtenus à travers ce travail par des formules empiriques.

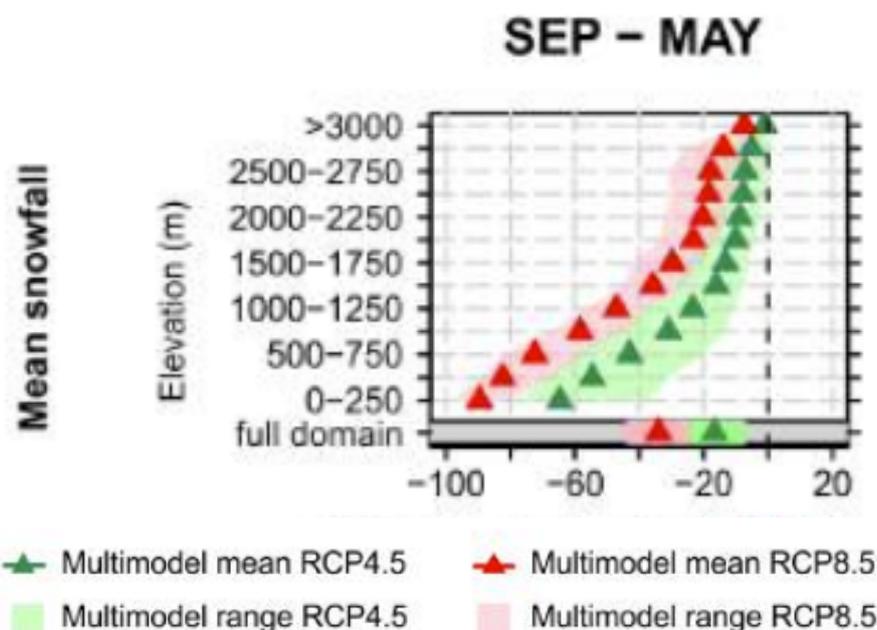


Figure 17 : Evolution des chutes de neiges moyennes annuelles (de septembre à mai) à différentes altitudes pour la Suisse avec les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 pour la période 2085 (CH2018, 2018)

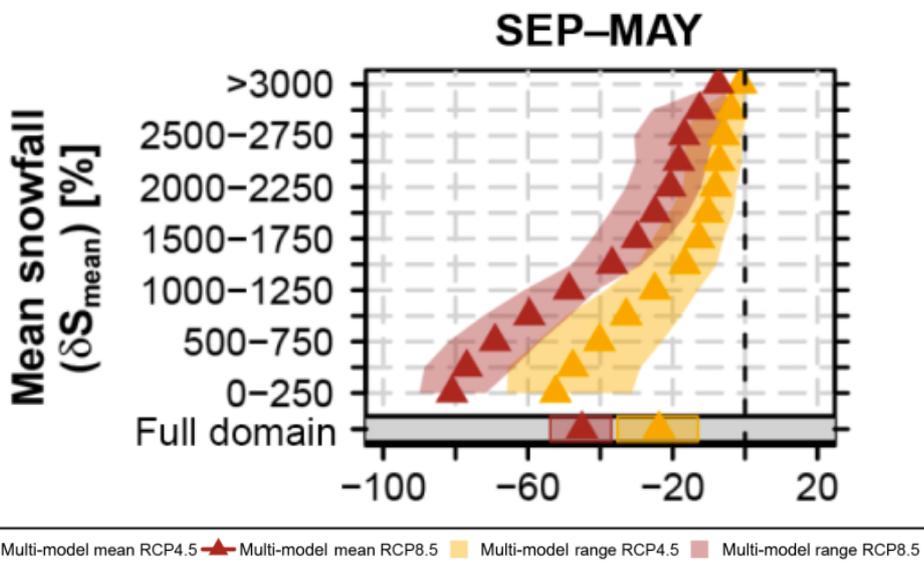


Figure 18 : Evolution des chutes de neiges moyennes annuelles (de septembre à mai) à différentes altitudes pour la Suisse avec les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 pour la période 2085 (Frei et al., 2018)

Selon Frei et al. (2018), la diminution des chutes annuelles globale (Full domain) de septembre à mai d’ici 2085 sera respectivement de -25% pour le scénario RCP 4.5 et de -45% pour le scénario RCP 8.5. Dans le rapport CH2018 (2018), la diminution des chutes annuelles globale (Full domain) de septembre à mai d’ici 2085 sera respectivement de -15% pour le scénario RCP 4.5 et de -30% pour le scénario RCP 8.5. Ces résultats ont été obtenus à l’aide de modèles climatiques régionaux EURO-CORDEX, qui permettent de simuler les chutes de neige à partir de données de températures et de précipitations. Ces valeurs sont difficilement comparables aux données obtenues dans ce travail, car les données annuelles sont présentées par classes d’altitude seulement à partir de 900m et pour les mois de septembre à juin. Par conséquent, la diminution annuelle globale ne peut pas être comparée pour toutes les altitudes, mais il est possible de faire une comparaison des résultats par classe d’altitude.

Ainsi une approximation, de la diminution des chutes de neige annuelles moyennes a été effectuée à partir des valeurs pour différentes classes d'altitude de la Figure 17 (CH2018, 2018) et de la Figure 18 (Frei et al., 2018). Bien que les classes d'altitudes soient différentes, il est intéressant de comparer ces valeurs aux résultats obtenus pour le Nord de Alpes et les Alpes vaudoises pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à l'horizon 2085 (Tableaux 7 et 8).

**Tableau 7 : Approximation de la diminution des chutes de neige moyennes annuelles (septembre à mai) pour différentes classes d'altitude avec les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à l'horizon 2085 d'après les données de la Figure 17 (Frei et al., 2018) et de la Figure 18 (CH2018, 2018)**

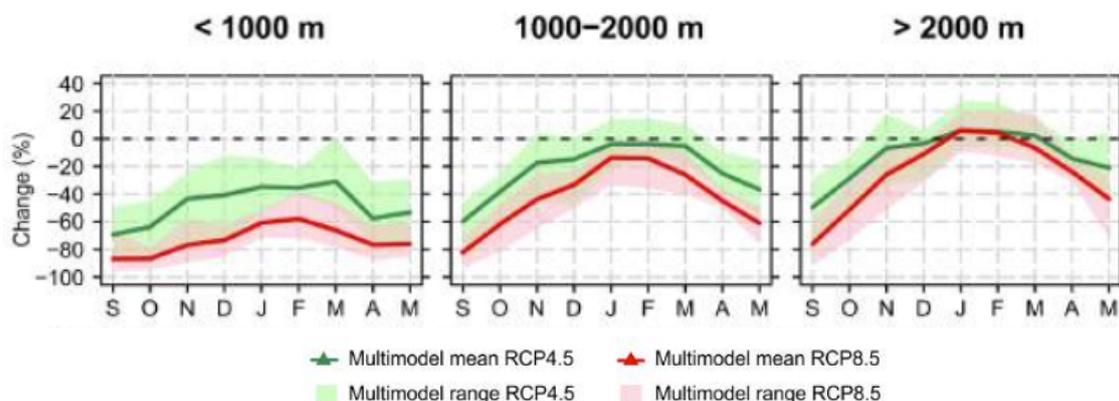
RCP 4.5	1000m	1250m	1750m	2500m	2750m
Frei et al. (2018)	-25.0%	-17.0%	-10.0%	-7.0%	-5.0%
CH2018 (2018)	-23.0%	-17.0%	-12.0%	-9.0%	-6.0%
RCP 8.5	1000m	1250m	1750m	2500m	2750m
Frei et al. (2018)	-50.0%	-36.5%	-23.5%	-17.0%	-13.0%
CH2018 (2018)	-46.0%	-35.0%	-24.0%	-18.0%	-15.0%

**Tableau 8 : Diminution des chutes de neige moyennes annuelles (septembre à juin) pour différentes classes d'altitude avec les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à l'horizon 2085 pour le Nord des Alpes et les Alpes vaudoises**

RCP 4.5	900-1000m	1000-1400m	1400-2000m	2500m	2700m
Nord des Alpes (Min)	-15.3%	-13.7%	-11.6%	-12.1%	-7.2%
Nord des Alpes (Max)	-17.2%	-16.9%	-15.3%		
Alpes vaudoises	-17.0%	-16.4%	-13.6%	-9.0%	-10.2%
RCP 8.5	900-1000m	1000-1400m	1400-2000m	2500m	2700m
Nord des Alpes (Min)	-30.0%	-27.9%	-23.9%	-16.6%	-14.6%
Nord des Alpes (Max)	-30.8%	-29.7%	-27.7%		
Alpes vaudoises	-30.5%	-29.0%	-23.9%	-15.4%	-15.9%

On observe que la baisse des chutes de neige est plus importante (de +6% à +20%) à basse altitude dans le tableau 7. En dessus de 1400m, les données sont assez similaires avec des différences de quelques pourcents, mais on observe une baisse légèrement plus importante à partir de 2700m pour le tableau 8. Les résultats obtenus pour le Nord des Alpes et les Alpes vaudoises à partir des formules empiriques paraissent donc sous-estimer la diminution des chutes de neige à basse altitude par rapport à l'étude de Frei et al. (2018) et le rapport CH2018 (2018). Ceci pourrait s'expliquer par le choix des stations de la classe 900-1000m, qui pourrait minimiser la baisse des précipitations neigeuses à cette altitude.

Ensuite, les résultats peuvent être comparés avec les données mensuelles à différentes classes d'altitude pour chaque étude (Figures 19, 20 et 21).



**Figure 19 : Evolution des chutes de neiges moyennes mensuelles (de septembre à mai) pour différentes classes d'altitude en Suisse avec les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 pour la période 2085 (CH2018, 2018)**

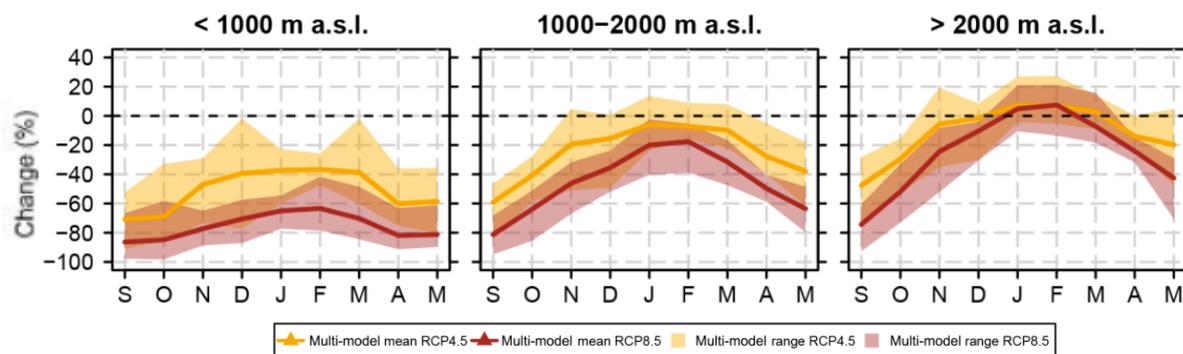


Figure 20 : Evolution des chutes de neiges moyennes mensuelles (de septembre à mai) pour différentes classes d'altitude en Suisse avec les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 pour la période 2085 (Frei et al., 2018)

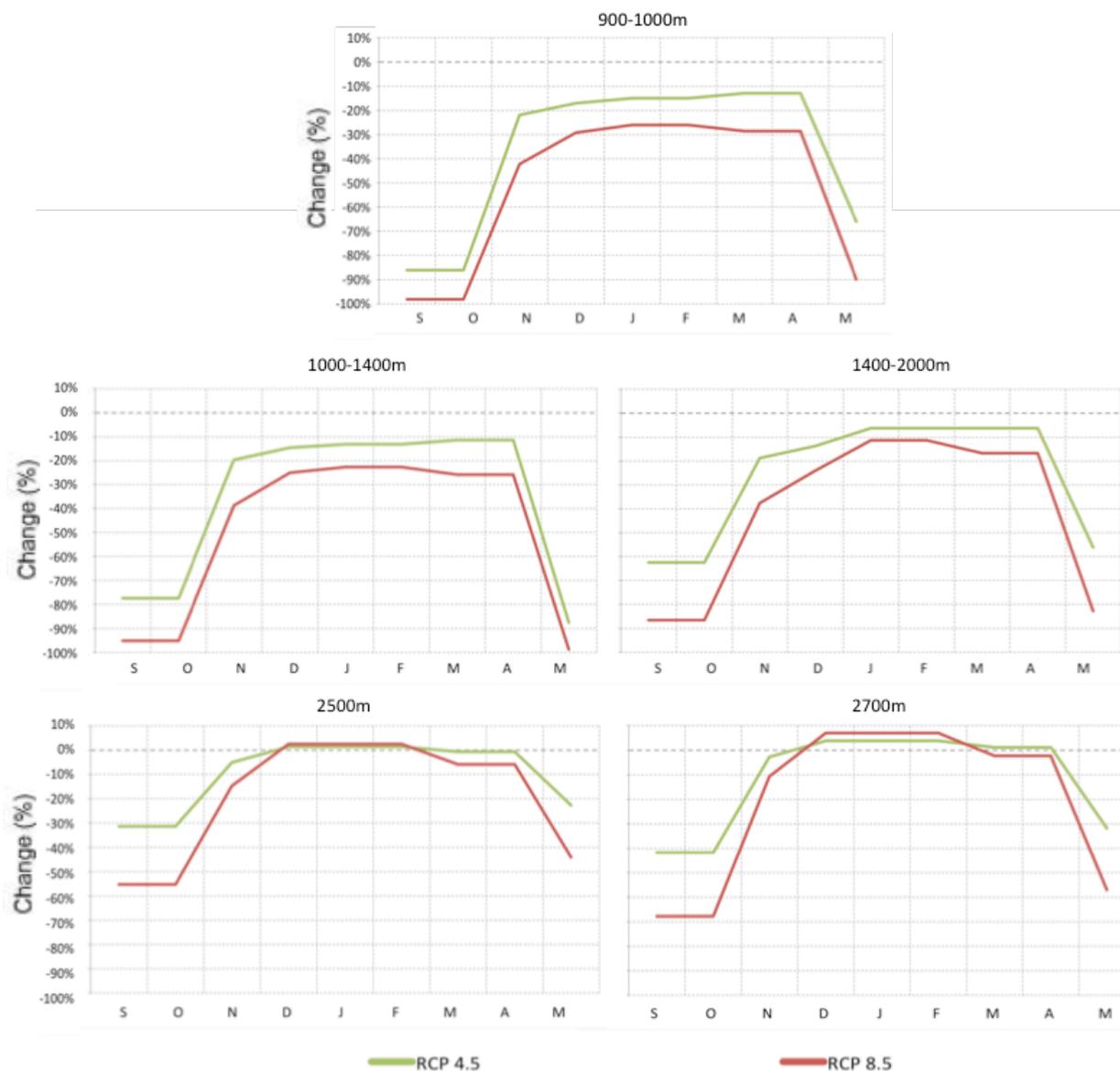


Figure 21 : Evolution des chutes de neige moyennes mensuelles (de septembre à mai) dans les Alpes vaudoises avec les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 pour la période 2085

Les résultats sont présentés du mois de septembre à mai avec la diminution en % des chutes de neige à l'horizon 2085 pour le scénario RCP 4.5 et RCP 8.5. La classe <1000m est difficilement comparable aux Alpes vaudoises car la classe 900-1000m ne prend pas en compte les stations situées en plaine. Par conséquent, il est normal de voir des diminutions beaucoup plus importantes pour cette classe d'altitude entre les Figure 19, 20 et la Figure 21.

Pour la classe 1000-2000m, on constate des différences assez marquées entre les résultats, notamment pour les mois d'octobre-novembre et mars-avril. En effet, les résultats pour les Alpes vaudoises semblent surestimer la diminution des chutes de neige pour le mois d'octobre, alors que cette baisse est sous-estimée pour les mois de novembre, mars et surtout avril. Ces différences peuvent être liées aux choix des périodes pour effectuer les régressions, avec un regroupement des mois entre septembre-octobre, novembre-décembre et janvier-avril. Ainsi, la baisse trop importante du mois d'octobre pourrait être due à l'influence du mois de septembre et la diminution trop faible des mois de novembre et mars-avril à l'influence des mois de décembre et janvier-février.

Finalement pour la classe >2000m, on observe que la tendance est la même entre les différentes études, avec une augmentation des chutes de neige pendant la période hivernale. Toutefois comme pour la classe 1000-2000m, on constate des différences dans les Alpes vaudoises avec une baisse trop marquée pour le mois d'octobre et une diminution trop faible pour le mois d'avril. Ceci doit également être lié aux choix des périodes pour effectuer les régressions.

Pour conclure, en comparant les résultats issus des formules empiriques avec les valeurs des modèles du rapport CH2018 (2018) et de l'étude de Frei et al. (2018), certaines différences apparaissent non seulement pour les données annuelles mais également pour les données mensuelles. Ainsi, il apparaît que la baisse de chutes de neige est sous-estimée pour les basses altitudes et que les valeurs mensuelles en automne et au printemps manquent de précisions. Ceci montre la limite de la méthode des formules empiriques (Fallot, 2017) pour estimer de manière exacte l'évolution des chutes de neige moyennes dans le futur. D'ailleurs, l'étude de Klein et al. (2016) a montré que la diminution de la durée du manteau neigeux, observée de 1970 à 2015 dans les Alpes suisses, résulte non seulement de l'arrivée plus tardive de la neige en automne, mais aussi d'une fonte plus rapide au printemps et probablement aussi de chutes de neige moins importantes, à cause de températures plus élevées à cette saison. Cette tendance devrait se poursuivre dans le futur, mais les formules empiriques ne montrent étonnamment pas une diminution plus importante des chutes de neige en mars et en avril que durant les mois d'hiver à toutes les altitudes. Par conséquent, les formules empiriques déterminées à partir des chutes de neige actuelles (1981-2011) ne sont peut-être pas adaptées pour estimer les chutes de neige dans le futur pour les mois de mars et surtout d'avril. En effet, en se réchauffant d'ici à l'an 2100, les conditions du mois d'avril se rapprocheront de plus en plus à celles du mois de mai.

## Partie II : Ressource « Neige » et stratégies d'adaptations

Dans cette seconde partie, les stations de Villars et des Diablerets ont été choisies pour décrire les stratégies d'adaptations liées à la ressource « Neige », face à la baisse des précipitations neigeuses estimées pour les Alpes vaudoises à l'horizon 2085 (cf. Partie I). En effet, ces stations sont particulièrement sensibles à la diminution des chutes de neige à venir, car elles sont situées en dessous de 2000m. Tout d'abord, différentes notions théoriques sur les ressources territoriales, les vulnérabilités territoriales et la situation de la neige dans les Alpes seront présentées dans l'état de l'art. Ensuite, différents éléments du contexte de la ressource « Neige » et des vulnérabilités seront présentés pour les Alpes vaudoises, en lien avec le changement climatique. Finalement, une revue de littérature des stratégies d'adaptations permettra de faire une analyse de mesures appliquées à Villars et aux Diablerets, dans le cadre de la stratégie « Alpes vaudoises 2020 ».

### 1. Etat de l'art

#### 1.1 *La notion de ressource et dynamique territoriale*

Tout d'abord, on peut distinguer deux types de ressources, à savoir les ressources données et les ressources construites (Kébir et Crevoisier, 2004). Les ressources données correspondent à une vision néoclassique dans laquelle la ressource est vue comme « exogène au système de production » (Kébir et Crevoisier, 2004). Dans cette vision la ressource est réifiée, elle existe en tant que telle, de manière indépendante au territoire (Kébir et Crevoisier, 2004). Les ressources construites résultent d'un processus en lien avec le territoire, elles ne sont pas données une fois pour toutes mais sont relatives et évolutives (Kébir et Crevoisier, 2004). Cette approche s'apparente à la vision constructiviste, qui définit la ressource comme construite et liée aux dynamiques territoriales.

Pour la suite de ce travail, différentes définitions de la ressource selon l'approche constructiviste vont être utilisées, pour comprendre le lien entre la ressource et le territoire. Tout d'abord selon Raffestin (1980), une ressource est le résultat de relations et d'interactions entre différents acteurs, une pratique et une matière. Ensuite selon Colletis et Pecqueur (1994), une ressource peut être générique (elle peut être retrouvée partout) ou spécifique (elle est propre à un territoire). Les ressources génériques sont facilement transférables, alors que les ressources spécifiques ne le sont pas. Finalement, selon Kébir et Crevoisier (2004), la notion de ressource s'appuie sur un processus relationnel entre un objet et un système de production.

Dans ce processus relationnel, la ressource possède quatre étapes distinctes, à savoir la création, la destruction qui sont en lien avec l'objet et l'identification, l'actualisation liés au système de production (Kébir et Crevoisier, 2004). A travers ces étapes, Kébir et Crevoisier (2004) montrent l'apparition de phénomène de couplage ou de découplage entre l'objet et le système de production. Le couplage permet un développement de système de production et la reproduction de l'objet, tandis que le découplage montre une crise du système de production en lien ou pas avec l'objet (Kébir et Crevoisier, 2004).

Ensuite, selon Corrado (2004), une ressource devient territoriale à travers un projet de développement territorial, qui permet la découverte et le développement d'une valeur latente du territoire. De plus, pour Courlet (2013), la ressource territoriale est une construction sociale localisée et par conséquent une ressource générique, facilement délocalisable, n'est pas une ressource territoriale.

Ainsi, selon Gumuchian et Pecqueur (2007), une ressource peut être considérée comme territoriale si elle possède les caractéristiques suivantes :

- Elle est localisée. (Localisation)
- Elle est construite par la société, de façon matérielle et/ou immatérielle, selon le cas spécifique. (Constructivité)
- Elle est incluse dans un système plus large dans lequel elle joue un rôle pour le fonctionnement économique du territoire. (Complexité systémique)
- Elle est temporalisée, elle n'était pas ressource hier, peut l'être aujourd'hui, puis à nouveau plus demain. Cette durabilité est également liée à sa nature, elle peut être matérielle ou idéale (Temporalité/sens)

Dans cette approche constructiviste, il y a donc une relation très étroite entre les ressources et le territoire, dont résulte un espace-temps particulier (Kébir et Crevoisier, 2004). Tout d'abord, c'est le territoire en tant que matrice qui définit la ressource. Ensuite, la ressource en se développant produit sur le territoire une empreinte, qui peut aussi devenir la matrice de nouveaux développements (Kébir et Crevoisier, 2004).

Ainsi, l'interaction entre le territoire et ses ressources est un facteur important de développement comme l'explique Lamara (2009) :

« Les ressources tiennent une place fondamentale dans le processus de construction de territoire. Leur révélation, valorisation et spécification par les coordinations des acteurs conditionnent l'émergence des territoires. » (Lamara, 2009, p.14)

Pour comprendre la dynamique des ressources dans le temps et dans l'espace, il faut considérer à la fois le « territoire matrice » et le « territoire empreinte » (Kébir et Crevoisier, 2004). Dans ce contexte, une approche institutionnelle et territoriale des ressources permet de définir une typologie de la dynamique d'une ressource (Kébir et Crevoisier, 2004 ; Kébir, 2006). Cette approche définit la dynamique de la ressource comme une interrelation entre l'objet et le système de production dont découlent des processus de croissance renouvelable, de mise en valeur, d'érosion/épuiement ou de pénurie de la ressource (Tableau 9).

Tableau 9 : Typologie de la dynamique des ressources (Kébir et Crevoisier, 2004)

Effet (sortie) \ Moteur (entrée)	DÉVELOPPEMENT DE LA RESSOURCE	RÉGRESSION DE LA RESSOURCE
LA DYNAMIQUE DU SYSTÈME DE PRODUCTION (SP) ENTRAÎNE ...	<i>Cas I</i> ...positivement l'objet <b>CROISSANCE RENOUVELABLE</b>	<i>Cas II</i> ...négativement l'objet <b>ÉROSION/ÉPUIEMENT</b>
LA DYNAMIQUE DE L'OBJET ENTRAÎNE...	<i>Cas III</i> ...positivement le SP: <b>MISE EN VALEUR</b>	<i>Cas IV</i> ...négativement le SP: <b>PÉNURIE</b>



## 1.2 La notion de vulnérabilité territoriale

Le concept de vulnérabilité est utilisé dans de nombreux domaines en science, notamment la géographie des risques, et cette notion est souvent liée au concept de risque mais aussi de résilience et d'adaptation. En effet, le risque est la conséquence de la rencontre entre un aléa et la vulnérabilité, alors que la résilience et l'adaptation sont des mesures pour réduire la vulnérabilité ou l'aléa et ainsi diminuer le risque (Cardonna et al., 2007).

Ici, la vulnérabilité va être traitée du point de vue du territoire selon Peyrache-Gadeau (2007), en lien avec la théorie du système touristique localisé lié au concept de milieu innovateur. Dans ce contexte, la vulnérabilité « territoriale » se distingue de la vulnérabilité « opérationnelle » et « normative », liées aux facteurs externes pour la première et aux systèmes de régulations propres aux régions de montagnes pour la seconde, par le fait qu'elle est en lien avec le milieu socio-économique local et la dynamique des acteurs du territoire considéré. Bien que l'évolution de la ressource « Neige » soit liée à des facteurs externes, le développement des activités socio-économiques qui en découlent dépend notamment de la dynamique des acteurs du territoire. En effet, la viabilité économique dans le contexte des stations alpines est souvent déterminée par une courte période d'activité de décembre à mars, qui provient d'une spécialisation sur le tourisme d'hiver et d'une faible diversification des activités non-touristique (Peyrache-Gadeau et al., 2017).

Cependant, il existe différents types de configuration d'économie touristique dans les stations alpines (Tableau 10). En effet selon Peyrache-Gadeau (2007), il est possible de distinguer les « stations-territoire d'économie touristique » (STET) et les « stations sites de production touristique » (SSPT). La première configuration concerne les stations-villages « pionnières » qui ont été développées par les communautés locales et la seconde fait référence au type « stations ex-nihilo », dont le développement est fait par des promoteurs sur des critères purement géophysiques et sans lien avec la société locale.

Tableau 10 : Configuration d'économie touristique dans les stations alpine (Peyrache-Gadeau, 2007)

### Deux types de milieux innovateurs à l'origine des stations de ski alpines

Type de milieu innovateur	Station-territoire d'économie touristique	Station-site de production touristique
Type d'acteurs à l'origine du projet	Entrepreneurs locaux (privés, élus...) ou acteurs nouvellement installés	Services liés à l'État central, acteurs entrepreneurs d'origine extérieure
Formulation du projet	Développement local	Développement touristique
Nature de l'innovation	Création – extension d'activités liées à l'accueil et aux pratiques touristiques Expérimentation et diffusion des innovations technologiques liées notamment aux équipements de remontées mécaniques et aux techniques de glisse (nouveaux métiers, nouveaux matériels...).	Organisationnelle, institutionnelle, architecturale
Relation avec la région d'implantation	En continuité avec l'organisation socioéconomique préexistante	En rupture avec l'organisation locale

Cette différence de développement des stations alpines montre la diversité de positionnement, que peut avoir une station avec le territoire et donc les différents types de vulnérabilité face aux aléas, notamment liés au changement climatique.

Voici les différents types de vulnérabilité territoriale, qui peuvent surgir dans le contexte d'économies touristiques pour les stations alpines selon Peyrache-Gadeau (2007) :

- **Les vulnérabilités liées à la dépendance de l'activité touristique :** La dépendance locale à l'économie touristique, notamment liée à la ressource « Neige », ne permet pas de s'adapter à l'aléa climatique avec une baisse importante des chutes de neiges.
- **Les vulnérabilités liées au manque de gouvernance du territoire touristique :** Ce type de vulnérabilité est influencé par la capacité d'organisation et de coopération des acteurs au sein du territoire touristique, qui permet de proposer des mesures d'adaptations face aux aléas liés au réchauffement climatique.
- **Les vulnérabilités sociales, culturelles et environnementales propres au territoire vécu :** En plus de la diversité de l'économie locale et des types de gouvernance, il est nécessaire d'appréhender les formes d'impacts sociaux, culturels et environnementaux de l'activité touristique dans les territoires via notamment la notion d'ancrage territorial.

Dans ce contexte, la durabilité de l'économie touristique dans les stations alpines est remise en question, non seulement du point de vue de la gestion des ressources (eau, énergie) et des problèmes de transport et d'impact environnementaux, sociaux et culturels, mais aussi par rapport aux conséquences du réchauffement climatique (Peyrache-Gadeau et al., 2017). En effet, la hausse des températures entraîne une diminution de la couverture de neige, ce qui augmente la vulnérabilité des stations alpines, notamment à basse altitude. Par conséquent, la capacité d'innovation en lien avec la collaboration des différents acteurs, via « un processus d'innovation sous contrainte » est essentielle pour assurer la viabilité de ces stations face à cet aléa climatique (Peyrache-Gadeau et al., 2017).

### **1.3 Le changement climatique et la neige dans les Alpes**

La neige est une ressource importante dans les régions alpines que ce soit pour la gestion de l'eau, l'hydroélectricité mais aussi le tourisme (Abegg et al., 2007). La neige peut être considérée comme une ressource territoriale très importante pour le tourisme d'hiver dans les Alpes, mais son évolution dans un contexte de changement climatique est inquiétante. En effet, la quantité d'enneigement est un facteur de réussite majeure pour les stations de ski et les remontées mécaniques, par conséquent le manque de neige à venir pourra poser problème pour le tourisme d'hiver (Serquet, 2011).

Avec l'augmentation des températures et la diminution de l'enneigement depuis les années 1980, les stations de basses altitudes ne peuvent plus garantir un enneigement suffisant et cela risque de se péjorer dans les années à venir (Serquet, 2011). La viabilité d'un domaine skiable peut se calculer en modélisant sa sécurité d'enneigement et sa ligne de fiabilité en altitude (Serquet, 2011). Les études ont montré que le minimum pour qu'un domaine soit viable, est une sécurité d'enneigement de 100 jours avec au moins 30 cm de neige et une ligne de fiabilité située à 1200 m d'altitude pour le Nord des Alpes (Abegg et al., 2007). Cette limite d'altitude pourrait augmenter jusqu'à 1350 m avec un réchauffement de 1°C et à 1500m pour 2°C (Abegg et al., 2007).

Cette ligne de fiabilité est donc fortement liée à la température et donc les régions situées plus haut en altitude peuvent garantir une meilleure sécurité d'enneigement. Par

conséquent, les résultats obtenus dans la partie I risquent de poser des problèmes de sécurité d'enneigement pour les stations des Alpes vaudoises, car la diminution des chutes pourra s'élever jusqu'à -23.9% à 2000m à l'horizon 2085 pour le pire scénario.

Dans son étude, Gonseth (2013) a étudié 164 stations de ski en Suisse et a montré qu'avec le climat actuel, 159 des 164 stations peuvent garantir un enneigement naturel optimal. Cependant, si la température augmente de +1°C, seules 142 stations seraient sûres concernant l'enneigement, avec une augmentation de +2°C, plus que 129 stations pourraient garantir de la neige et avec +4°C, plus que 76 stations auraient encore un enneigement fiable (Gonseth, 2013). Dans leur étude, Abegg et al. (2007) présentent un résultat similaire pour les différentes régions de Suisse (Figure 22).

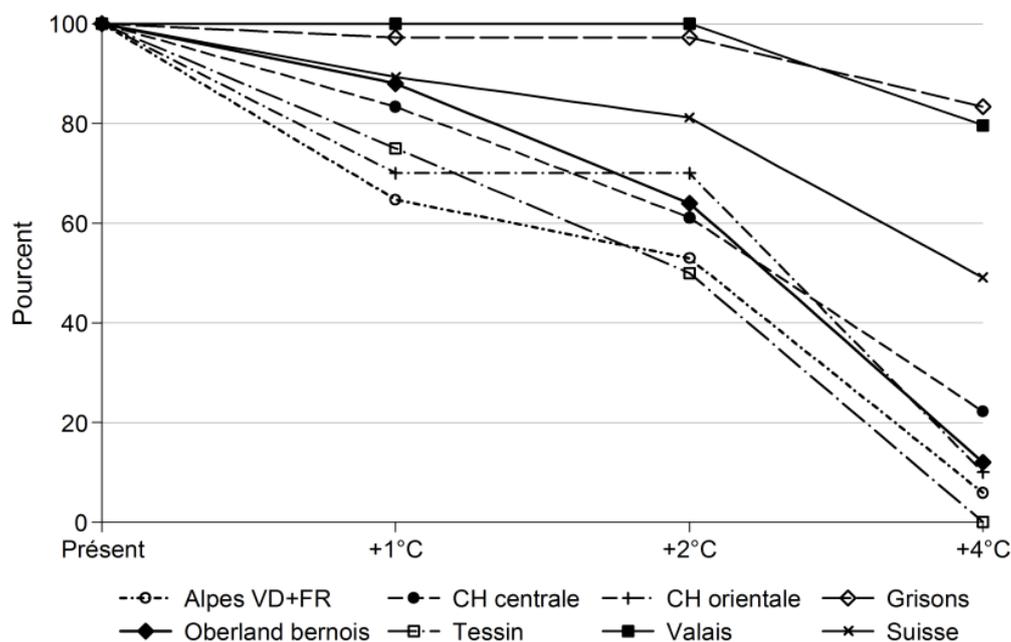


Figure 22 : Pourcentage des stations garantissant la neige en fonction des températures (Abegg et al., 2007)

Cette évolution en fonction des augmentations de température montre que la fiabilité d'enneigement dépend principalement de l'altitude et de la situation des différentes stations. C'est pourquoi les stations situées en Valais ou aux Grisons sont moins sensibles que les stations des Alpes vaudoises ou fribourgeoises généralement plus basses en altitude (Abegg et al., 2007).

Finalement comme aujourd'hui, l'attractivité de nombreuses stations de montagnes est principalement liée aux remontées mécaniques, cette baisse de la fiabilité d'enneigement des stations pourrait fortement impacter le tourisme (Serquet, 2011). Ceci d'autant plus que la période de Noël est très marquée par la baisse des chutes de neige et qu'elle génère 30% des bénéfices de l'hiver en seulement 2 semaines (Steiger, 2010).

## 2. Questions de recherche et objectifs

Dans cette partie, les questions de recherche ont été basées sur les données et les concepts de la littérature évoqués dans l'état de l'art.

Sur la base théorique de la notion de ressource territoriale, comment peut-être caractérisée la ressource « Neige » dans les stations de Villars et des Diablerets ? Dans ces conditions de changement climatique, quelles sont les vulnérabilités territoriales de la région des Alpes vaudoises ? Quelles sont les stratégies et les mesures d'adaptations envisageables en cas de pénurie de la ressource « Neige » pour Villars et Les Diablerets?

A partir de ces questions de recherche, trois hypothèses vont être testées :

**H1** : La baisse des chutes de neiges, en lien avec le réchauffement climatique, va fortement diminuer la fiabilité d'enneigement pour les stations de basse altitude.

**H2** : Les stations de Villars et des Diablerets étant situées en dessous de 2000m, la ressource « Neige » sera fortement impactée par la baisse des chutes de neige en 2085 (cf. Partie I).

**H3** : La dynamique de la ressource « Neige » se dirige vers une pénurie dans les Alpes vaudoises, ce qui nécessite de développer des stratégies d'adaptation innovantes pour diminuer la vulnérabilité territoriale de cette région.

Ces questions de recherches et hypothèses ont permis de définir les objectifs suivants :

- Description de la ressource « Neige » et des éléments de vulnérabilité dans le contexte des Alpes vaudoises
- Présentation des stratégies d'adaptation liées à la pénurie de la ressource « Neige » sur la base de la littérature
- Analyse des mesures d'adaptations mises en place dans les stations de Villars et des Diablerets

### 3. Méthode

Pour cette seconde partie, l'analyse devait d'abord se baser essentiellement sur des entretiens semi-directifs, effectués auprès des différents acteurs des stations de Villars et des Diablerets. Cette méthode qualitative aurait permis de comprendre la situation de ces stations par rapport à la ressource « Neige », d'analyser la dynamique de la ressource selon Kébir et Crevoisier (2004) et de décrire les vulnérabilités territoriales selon Peyrache-Gadeau (2007).

Malheureusement, la situation sanitaire en lien avec la pandémie du Coronavirus (Covid-19) n'a permis de mener à bien qu'un seul entretien (Annexe 5), parmi la dizaine initialement prévue. Par conséquent, l'analyse de la ressource « Neige » n'a pas pu être effectuée et seuls certains éléments de contexte sur les caractéristiques de la ressource, la dynamique territoriale et les vulnérabilités territoriales seront présentés sur la base de la littérature. Toutefois, une analyse des stratégies d'adaptations concernant la ressource « Neige » a été effectuée pour compléter ce travail. D'abord, les différents concepts d'adaptation sont présentés sur la base d'articles scientifiques. Ensuite, une étude de cas sur les stations de Villars et des Diablerets permet de rendre compte de la mise en place de la stratégie « Alpes vaudoises 2020 », sur la base de différents rapports et de la presse quotidienne régionale.

## 4. Situation et contexte de l'étude

Pour la suite du travail, Villars et Les Diablerets ont été choisis pour illustrer ce travail, car ce sont les stations touristiques les plus importantes des Alpes vaudoises. Par conséquent, leur évolution dans le contexte du changement est cruciale pour l'avenir de la région.

### 4.1 Description des stations de Villars et des Diablerets

Villars et Les Diablerets sont des stations touristiques de moyenne montagne, situées dans les Alpes vaudoises et plus précisément dans le Chablais vaudois. Cette situation, proche de l'arc lémanique et de son bassin de population, a permis un fort développement du tourisme dans ces stations, notamment pour les activités liées au ski.

Le développement touristique a commencé au début du XX<sup>ème</sup> siècle avec tout d'abord un tourisme estival, en lien avec l'essor de l'alpinisme dans les Alpes apporté par les pionniers anglais (Boyer, 2004). Ensuite, l'arrivée du chemin de fer avec la ligne Bex-Villars et Aigle-Le Sépey-Les Diablerets a permis l'essor des activités touristiques d'hiver, avec une meilleure accessibilité pendant la période hivernale (Boyer, 2004). Ainsi ces stations familiales, dont l'agriculture de montagne était la principale activité avant l'arrivée du tourisme (Boyer, 2004), se sont peu à peu développées jusqu'à devenir aujourd'hui le plus grand domaine skiable des Alpes vaudoises. En effet depuis 2015, les stations des Diablerets et de Villars ont décidé de fusionner et de créer un seul domaine skiable, afin de faciliter la gestion, d'assurer la rentabilité des remontées mécaniques et d'offrir un domaine plus important (Figure 23).

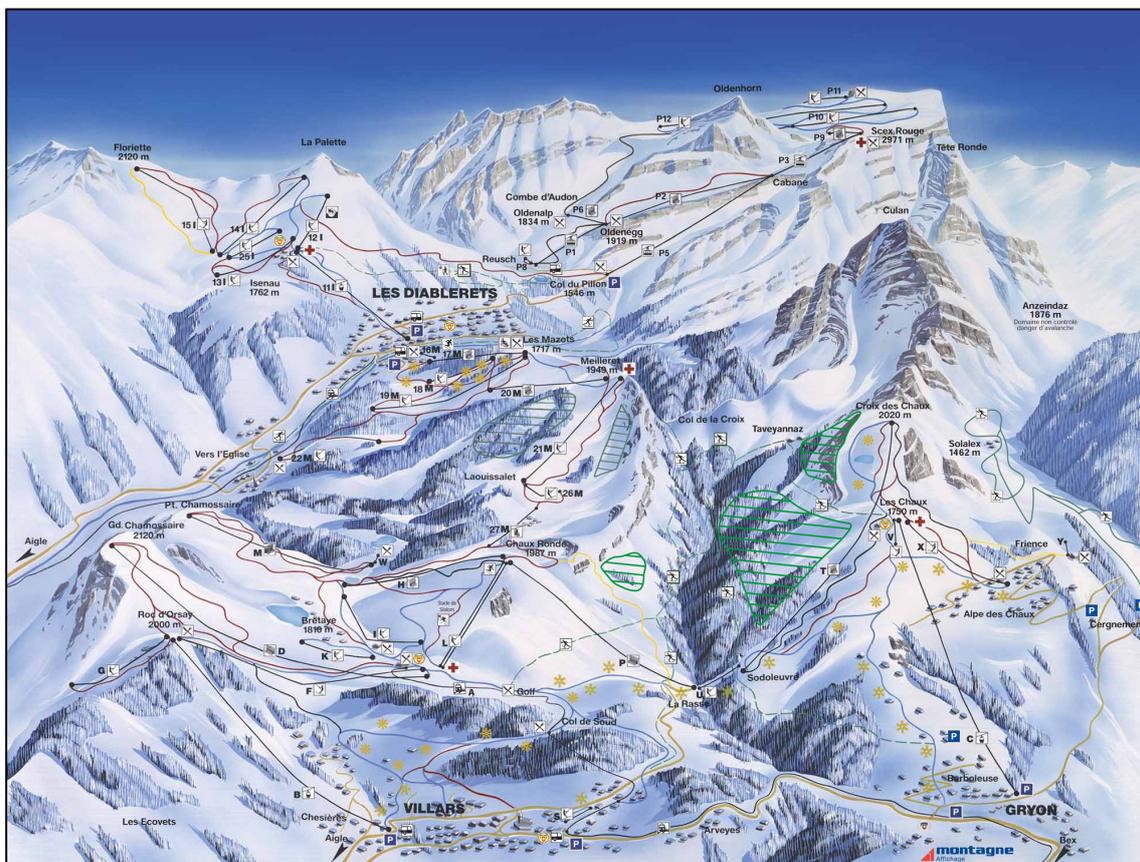


Figure 23 : Domaine skiable de la société de « Tél Villars-Gryon-Diablerets » créée en 2015 (Source : <https://fr.skiinfo.ch>)

Ce domaine skiable est situé entre 1200m à 2100m d'altitude et s'étend sur plus de 100km de pistes avec 34 installations de remontées mécaniques, qui assurent la liaison entre les différentes parties du domaine, à savoir les Meillerets, Villars et Gryon.

Pour la suite, les caractéristiques générales de Villars et des Diablerets sont présentées, avec une description de différents éléments génériques puis spécifiques des stations.

La station de Villars est située à 1253m d'altitude sur la commune d'Ollon, qui compte 6'300 habitants (ADPE et ARDA, 2004). La station en elle-même représente environ 1'500 habitants à l'année, mais le nombre de résidents est beaucoup plus important pendant les vacances d'hiver et peut augmenter jusqu'à 20'000 pendant la période de Noël (Jaccard et al., 2016). Le tourisme est la principale activité de la station, dont l'importance économique est 4 fois plus importante en hiver que pendant la période estivale (Jaccard et al., 2016). Cette importance du tourisme se constate dans l'évolution des secteurs d'activité de la population active. De 1990 à 2000, le secteur tertiaire a augmenté de plus de 40%, alors que le secteur secondaire a baissé de 33% et le secteur primaire est resté assez stable (ADPE et ARDA, 2004). En ce qui concerne le logement, la station compte environ 2880 résidences secondaires et 8000 chalets/appartements, mais aussi 27 hôtels dont de nombreux hôtels haut de gamme avec une capacité de 1800 lits (ADPE et ARDA, 2004). De plus, la présence d'un camping et d'une auberge de jeunesse permet d'accueillir 580 personnes supplémentaires (ADPE et ARDA, 2004). La capacité totale d'accueil de Villars, en comptant tous les types de logement, est de 19'000 lits touristiques (Jaccard et al., 2016).

De manière plus spécifique, Villars est également connue pour ses collèges privés prestigieux, dont le développement a commencé au début du XXème siècle. Ainsi, la clientèle de Villars est composée non seulement par les familles suisses mais aussi par des familles fortunées internationales, qui sont propriétaires de nombreux chalets de vacances. Par conséquent, la position touristique de Villars est plutôt tournée vers une clientèle haut de gamme souvent internationale, bien que cela reste une station familiale.

En ce qui concerne Les Diablerets, la station est située à 1162m d'altitude sur la commune d'Ormont-Dessus, qui compte 1300 habitants à l'année (ADPE et ARDA, 2004). En plus du domaine en commun avec Villars, Les Diablerets possédait un autre domaine skiable à Isenau, mais son exploitation a dû être stoppée car les installations étaient trop anciennes. Bien que le tourisme soit un peu moins important que pour la station de Villars, l'évolution de la population active montre une nette augmentation de ce secteur d'activité aux Diablerets. En effet de 1990 à 2000, le secteur tertiaire a augmenté de 25%, alors que le secteur secondaire a baissé de presque 60% et le secteur primaire d'environ 28% (ADPE et ARDA, 2004). Cette évolution montre donc un net recul de l'agriculture et de l'artisan, au profit certainement du tourisme. Avec cette croissance du tourisme, les opportunités de logement ont commencé à se développer, dont la construction de nombreux chalets de vacances. Ainsi, la station compte plus de 1000 résidences secondaires et 2000 chalets/appartements, mais également 13 hôtels d'une capacité de 1000 lits (ADPE et ARDA, 2004). De plus, la présence d'un camping permet d'accueillir 30 personnes en hiver et 70 en été (ADPE et ARDA, 2004).

Un élément spécifique aux Diablerets est la présence du glacier des Diablerets situé à 3000 mètres d'altitude. Cela représente un véritable atout pour la station, avec notamment la proximité domaine Glacier 3000. En effet, ce domaine situé au Col du Pillon permet de skier non seulement en hiver, mais également en automne et durant une partie de l'été. Ainsi, la station peut assurer des conditions d'enneigement optimales en cas de chutes de neige insuffisantes, notamment pendant la période de Noël. D'ailleurs cette offre Glacier 3000 est un argument valable pour toutes les stations des Alpes vaudoises, mais l'accès privilégié des Diablerets de par sa proximité est un atout considérable. Par conséquent, l'orientation de la station est davantage tournée vers un tourisme du ski, avec la présence de nombreuses familles de la région.

### 4.2 Contexte et dynamique de la ressource « Neige » aux Alpes vaudoises

Pour comprendre la situation des Alpes vaudoises par rapport au tourisme d’hiver, le contexte et la dynamique de la ressource « Neige » vont être décrits pour cette région.

Dans un premier temps, la définition de la ressource selon Raffestin (1980), permet de décrire la ressource « Neige » comme le résultat des interactions entre les différents acteurs en lien avec une pratique, ici le ski et une matière, ici la neige. Ensuite selon Colletis et Pecqueur (1994), la ressource « Neige » peut être considérée soit comme spécifique ou comme générique. Comme la neige peut se retrouver à de nombreux endroits dans les Alpes et qu’elle peut même être créée artificiellement avec les canons à neige, la ressource « Neige » peut être considérée comme générique. Finalement, selon Kébir et Crevoisier (2004), la ressource « Neige » s’appuie sur un processus relationnel entre la neige considérée comme l’objet et les acteurs des remontées mécaniques, qui constituent le système de production. Dans ce processus, les phénomènes de destruction et de création de l’objet seraient d’ordre naturel lié aux contraintes physiques de la neige, alors que l’identification et l’actualisation du système de production seraient liées à la construction des infrastructures pour pratiquer le ski et à son développement. Jusqu’à présent, le lien entre l’objet et le système de production peut être considéré comme un couplage, mais la baisse des chutes de neige pourrait induire un découplage avec une destruction de l’objet et donc une crise du système de production.

Bien que la ressource « Neige » soit une ressource générique, celle-ci n’est pas facilement délocalisable. Par conséquent, elle est fortement localisée et peut être donc considérée comme territoriale. En effet, elle correspond aux critères de localisation, constructivité, complexité systémique et temporalité/sens selon Gumuchian et Pecqueur (2007).

Dans un deuxième temps, la dynamique territoriale va être analysée en lien avec la ressource « Neige » selon la typologie développée par Kébir et Crevoisier (2004). Ici, l’objet est donc la neige et le système de production est constitué de l’ensemble d’acteurs liés aux remontées mécaniques.

Les différentes interrelations entre l’objet et le système de production vont caractériser la dynamique territoriale (moteur en entrée) et donc l’évolution de la ressource dans le temps (effet en sortie). La dynamique du territoire, concernant le système de production (SP) et l’objet, vont donc déterminer soit des phénomènes de développement de la ressource ou de régression de la ressource (Tableau 11).

Tableau 11 : Dynamique territoriale de la ressource « Neige » selon Kébir et Crevoisier (2004)

Effet (sortie)	DÉVELOPPEMENT DE LA RESSOURCE	RÉGRESSION DE LA RESSOURCE
Moteur (entrée)		
LA DYNAMIQUE DU SYSTÈME DE PRODUCTION (SP) ENTRAÎNE ...	<i>Cas I</i> ...positivement l’objet <b>CROISSANCE RENOUELABLE</b>	<i>Cas II</i> ...négativement l’objet <b>DÉGRADATION/RÉGRESSION/ÉPUISEMENT</b>
LA DYNAMIQUE DE L’OBJET ENTRAÎNE...	<i>Cas III</i> ...positivement le SP: <b>MISE EN VALEUR</b>	<i>Cas IV</i> ...négativement le SP: <b>PÉNURIE</b>

Dans le cas de la ressource « Neige » pour les stations de Villars et des Diablerets, c'est la dynamique de l'objet qui influence l'évolution de la ressource. En effet, la création de la neige étant d'origine naturelle, l'influence de la dynamique du système de production n'a que peu d'impact sur le devenir de la ressource. C'est pourquoi, on peut constater dans les stations de Villars et des Diablerets tout d'abord un phénomène de mise en valeur (cas III), suivi d'une croissance renouvelable (cas I) et pour finir un phénomène pénurie (cas IV).

Premièrement, le processus de mise en valeur de la ressource « Neige » a permis le développement économique dans ces deux stations, avec la création des remontées mécaniques et l'émergence du tourisme hivernal. Ceci représente donc le cas III (cf. Tableau 11), dans lequel la dynamique de l'objet entraîne positivement celle du système de production avec le développement de la ressource, en lien avec les différentes activités touristiques hivernales. La dynamique naturelle de l'objet, qui a été positive durant la fin du XXème siècle avec des bonnes conditions d'enneigement, a donc contribué de manière importante au développement de la ressource pour les stations de Villars et des Diablerets. Pendant cette période, les bonnes conditions de neige ont donc pu profiter au système de production. Ceci a permis un essor économique important pour la région, avec une croissance des différentes activités liées au tourisme hivernal comme les remontées mécaniques, les commerces, les hôtels ou encore les agences immobilières.

Ensuite, une phase de croissance continue peut être identifiée (cas I, Tableau 11). En effet, le développement des remontées mécaniques et des infrastructures de manière générale a permis un meilleur accès à la neige dans les Alpes vaudoises. De plus, la mise en place de canons à neige a permis de créer artificiellement la ressource sur le domaine skiable. Ainsi, dans cette phase, c'est le système de production qui a conduit au développement de la ressource « Neige ».

Finalement, depuis le début du XXIème siècle, la dynamique de l'objet « Neige » a changé, à cause de l'évolution des conditions météorologiques en lien avec le réchauffement climatique. En effet, la hausse des températures a conduit à diminuer les chutes de neige pendant l'hiver et donc à engendrer une régression de la ressource. Comme les stations de Villars et des Diablerets sont situées en dessous de 2000m, les conditions d'enneigement se sont fortement péjorées ces dernières décennies et devrait encore se dégrader dans les années à venir (cf. Partie I). Par conséquent, on peut aujourd'hui observer des phénomènes de pénurie de la ressource « Neige » dans ces stations (cas IV, Tableau 11), qui entraînent négativement le système de production. Bien que la tendance de régression de la ressource soit de plus en plus importante, la pénurie n'est pas encore permanente et les activités liées au tourisme hivernal restent une part importante de l'activité économique de la région.

#### **4.3 *Éléments de vulnérabilité territoriale pour Villars et Les Diablerets***

Après avoir décrit le contexte et la dynamique de la ressource « Neige » dans les Alpes vaudoises, certains éléments de vulnérabilité territoriale vont permettre de faire ressortir les enjeux d'une pénurie de la ressource. Dans un premier temps, il est possible de considérer la vulnérabilité du point de vue de la géographie des risques selon Cardonna et al. (2007). Dans ce contexte, on peut définir la situation concernant la ressource « Neige » dans les Alpes vaudoises, comme un risque de crise économique au niveau territorial, avec une spécialisation du secteur touristique en hiver. Ainsi, les différents éléments du risque, en lien avec la pénurie de la ressource « Neige », peuvent être définis de la manière suivante. Tout d'abord, on peut considérer que l'aléa est représenté par le changement climatique, avec la baisse des chutes de neige à basse altitude. Ensuite, la vulnérabilité est liée à la dépendance

du système de production à la ressource « Neige » et donc la fragilité du système en cas de pénurie. Finalement, comme il est difficile de contrôler l'aléa du réchauffement des températures, la résilience peut être considérée comme la capacité d'innovation du système de production et donc la faculté du secteur du tourisme d'hiver de s'adapter. Cette capacité d'innovation peut donc permettre de trouver des solutions par rapport à la vulnérabilité du système de production face à une pénurie de la ressource « Neige », en proposant des mesures d'adaptations pour diminuer le risque.

Ensuite, la vulnérabilité peut être analysée du point de vue du territoire selon Peyrache-Gadeau (2007), en lien avec la ressource « Neige » pour les stations de Villars et des Diablerets. Premièrement, ces deux stations peuvent être considérées comme des «stations-territoire d'économie touristique» (STET), car elles ont été développées par les communautés locales en continuité avec l'organisations socio-économique préexistante. En effet, ce type de configuration d'économie touristique (STET) peut être considérée comme « territoriale », étant donné qu'elle est liée au milieu socio-économique local et à la dynamique des acteurs du territoire.

Sans les entretiens semi-directifs, les vulnérabilités liées au manque de gouvernance et à la dimension sociales, culturelles et environnementales n'ont pas pu être décrites. Dans ce contexte, seul un type de vulnérabilité territoriale selon Peyrache-Gadeau (2007) est présenté pour les stations de Villars et des Diablerets, à savoir les vulnérabilités liées à la dépendance de l'activité touristique. Ce type de vulnérabilités est étroitement lié à la ressource « Neige », car l'activité économique de la région est très dépendante du tourisme du ski pendant la période hivernale. En effet, 3'550 personnes sont employées dans le secteur du tourisme, soit 29,4 % de la population active des Alpes vaudoises (Dupuis, 2015). Ceci représente un chiffre d'affaire brut de 700 millions de francs pour la région (Dupuis, 2015). De plus, le risque de pénurie de la ressource « Neige » est élevé pour les stations de Villars et des Diablerets, étant donné que les remontées mécaniques sont situées entre 1200 et 2100m pour ces 2 stations.

Par conséquent, la dépendance locale à l'économie touristique hivernale est très importante pour les stations de Villars et des Diablerets, ce qui risque de poser des problèmes à l'avenir. Ainsi, la spécialisation territoriale en lien avec le tourisme d'hiver devient un facteur de fragilité structurelle pour la région et ceci d'autant plus avec l'augmentation des températures et donc le risque de pénurie de la ressource « Neige ». Dans cette configuration, l'aléa climatique est une préoccupation importante pour les Alpes vaudoises, qui induit « un processus d'innovation sous contrainte » selon Peyrache-Gadeau et al. (2017). Cette capacité d'innovation débouche sur différentes stratégies d'adaptation de la ressource « Neige », présentées dans le chapitre résultats.

## 5. Résultats

Dans cette partie, les différents aspects des stratégies d'adaptions de la ressource « Neige » sont présentés en s'appuyant sur une revue de littérature. Sur la base de ces éléments, la stratégies « Alpes vaudoises 2020 » est analysée, afin de présenter les différentes mesures d'adaptation liées à la ressource « Neige » effectuées au sein des stations de Villars et des Diablerets.

### 5.1 Les stratégies d'adaptation des stations de ski

Tout d'abord, il est important de distinguer les stratégies d'adaptation et les stratégies d'atténuation. En effet, l'atténuation se concentre sur les causes du changement climatique, alors que l'adaptation vise à en diminuer les effets, en limitant la vulnérabilité des systèmes concernés (Achin et al., 2016). Comme vu précédemment (cf. section 4.3), l'économie des stations touristiques basées sur les sports d'hiver est particulièrement vulnérable face au changement climatique. Pour répondre à ce défi, la capacité d'innovation du territoire permet de mettre en place des stratégies d'adaptation. Ce processus d'adaptation des stations de ski présente une grande diversité de solutions (Figure 24). Cette figure, selon Elsasser et Bürki (2002), montre une synthèse des différentes options d'adaptation actuellement proposées dans la littérature.

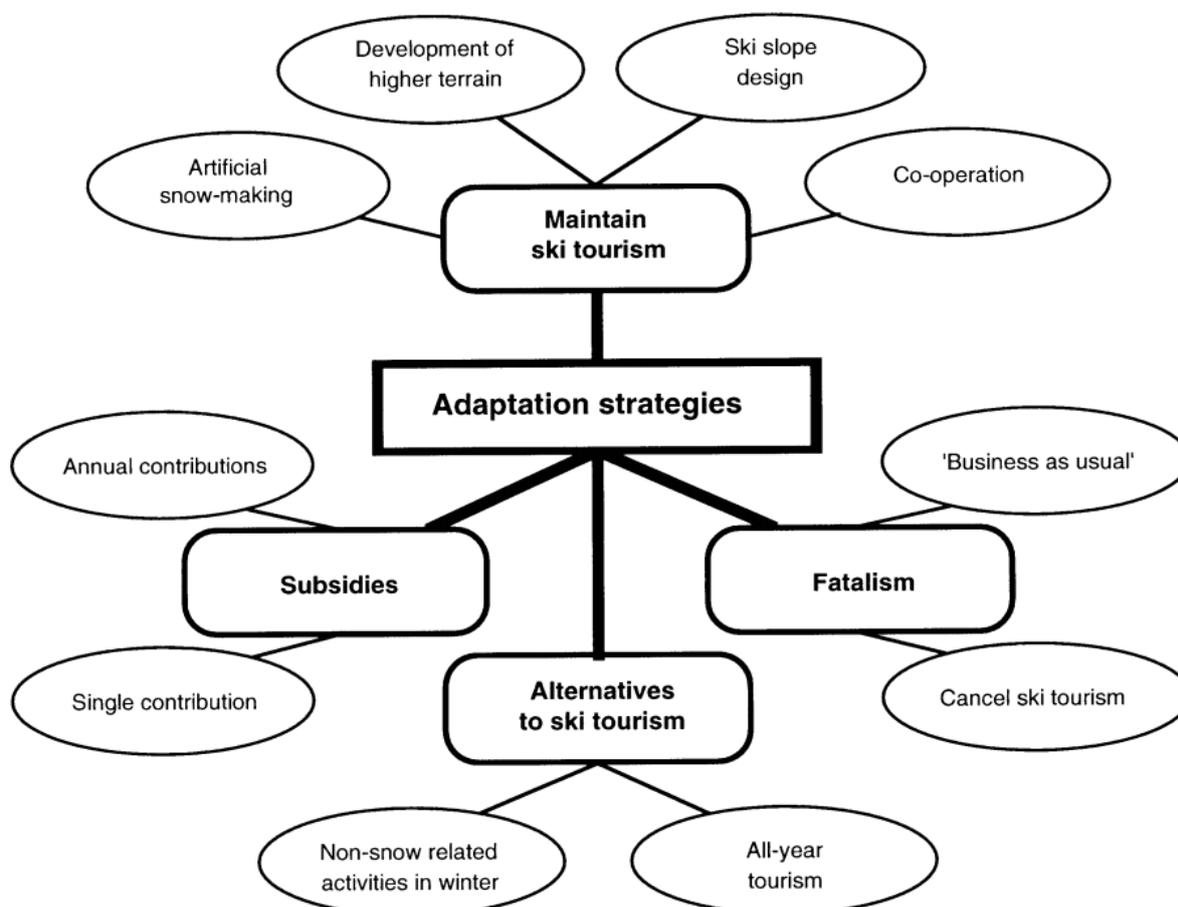


Figure 24 : Stratégie d'adaptation des stations de ski (Elsasser et Bürki, 2002)

Les deux grands types d'adaptations possibles sont premièrement le maintien des activités liées au ski et deuxièmement le développement d'alternatives aux sports de neige.

Pour maintenir le ski, il est essentiel d'améliorer les conditions d'exploitation du domaine skiable, avec la création de neige artificielle, le développement de nouvelles pistes en altitude et l'amélioration des pistes existantes, mais aussi une meilleure coopération des acteurs du ski comme les remontées mécaniques. En ce qui concerne le remplacement du tourisme lié au ski, il nécessite un processus de diversification touristique avec un abandon progressif de la ressource « Neige » et le développement de nouvelles activités, qui peuvent être soutenues par des subventions. En marge, la vision fataliste montre la possibilité d'un arrêt de l'investissement concernant le ski, qui conduit soit à la poursuite normale des activités ou au démantèlement du domaine skiable.

Premièrement pour le maintien du ski, la «règle des cent jours» selon Abegg et al. (2007) est très importante à prendre en compte, car elle montre que la viabilité d'un domaine skiable est assurée seulement s'il possède un enneigement d'au moins 30 cm au sol pendant une période de 100 jours. Cette notion sert de référence pour estimer la fiabilité de l'enneigement pour une station, ce qui est crucial pour maintenir les activités liées au ski.

Dans son étude sur les Alpes suisses, Gonseth (2013) a montré que l'enneigement artificiel était une mesure essentielle pour diminuer la sensibilité des stations de ski au réchauffement des températures. En effet, les techniques de production de neige et le développement du domaine se sont perfectionnées et ont permis d'optimiser la préparation des pistes (Spandre et al., 2016). Ces dispositifs sont aujourd'hui des éléments incontournables à l'exploitation des domaines skiables pour réduire l'aléa climatique et le risque de manque de précipitations neigeuses durant la saison d'hiver. D'ailleurs, de nouveaux outils permettent de simuler l'évolution du manteau neigeux. Le modèle SkiSim, présenté dans l'étude de Steiger (2010), permet de mieux comprendre l'évolution du manteau neigeux par la prise en compte des particularités du terrain du domaine, mais aussi en fonction de la pente et l'orientation des pistes. Ces nouvelles pratiques de gestion de la ressource « Neige », avec une utilisation de plus en plus optimale de la neige artificielle (Steiger, 2010) et une localisation adaptée des équipements au sein de la station (Spandre et al., 2016), permettent de remettre en question la «règle des cent jours» développée par Abegg et al. (2007).

En effet, cette règle ne prend pas en considération la répartition de la neige à l'intérieur du domaine skiable. Pour comprendre cette dimension spatiale de l'enneigement, Steiger (2010) considère différents secteurs d'exploitation de la ressource « Neige », en fonction de l'altitude. Ainsi le haut et le bas du domaine skiable représentent des conditions différentes d'enneigement et il faut donner plus d'importance aux secteurs de hautes altitudes, susceptibles d'être ouverts plus longtemps que les secteurs de basses altitudes (Steiger, 2010). Dans leur étude, François et al. (2016) montrent que la répartition des remontées mécaniques le long d'un gradient altitudinal est déterminante pour améliorer l'exploitation des stations de skis. Ceci permet de rendre accessible les parties hautes du domaine, même si les parties basses ne présentent pas des conditions de neige favorables à la pratique du ski.

Deuxièmement, la diversification est aujourd'hui une obligation pour le développement du tourisme d'hiver pour les régions de moyenne montagne, à cause du changement climatique. L'idée est donc de proposer une alternative à la ressource « Neige », notamment en diversifiant les activités du territoire.

Le premier type de diversification est touristique et peut se faire au sein de la saison hivernale ou de la saison estivale (Bonnemains et Clivaz, 2019). En hiver, de nouvelles activités liées à la nature, au bien-être ou à la culture peuvent permettre de renforcer l'attractivité de la

station. Même si la pratique du ski reste l'enjeu principal de la saison d'hiver, le développement de ces nouvelles activités permet de renforcer l'attractivité de la station pendant la période hivernale (Bonnemains et Clivaz, 2019). La seconde diversification consiste à développer le tourisme estival, via par exemple des offres « multi-activités » dans le domaine du sport ou de la découverte. Dans ce contexte, la valorisation touristique des ressources patrimoniales, qu'elles soient naturelles ou culturelles, sera particulièrement recherchée (George et al., 2019).

Le second type de diversification est économique et permet de redéfinir les modèles de développement territorial, par l'intégration de ressources territoriales préexistants ou nouvelles (Achin et al., 2016). Ces ressources territoriales latentes devront donc connaître un double processus de révélation puis de valorisation, ce qui suppose une mobilisation importante des acteurs du territoire (George et al., 2019).

Ainsi, la diversification dépend de chaque station et peut non seulement concerner le secteur touristique (diversification touristique), avec la valorisation de nouvelles activités que ce soit en été ou en hiver, mais aussi le développement d'autres secteurs économiques (diversification économique) (Achin et al., 2016 ; Bonnemains et Clivaz, 2019).

## 5.2 Stratégie « Alpes vaudoises 2020 » pour Villars et Les Diablerets

Les incertitudes économiques, liées au changement climatique, ont conduit le Conseil d'Etat vaudois à repenser et restructurer globalement le secteur touristique dans les Alpes vaudoises. C'est ainsi qu'en 2003, la Communauté d'intérêt des Alpes Vaudoises (CITAV) a été créée, afin de promouvoir et développer les activités économiques et notamment touristiques pour les Alpes vaudoises. En 2008, un postulat est déposé au Grand Conseil vaudois, demandant de créer un plan d'action pour trouver des solutions aux conséquences du changement climatique sur le développement économique des Alpes Vaudoises. Dans ce contexte, la CITAV a mandaté des études d'experts, qui ont débouché en 2013 sur le rapport «Alpes vaudoises 2020». Ainsi, les propositions de ce rapport permettent de mettre en place une nouvelle stratégie pour le développement touristique des Alpes vaudoises, afin de garantir le maintien du tourisme dans la région malgré le réchauffement climatique. En juillet 2013, ce document a été présenté au Conseil d'Etat, qui a retenu six objectifs prioritaires pour la stratégie «Alpes vaudoises 2020» (CITAV, 2013) :

- Le développement de la coordination entre les différents acteurs du tourisme et l'amélioration de la gouvernance touristique régionale
- La valorisation des attractions touristiques phares dans la région
- Le développement du tourisme 4 saisons
- La pérennisation des remontées mécaniques
- L'amélioration de l'accessibilité des stations via notamment la mobilité douce
- Le développement des différentes possibilités d'hébergement

En adoptant cette stratégie «Alpes vaudoises 2020» et ces différents objectifs, les autorités cantonales espèrent développer des solutions, pour limiter les impacts du réchauffement climatique sur l'économie touristique de la région. Ainsi, les fonds débloqués ont pour but de créer des projets de collaboration entre les offices de tourisme pour mieux promouvoir la

région des Alpes vaudoises, restructurer le secteur des remontées mécaniques avec la fusion ou la fermeture de certains domaines, mais aussi assurer le développement de l'hébergement et des transports publics pour permettre un meilleur accès aux stations (CITAV, 2013).

Pour la suite, les différentes mesures, qui découlent de cette stratégie «Alpes vaudoises 2020», vont être décrites pour Villars et Les Diablerets.

Tout d'abord, les mesures d'adaptations concernent le maintien des activités liées au ski vont être présentées (cf. Figure 24). Cette première stratégie vise à conforter la spécialisation dans les sports de neige, avec des investissements importants permettant des innovations comme la production de neige artificielle ou le développement des domaines skiables. Cet axe d'adaptation correspond notamment au volet de la pérennisation des remontées mécaniques, définies dans les objectifs de la stratégie «Alpes vaudoises 2020».

Dans ce contexte, la fusion du domaine des stations de Villars et des Diablerets a permis d'améliorer la gestion et de développer les infrastructures des remontées mécaniques (Genillard, 20.07.2015). Ainsi, plus de 20 millions de francs ont été investis dans les remontées mécaniques depuis 2015, avec la création d'une nouvelle télécabine de 10 places aux Meillerets et le remplacement du télésiège assurant la liaison avec Villars (Genillard, 17.12.2018). Le fait d'augmenter les canons à neige sur le domaine skiable a permis d'assurer l'enneigement, notamment pour le début de la période hivernale, qui représente une part très importante du chiffre d'affaires en hiver (cf. Annexe 5).

Ainsi aujourd'hui, le domaine de Villars/Les Diablerets accueille en moyenne 5'000 clients par jour pendant la saison hivernale, ce qui permet d'améliorer la rentabilité des installations (Dupuis, 2015). En effet, le domaine a enregistré plus de 550'000 journées skieurs pendant la saison 2018/2019 (Vanat, 2019). En lien avec les remontées mécaniques, un autre aménagement prévu est le prolongement de la ligne de train Aigle-Le Sépey-Les Diablerets jusqu'au départ des installations (Wahli Di Matteo, 31.10.2017). Ce projet correspond à l'objectif d'amélioration de l'accessibilité des stations via la mobilité douce et permet de renforcer l'attractivité du domaine skiable, en facilitant son accès.

En marges de ces mesures, on peut noter l'abandon du domaine d'Isenau aux Diablerets, qui correspond à une adaptation fataliste (cf. Figure 24). En effet, malgré un nouveau concept de développement (Isenau 360°), ce projet a souffert de nombreuses oppositions et n'a pas encore trouvé suffisamment de fonds pour voir le jour (Roulet, 4.08.2018). De plus, un projet de relier directement le glacier des Diablerets au village a été envisagé, mais celui-ci a finalement dû être abandonné pour des raisons de protection de l'environnement (Dupuis, 2015).

Ensuite, les autres mesures d'adaptation qui vont être décrites, sont en lien avec la recherche d'alternative au ski (cf. Figure 24). Cette stratégie concerne donc la diversification des activités touristiques, qui diminue la dépendance à la ressource « Neige » en créant de nouvelles pratiques touristiques comme le wellness ou la valorisation patrimoniale (CITAV, 2013). Ce deuxième axe d'adaptation correspond à la vision de développement du tourisme 4 saisons, proposée dans la stratégie «Alpes vaudoises 2020». Une première mesure concernant la diversification est l'amélioration de la collaboration et de la gestion du secteur touristique (CITAV, 2013). Ainsi, les offices de tourisme de Villars et des Diablerets se sont unifiés, en créant un pôle général de promotion situé à Villars, ce qui diminue les charges mais permet aussi de développer une stratégie touristique commune et globale (cf. Annexe 5). Le premier exemple de cette stratégie est la création d'une nouvelle offre estivale, avec la carte «free access», qui donne un accès gratuit aux transports publics et à 35 activités

différentes dans les stations de Villars et des Diablerets (Jaccard & al., 2016). Un autre résultat de cette nouvelle dynamique est par exemple la construction d'un centre thermal à Villars ou le développement des activités estivales, comme le Festival International du Film Alpin des Diablerets (FIFAD) ou l'aménagement du lac de Frieze (cf. Annexe 5). Dans ce contexte de diversification, un autre projet d'envergure concernait notamment la création d'un centre hôtelier « wellness » dans le village des Diablerets. Toutefois, sa réalisation a été abandonnée à cause de problèmes financiers, après le retrait du principal investisseur (Passello, 24.11.2016). En effet, la difficulté du développement du secteur hôtelier réside principalement dans la capacité à générer de gros investissements, pour répondre aux besoins d'une clientèle de plus en plus exigeante, ce qui demande notamment développer le secteur «wellness» (Dupuis, 2015).

Finalement, l'organisation des Jeux olympiques de la jeunesse (JOJ) en janvier 2020 a permis de faire rayonner les stations de Villars et des Diablerets au niveau international et il sera intéressant d'analyser les retombées touristiques de cette manifestation (Pittet, 4.01.2020).

## 6. Discussion

L'analyse des stratégies d'adaptation montre que la stratégie de maintien du ski est pour l'instant principalement privilégiée pour les stations de Villars et Les Diablerets, bien que certains projets de diversification touristique se soient concrétisés. En effet, des investissements importants (20 millions) ont été faits pour moderniser le domaine skiable, avec le renouvellement de certaines installations et le développement de l'enneigement artificiel. Bien que ces mesures permettent d'augmenter la viabilité des remontées mécaniques en améliorant les conditions d'enneigements (Abegg et al. 2007), cela implique certains aspects négatifs avec notamment des coûts élevés et un impact environnemental non négligeable (Rebetez et Serquet, 2013).

De plus, avec l'augmentation des températures prévues (cf. Partie I), les conditions favorables à la production de la neige artificielle ne seront pas assurées sur le long terme. Selon Rebetez et Serquet (2013), le nombre de jours potentiels de fabrication de l'enneigement artificiel devrait diminuer d'environ 30% en novembre aux altitudes supérieures à 2000 m et de même en décembre pour les altitudes de 1000 à 1500m, avec une augmentation des températures de 2°C en 2050. En début de saison, cette limitation d'utilisation des infrastructures d'enneigement artificiel peut être extrêmement préjudiciables pour les remontées mécaniques, car la période de Noël représente plus de 30% du chiffre d'affaires en hiver (Steiger, 2010). De plus, ces investissements consentis pour moderniser le domaine skiable ne font qu'accentuer la spécialisation du ski et du tourisme d'hiver, ce qui augmente les vulnérabilités liées à la dépendance à la ressource « Neige » (cf. section 4.3 : Eléments de vulnérabilité territoriale pour Villars et Les Diablerets).

Selon Dupuis (2015), cette orientation marquée des mesures d'adaptation pour le maintien du ski est le résultat d'une forte coalition des acteurs du tourisme hivernal avec le soutien des communes, qui sont en faveur du renforcement du tourisme hivernal. Ceci pourrait montrer un problème de gouvernance au sein du territoire, qui limiterait la capacité d'innovation et donc le développement de mesures adaptées. Toutefois, même si cette stratégie permet d'augmenter la compétitivité du domaine skiable de Villars/Les Diablerets seulement à court terme, cela permet d'assurer une viabilité économique tant qu'il y a de la neige dans un processus de transition vers un tourisme 4 saisons (cf. Annexe 5).

Selon George et al. (2019), la fiabilisation de l'exploitation des domaines skiables ne doit pas s'opposer à la diversification des activités touristiques. En effet, selon George et al. (2019), ces deux stratégies doivent être menées de manière conjointe, via des mesures d'adaptations construites de manière collective et partagée, afin de favoriser l'appropriation des différents acteurs concernés. En ce sens, la fusion des offices du tourisme de Villars et des Diablerets paraît être une stratégie de diversification adaptée, qui assure le développement touristique de la région, en améliorant les offres de tourisme 4 saisons. Cependant, les investissements en faveur de la diversification des activités touristiques ne semblent pas encore suffisants pour se soustraire à la ressource « Neige ». Ainsi les vulnérabilités liées à la dépendance du tourisme hivernal sont encore bien présentes pour les stations de Villars et des Diablerets.

## Conclusion générale

Pour la partie I, l'analyse des chutes neige annuelles a permis de mettre en évidence différentes périodes d'évolution au cours du XX<sup>ème</sup> siècle. Depuis les années 1900, les résultats pour le Nord des Alpes ont montré une légère diminution des chutes de neige annuelles entre 1940-1950, suivie d'une augmentation entre 1960-1970, puis une baisse progressive à toutes les altitudes depuis 1980. Ces résultats sont également valables pour les Alpes vaudoises, dont l'évolution depuis 1955 montre également une légère hausse des précipitations neigeuses de 1960 à 1970 et une diminution à partir de 1980, en lien avec le réchauffement des températures. Ces données sont issues d'un petit nombre de stations et par conséquent les résultats montrent seulement une tendance générale pour le Nord des Alpes et les Alpes vaudoises.

Ensuite, les formules empiriques calculées à l'aide des courbes de régressions ont permis d'estimer les chutes de neige futures pour le Nord des Alpes et les Alpes vaudoises. Ces formules valables pour différentes périodes de l'année et classes d'altitudes permettent de simuler de manière assez précise les précipitations neigeuses pour les stations sélectionnées, avec des différences  $\leq 15\%$  par rapport aux valeurs mesurées.

En appliquant ces formules pour différents scénarios d'ici 2085, les résultats obtenus pour le Nord des Alpes montrent une baisse importante des chutes de neige futures, notamment pour les altitudes en dessous de 1400m. La tendance est la même pour les Alpes vaudoises et les valeurs montrent une diminution des chutes de neige pendant la période hivernale particulièrement marquée pour les altitudes comprises entre 900 et 1400m, avec une baisse plus importante pour le scénario RCP 8.5 (-22.8% à -29.3%) par rapport au scénario RCP 4.5 (-11.4% à -17.1%). Ensuite, la baisse est plus faible en dessus de 1400m, avec des valeurs hivernales de -8.2% pour le scénario RCP 4.5 et -14.5% avec le scénario RCP 8.5. En dessus de 2000m, la diminution des chutes de neiges est nettement moins marquée et on observe même une légère augmentation des précipitations neigeuses en hiver à 2500m et à 2700m (2500m : RCP 4.5 +1.5% ; RCP8.5 +2.5% / 2700m : RCP4.5 +3.9% / RCP8.5 +7.1%), en lien avec l'augmentation des précipitations totales à cette période de l'année en 2085 (cf. Annexe 4).

Une première limite de ce travail est le fait que les projections futures des chutes de neige sont issues de formules empiriques, basées sur les mesures d'un nombre limité de stations. En effet, seules 12 stations ont pu être sélectionnées pour effectuer les régressions et les classes d'altitude 2500m et 2700m ont été calculées avec seulement une station de référence chacune. Par conséquent, ces données manquent de robustesse puisque les valeurs d'une seule station peuvent difficilement être représentatives pour toute une région. Une deuxième limite est que le choix, des tranches d'altitude et des périodes de l'année pour effectuer les régressions, est issu d'un processus empirique qui peut fortement modifier les résultats, suivant les catégories choisies. Ceci demande donc une analyse rigoureuse des données pour calculer les formules empiriques, en assurant un bon ajustement des courbes de régressions et des valeurs élevées du coefficient de détermination  $R^2$ , qui permettent de faire correspondre au mieux les valeurs calculées aux valeurs mesurées.

Pour la suite, les modèles climatiques devraient permettre de simuler de mieux en mieux les chutes de neige pour le futur. En effet, le modèle développé par Frei et al. (2018) a permis de séparer les chutes de neige des précipitations totales, en se basant sur les conditions de températures proches de la surface. Grâce à cette évolution, des projections concernant les

chutes de neige futures ont pu être effectuées pour la Suisse, alors que ce n'était pas possible auparavant (CH2018, 2018 ; Frei et al., 2018).

Bien que l'on constate des différences assez marquées en automne et au printemps, les résultats obtenus dans le rapport CH2018 (2018) et par Frei et al. (2018) sont assez similaires aux données de ce travail. En effet, les tendances générales pour la période hivernale sont les mêmes, à savoir une forte diminution des chutes neiges à basse altitude, une baisse plus modérée à moyenne altitude et une légère augmentation en haute altitude. Par conséquent, le présent travail, effectué pour le Nord des Alpes et les Alpes vaudoises, permet tout de même de simuler de manière assez précise les chutes de neige futures à l'aide de formules empiriques, malgré certaines imprécisions.

Comme les modèles climatiques ne permettent pas encore d'avoir des résultats précis au niveau régional, la méthode des formules empiriques selon Fallot (2017) reste un bon moyen de simuler les chutes de neige à une échelle locale, si le nombre de stations et les données disponibles sont suffisantes.

Pour la partie II, la description de la ressource « Neige » et de la dynamique territoriale a permis de mettre en évidence trois étapes distinctes dans le contexte des Alpes vaudoises. Tout d'abord une phase de mise en valeur avec la découverte de la pratique du ski, ensuite une phase de croissance renouvelable avec le développement des infrastructures et finalement une phase de pénurie avec la baisse des chutes neige due au changement climatique. Cette dynamique de pénurie de la ressource « Neige » montre des vulnérabilités territoriales importantes, notamment liées à la dépendance aux activités touristiques des stations de Villars et des Diablerets. Toutefois, comme ces éléments n'ont pas pu se baser sur des entretiens semi-directifs, ils permettent simplement de définir le contexte de la ressource « Neige » et des vulnérabilités territoriales et ne constitue pas une analyse robuste de ces notions pour la région d'étude.

Ensuite, la revue de littérature sur les stratégies d'adaptation a permis de mettre en évidence deux principales stratégies, à savoir le maintien du ski et la diversification des activités touristiques. Pour maintenir le ski, la revue de littérature a montré l'importance de la gestion des infrastructures et la mise en place de canons à neige, pour permettre d'augmenter la fiabilité de l'enneigement. En ce qui concerne la diversification, la situation de chaque station est unique et peut concerner aussi bien le tourisme d'hiver ou d'été que d'autres secteurs économiques. De plus, une mobilisation de tous les acteurs du territoire est essentielle pour révéler et valoriser les ressources territoriales latentes, nécessaires au processus de diversification.

Finalement, l'analyse de la stratégie « Alpes vaudoises 2020 », pour les stations de Villars et des Diablerets, a montré que les mesures d'adaptations concernant le maintien du ski étaient bien développées, alors que la diversification touristique n'était pas encore aboutie malgré la concrétisation de certains projets. En effet, la majorité des investissements ont été faits sur le domaine skiable, avec notamment la modernisation des installations et le développement de l'enneigement artificiel. Même si ces mesures ne sont pas durables sur le long terme, elles assurent la viabilité économique à court terme des stations, ce qui devrait permettre une diversification progressive du secteur touristique. Toutefois, pour bien analyser la mise en place de ces stratégies d'adaptation, une étude plus approfondie est nécessaire pour comprendre les dynamiques d'acteurs et les enjeux de gouvernance au sein des stations de Villars et des Diablerets.

## Bibliographie

### Partie I

Abegg, B., Agrawala, S., Crick, F., & de Montfalcon, A. (2007). Climate change impacts and adaptation in winter tourism. *Climate change in the European Alps: Adapting winter tourism and natural hazards management*, 25-58. <http://doi.org/10.5167/uzh-25396>

CH2011 (2011). *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 p.

CH2018 (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. National Centre for Climate Services, Zurich, 271 p.

Fallot, J. M. (2012). Influence de la topographie et des accumulations d'air froid sur les températures moyennes mensuelles et annuelles en Suisse. In *Les climats régionaux: observation et modélisation*, 273-278. Repéré à [https://serval.unil.ch/fr/notice/serval:BIB\\_A70AAB9EC086](https://serval.unil.ch/fr/notice/serval:BIB_A70AAB9EC086)

Fallot, J. M. (2017). Estimation des chutes de neige à partir des températures et des précipitations moyennes mesurées en Suisse. In *Climat, ville et environnement*, 265-271. Repéré à [https://serval.unil.ch/fr/notice/serval:BIB\\_BD212AA5C348](https://serval.unil.ch/fr/notice/serval:BIB_BD212AA5C348)

Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., ... & Forest, C. (2014). Evaluation of climate models. In *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 741-866. Repéré à <https://elib.dlr.de/95697/>

Frei, P., Kotlarski, S., Liniger, M. A., & Schar, C. (2018). Future snowfall in the Alps: projections based on the EURO-CORDEX regional climate models. *The Cryosphere*, 12(1), 1-24. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000233992>

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535p.

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 151p.

IPCC (2018) *Summary for Policymakers*. In: Global Warming of 1.5°C. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 p.

Klein, G., Vitasse, Y., Rixen, C., Marty, C., & Rebetez, M. (2016). Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, 139(3-4), 637-649. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1806-y>

Rebetez, M., & Serquet, G. (2013). *Changements climatiques: quel avenir pour les destinations touristiques des Alpes et du Jura vaudois*. Lausanne: Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), 135p.

Roebber, P. J., Bruening, S. L., Schultz, D. M., & Cortinas Jr, J. V. (2003). Improving snowfall forecasting by diagnosing snow density. *Weather and forecasting*, 18(2), 264-287. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<0264:ISFBDS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<0264:ISFBDS>2.0.CO;2)

Serquet, G., Marty, C., Dulex, J. P., & Rebetez, M. (2011). Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 38(7). <https://doi.org/10.1029/2011GL046976>

Serquet, G., Marty, C., & Rebetez, M. (2013). Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snowfall/precipitation day ratio. *Theoretical and applied climatology*, 114(3-4), 437-444 <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0847-7>

## Partie II

Abegg, B., Agrawala, S., Crick, F., & de Montfalcon, A. (2007). Climate change impacts and adaptation in winter tourism. *Climate change in the European Alps: Adapting winter tourism and natural hazards management*, 25-58. <http://doi.org/10.5167/uzh-25396>

Achin, C., Vlès, C., Bouneau, C. (2016). Quand la diversification des stations modernise le tissu organisationnel des territoires. *Stations en tension*. 133-147. Repéré à <https://hal.inrae.fr/hal-02603350>

ADPE (Association pour le développement du Pays-d'Enhaut), ARDA (Association régionale pour le développement du district d'Aigle) (2004). *Etude de diversification touristique : Diagnostic-Rapport final*. Lyon-Ecully : ALGOE – SEREC.

Boillat, C. (2016, 3 novembre). Coup d'arrêt pour le Projet des Isles aux Diablerets. *24heures*. Lausanne, Suisse.

Boyer, M. (2004). Les Alpes et le tourisme. *Histoire Des Alpes*, 19-30. <http://doi.org/10.5169/seals-10109>

Bonnemains, A., Clivaz, C. (2019). Adaptation aux changements climatiques des stations de sports d'hiver dans les Alpes françaises et suisses : quel rôle pour les pouvoirs publics ?. Dans F. Cholat, L. Gwiazdzinski, C. Tritz et J. Tuppen (dir.), *Tourisme(s) et adaptation(s)*, (pp. 227-234). Paris : Elya, coll. « L'innovation autrement ».

Cardona, O. D., Carreño, M. L., & Barbat, A. H. (2007). A disaster risk management performance index. *Natural hazards*, 41(1), 1-20. Repéré à <https://ideas.repec.org/a/spr/nathaz/v41y2007i1p1-20.html>

CITAV (Communauté d'intérêt touristique des Alpes vaudoises) (2013). *Alpes vaudoises 2020 : Rapport final*. Le Sépey : CITAV, 45p.

Colletis, G., & Pecqueur, B. (1994). Les facteurs de la concurrence spatiale et la construction des territoires. In *Organization of production and territory: local models of development*, 93-115. Repéré à <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3647045>

Corrado, F. (2004). Vers un concept opératoire : la ressource territoriale. *Revue Montagnes Méditerranéennes*, 20, 21-24. Repéré à <https://www.pacte-grenoble.fr/actualites/montagnes-mediterraneennes-2004-ndeg-20>

Courlet, C. (2013). *L'économie territoriale*. Grenoble: Presses universitaires de Grenoble, 142p.

Dupuis, J. (2015). *S'adapter au changement climatique. Analyse critique des nouvelles politiques de gestion de l'environnement. Cas spécifiques de l'agriculture en Inde et du tourisme hivernal en Suisse*. Editions Alphil Presses universitaires suisses, 392p.

Elsasser, H., & Bürki, R. (2002). Climate change as a threat to tourism in the Alps. *Climate research*, 20(3), 253-257. Repéré à <https://www.int-res.com/abstracts/cr/v20/n3/p253-257>

François, H., Morin, S., Spandre, P., Lafaysse, M., Lejeune, Y., & George-Marcelpoil, E. (2016). Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver: description de l'approche, application aux Alpes françaises et introduction de la prise en compte des pratiques de gestion (damage et neige de culture). *La Houille Blanche*, (4), 66-84. Repéré à <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2016/04/lhb2016041/lhb2016041.html>

Genillard, D. (2015, 20 juillet). Les noces des Diablerets et de Villars se décident cette semaine. *24 heures*, p. 15. Lausanne, Suisse

Genillard, D. (2018, 17 décembre). Les Diablerets inaugurent la télécabine du renouveau. *24 heures*, p. 5. Lausanne, Suisse.

George, E., Achin, C., François, H., Spandre, P., Morin, S., & Verfaillie, D. (2019). Changement climatique et stations de montagne alpines: impacts et stratégies d'adaptation. *Sciences Eaux Territoires*, (2), 44-51. Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02391605/>

Gonseth, C. (2013). Impact of snow variability on the Swiss winter tourism sector: implications in an era of climate change. *Climatic change*, 119(2), 307-320. Repéré à <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-013-0718-3>

Gumuchian, H., & Pecqueur, B. (2007). *La ressource territoriale*. Paris: Economica-Anthropos, 252p.

Jaccard, E., Bayle, E., & Langenbach, M. (2016). La gouvernance des stations de montagne et leurs politiques sportive et touristique: Les enseignements du cas de Villars-sur-Ollon. *Gestion et management public*, 5(3), 87-105. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-gestion-et-management-public-2016-3-page-87.htm>

Kébir, L., & Crevoisier, O. (2004). Dynamique des ressources et milieux innovateurs. In Ressources naturelles et culturelles, milieux et développement local. *GREMI et EDES, Presses universitaires de Provence*. 261-290. Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01456586/>

Kébir, L. (2006). Ressource et développement régional, quels enjeux?. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, (5), 701-723. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-d-economie-regionale-et-urbaine-2006-5-page-701.htm>

Lamara, H. (2009). Les deux piliers de la construction territoriale: coordination des acteurs et ressources territoriales. Développement durable et territoires. *Économie, géographie, politique, droit, sociologie*. Repéré à <http://developpementdurable.revues.org/8208>

Passello, V. (2016, 24 novembre). Le centre aqualudique prend l'eau. *Le Régional*. Vevey, Suisse.

Peyrache-Gadeau, V. (2007). Territoires Touristiques: capacités d'innovation et vulnérabilités. *Loisirs et société*, 157-175. <https://doi.org/10.1080/07053436.2007.10707744>

Peyrache-Gadeau, V., Rutter, S., & Bélicard, J. (2017). 8. Innovation in sustainable tourism projects in Alpine resorts. *Sustainable Innovation and Regional Development: Rethinking Innovative Milieus*, 170-186. Repéré à <https://hal-sde.archives-ouvertes.fr/hal-01802208/>

Pittet, L. (2020, 4 janvier). Les Jeux olympiques de la jeunesse ramènent la flamme en Suisse. *Le Temps*, p. 8. Lausanne, Suisse.

Raffestin, C. (1980). *Géographie économique du pouvoir*. Paris, Librairies techniques (LITEC), 249p.

Rebetez, M., & Serquet, G. (2013). *Changements climatiques: quel avenir pour les destinations touristiques des Alpes et du Jura vaudois*. Lausanne: Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), 135p.

Roulet, M. (2018, 4 août). Aux Diablerets, mélodrame autour d'une télécabine. *Le Temps*, p.1. Lausanne, Suisse.

Serquet, G. (2011). Changement climatique dans les régions de montagnes suisse : une analyse de variables climatiques en lien avec le tourisme (thèse non publiée). Université de Neuchâtel, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Institut de géographie, Suisse.

Spandre, P., François, H., George-Marcelpoil, E., & Morin, S. (2016). Panel based assessment of snow management operations in French ski resorts. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 16, 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.jort.2016.09.002>

Steiger, R. (2010). The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria. *Climate research*, 43(3), 251-262. Repéré à <https://www.int-res.com/abstracts/cr/v43/n3/p251-262/>

Vanat, L. (2019). *Bilan de la saison 2018/2019. Fréquentation des domaines skiables*. Berne : Remontées mécaniques suisses.

Wahli Di Matteo, F. (2017, 31 octobre). En silence, l'ASD avance vers le pied du Meilleret. *24heures*. Lausanne, Suisse.

## Annexes

## Annexe 1 : Rapports R entre les précipitations et les chutes de neige

Mois	Stations	T (°C)	Rapport R
<b>900-1000m</b>			
Janvier	Château d'Oex	-1.94	1.81
Février	Château d'Oex	-0.98	1.55
Mars	Château d'Oex	2.69	2.45
Avril	Château d'Oex	6.35	4.94
Mai	Château d'Oex	10.77	76.87
Juin	Château d'Oex	13.96	#DIV/0!
Juillet	Château d'Oex	16.14	#DIV/0!
Aout	Château d'Oex	15.78	#DIV/0!
Septembre	Château d'Oex	12.17	3437.10
Octobre	Château d'Oex	7.93	45.53
Novembre	Château d'Oex	2.20	3.93
Décembre	Château d'Oex	-1.02	2.49
Janvier	Einsiedeln	-2.06	1.78
Février	Einsiedeln	-1.48	1.58
Mars	Einsiedeln	1.96	2.33
Avril	Einsiedeln	5.85	5.35
Mai	Einsiedeln	10.49	68.79
Juin	Einsiedeln	13.57	#DIV/0!
Juillet	Einsiedeln	15.74	#DIV/0!
Aout	Einsiedeln	15.35	#DIV/0!
Septembre	Einsiedeln	11.78	2408.05
Octobre	Einsiedeln	7.74	28.81
Novembre	Einsiedeln	2.34	3.58
Décembre	Einsiedeln	-0.81	2.18
Janvier	Gstaad-Saenen	-3.57	1.60
Février	Gstaad-Saenen	-2.62	1.62
Mars	Gstaad-Saenen	1.00	2.05
Avril	Gstaad-Saenen	5.01	3.41
Mai	Gstaad-Saenen	9.74	36.68
Juin	Gstaad-Saenen	12.78	#DIV/0!
Juillet	Gstaad-Saenen	15.00	#DIV/0!
Aout	Gstaad-Saenen	14.47	#DIV/0!
Septembre	Gstaad-Saenen	11.20	1559.30
Octobre	Gstaad-Saenen	7.00	25.00
Novembre	Gstaad-Saenen	1.07	2.80
Décembre	Gstaad-Saenen	-2.44	2.01

Mois	Stations	T (°C)	Rapport R
<b>1400-2000 m</b>			
Janvier	Grimsel Hospiz	-5.05	1.01
Février	Grimsel Hospiz	-5.34	0.92
Mars	Grimsel Hospiz	-3.23	1.00
Avril	Grimsel Hospiz	-0.40	1.09
Mai	Grimsel Hospiz	4.18	2.22
Juin	Grimsel Hospiz	7.54	6.61
Juillet	Grimsel Hospiz	10.00	43.29
Aout	Grimsel Hospiz	10.03	28.11
Septembre	Grimsel Hospiz	7.06	6.65
Octobre	Grimsel Hospiz	4.05	2.49
Novembre	Grimsel Hospiz	-1.07	1.21
Décembre	Grimsel Hospiz	-4.04	1.05
Janvier	Montana	-1.85	1.02
Février	Montana	-1.65	1.05
Mars	Montana	1.08	1.32
Avril	Montana	4.34	2.00
Mai	Montana	8.95	17.80
Juin	Montana	12.21	225.49
Juillet	Montana	14.63	#DIV/0!
Aout	Montana	14.25	#DIV/0!
Septembre	Montana	10.84	79.02
Octobre	Montana	7.10	9.13
Novembre	Montana	1.93	1.97
Décembre	Montana	-0.91	1.18
Janvier	Andermatt	-4.73	0.99
Février	Andermatt	-3.91	0.95
Mars	Andermatt	-0.40	1.22
Avril	Andermatt	3.17	1.63
Mai	Andermatt	7.88	5.72
Juin	Andermatt	10.79	57.45
Juillet	Andermatt	12.92	1852.25
Aout	Andermatt	12.72	#DIV/0!
Septembre	Andermatt	9.43	66.28
Octobre	Andermatt	5.86	5.14
Novembre	Andermatt	-0.03	1.61
Décembre	Andermatt	-3.54	1.06

Mois	Stations	T (°C)	Rapport R
<b>1000-1400m</b>			
Janvier	Elm	-1.95	1.20
Février	Elm	-1.21	1.21
Mars	Elm	2.21	1.73
Avril	Elm	6.10	3.08
Mai	Elm	10.67	21.15
Juin	Elm	13.37	1699.13
Juillet	Elm	15.34	#DIV/0!
Aout	Elm	15.05	#DIV/0!
Septembre	Elm	11.77	286.04
Octobre	Elm	8.02	9.40
Novembre	Elm	2.28	2.28
Décembre	Elm	-0.97	1.41
Janvier	Guttannen	-1.94	1.25
Février	Guttannen	-1.16	1.40
Mars	Guttannen	2.11	1.67
Avril	Guttannen	5.64	2.60
Mai	Guttannen	10.35	12.35
Juin	Guttannen	13.40	4784.42
Juillet	Guttannen	15.36	#DIV/0!
Août	Guttannen	15.05	#DIV/0!
Septembre	Guttannen	11.78	235.03
Octobre	Guttannen	7.85	11.39
Novembre	Guttannen	2.31	2.23
Décembre	Guttannen	-0.73	1.52
Janvier	Engelberg	-2.05	1.14
Février	Engelberg	-1.34	1.08
Mars	Engelberg	2.02	1.45
Avril	Engelberg	5.64	2.65
Mai	Engelberg	10.19	43.85
Juin	Engelberg	13.04	#DIV/0!
Juillet	Engelberg	15.06	#DIV/0!
Août	Engelberg	14.70	#DIV/0!
Septembre	Engelberg	11.29	#DIV/0!
Octobre	Engelberg	7.55	15.00
Novembre	Engelberg	2.08	2.06
Décembre	Engelberg	-1.04	1.47
Janvier	Adelboden	-1.39	1.19
Février	Adelboden	-1.23	1.01
Mars	Adelboden	1.44	1.33
Avril	Adelboden	4.61	2.01
Mai	Adelboden	9.12	13.52
Juin	Adelboden	12.08	416.25
Juillet	Adelboden	14.34	380.76
Aout	Adelboden	14.01	#DIV/0!
Septembre	Adelboden	10.75	151.16
Octobre	Adelboden	7.28	10.38
Novembre	Adelboden	2.15	1.75
Décembre	Adelboden	-0.48	1.43

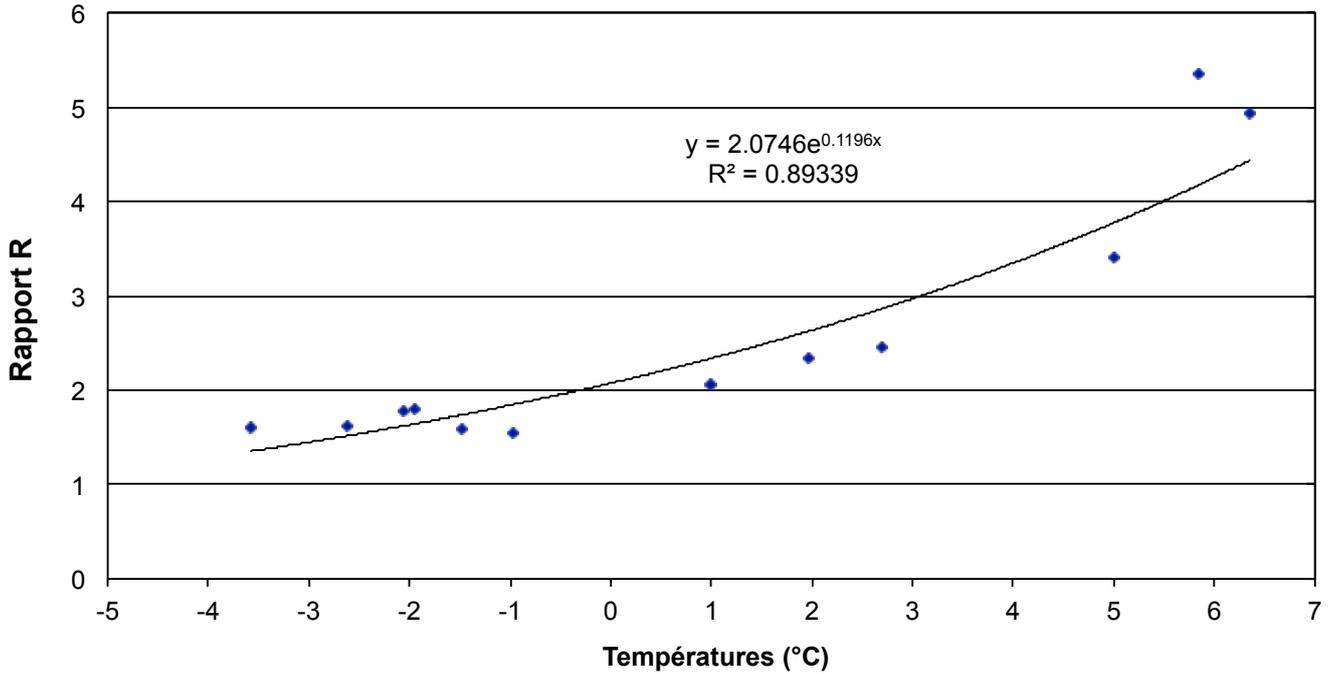
Mois	Stations	T (°C)	Rapport R
<b>2500m</b>			
Janvier	Saentis	-6.84	1.55
Février	Saentis	-7.53	1.36
Mars	Saentis	-6.15	1.55
Avril	Saentis	-3.65	1.65
Mai	Saentis	0.9	3.21
Juin	Saentis	3.75	5.31
Juillet	Saentis	6.2	15.62
Aout	Saentis	6.39	16.24
Septembre	Saentis	3.65	4.88
Octobre	Saentis	1.24	2.79
Novembre	Saentis	-3.53	1.61
Décembre	Saentis	-6.09	1.58

Mois	Stations	T (°C)	Rapport R
<b>2700m</b>			
Janvier	Weissfluhjoch	-7.96	0.74
Février	Weissfluhjoch	-8.71	0.72
Mars	Weissfluhjoch	-7.26	0.73
Avril	Weissfluhjoch	-4.79	0.78
Mai	Weissfluhjoch	-0.08	1.77
Juin	Weissfluhjoch	3.06	3.69
Juillet	Weissfluhjoch	5.75	10.55
Août	Weissfluhjoch	5.96	12.17
Septembre	Weissfluhjoch	2.98	3.70
Octobre	Weissfluhjoch	0.36	1.46
Novembre	Weissfluhjoch	-4.63	0.78
Décembre	Weissfluhjoch	-7.23	0.74

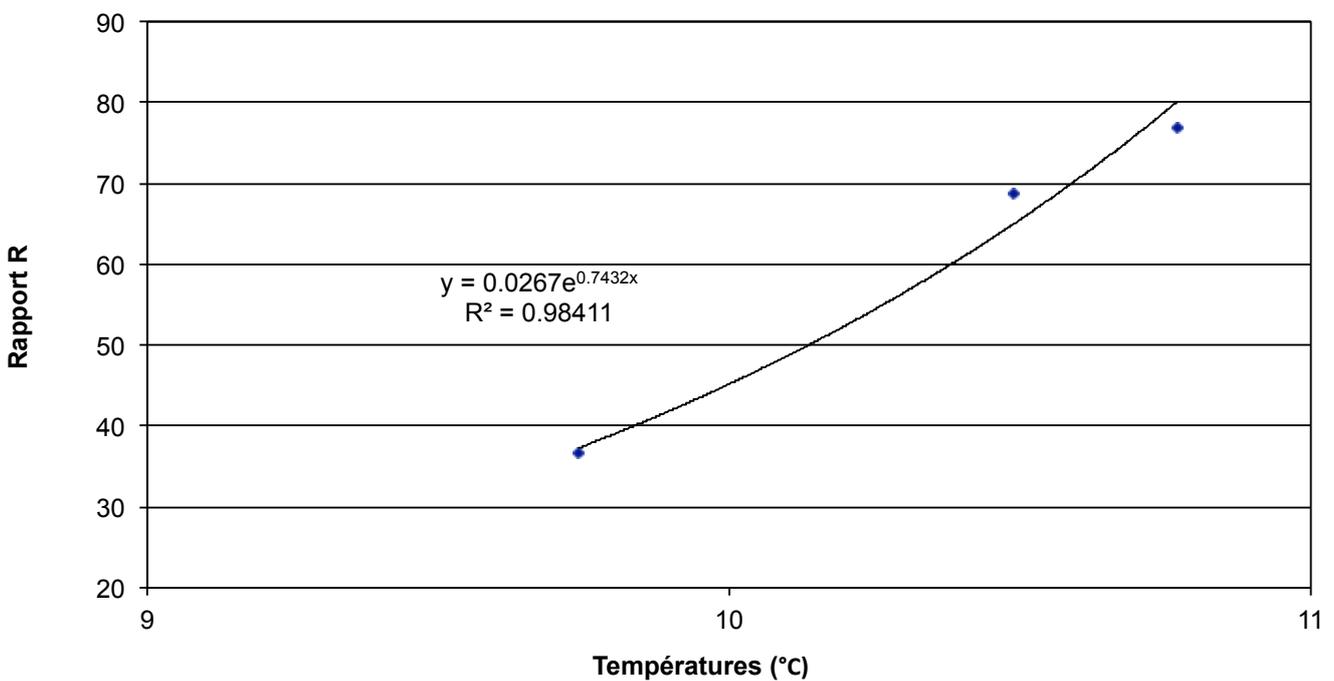
Figure 25 : Rapports R moyens mensuels des différentes stations pour chaque classe d'altitude de 1981-2011

*Annexe 2 : Graphiques de toutes les courbes de régression entre les rapports R moyens mensuels et les températures moyennes mensuelles*

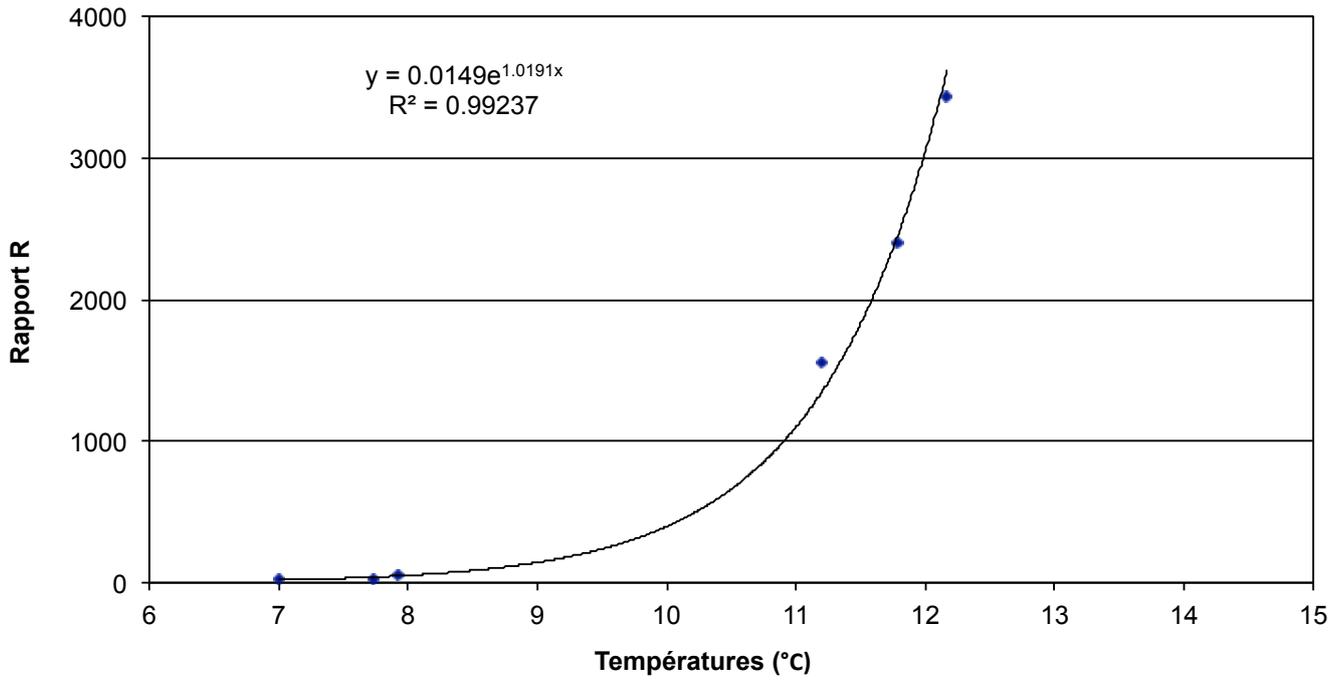
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 900-1000m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période janvier-avril de 1981 à 2011



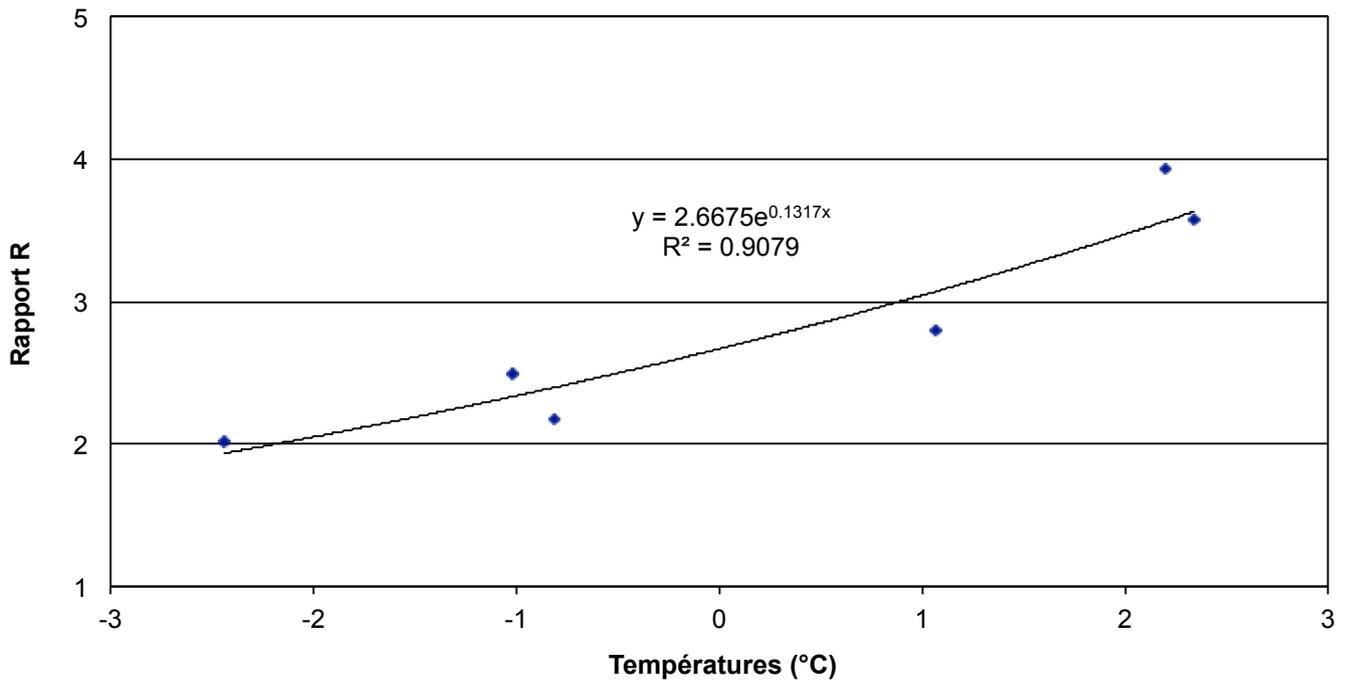
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 900-1000m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période mai-juin de 1981 à 2011



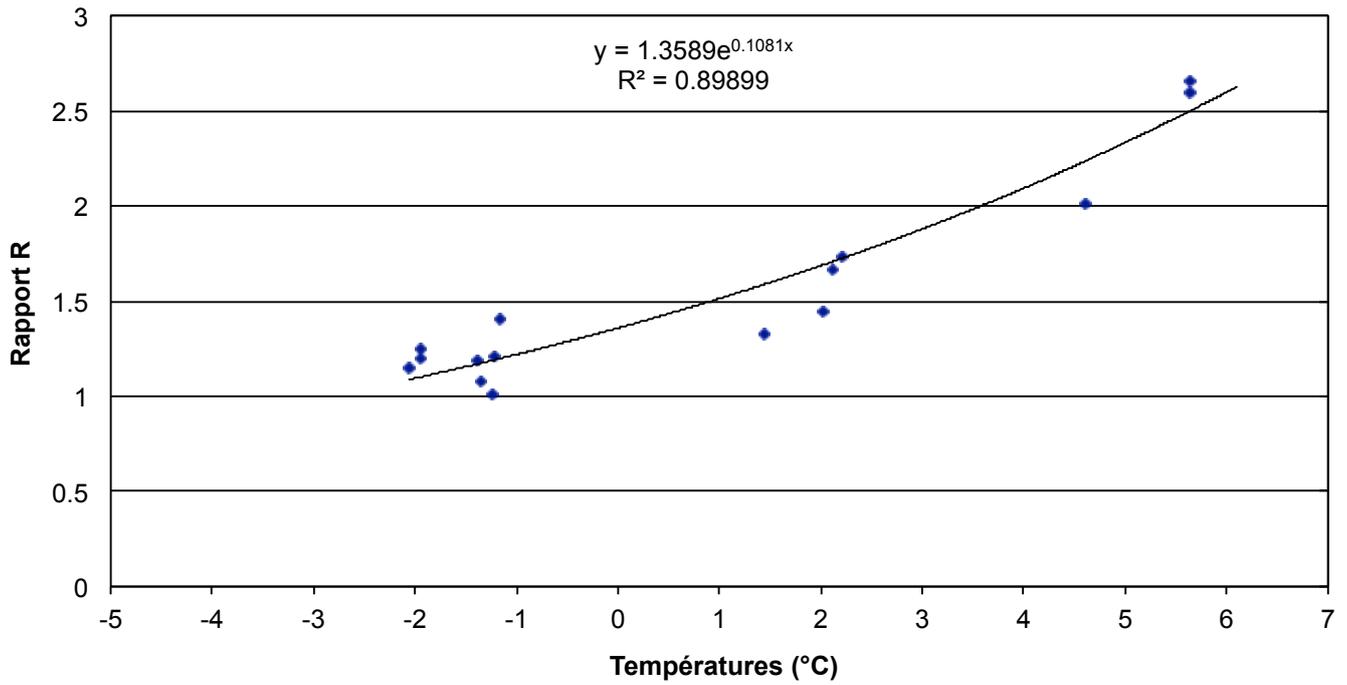
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 900-1000m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période septembre-octobre de 1981 à 2011



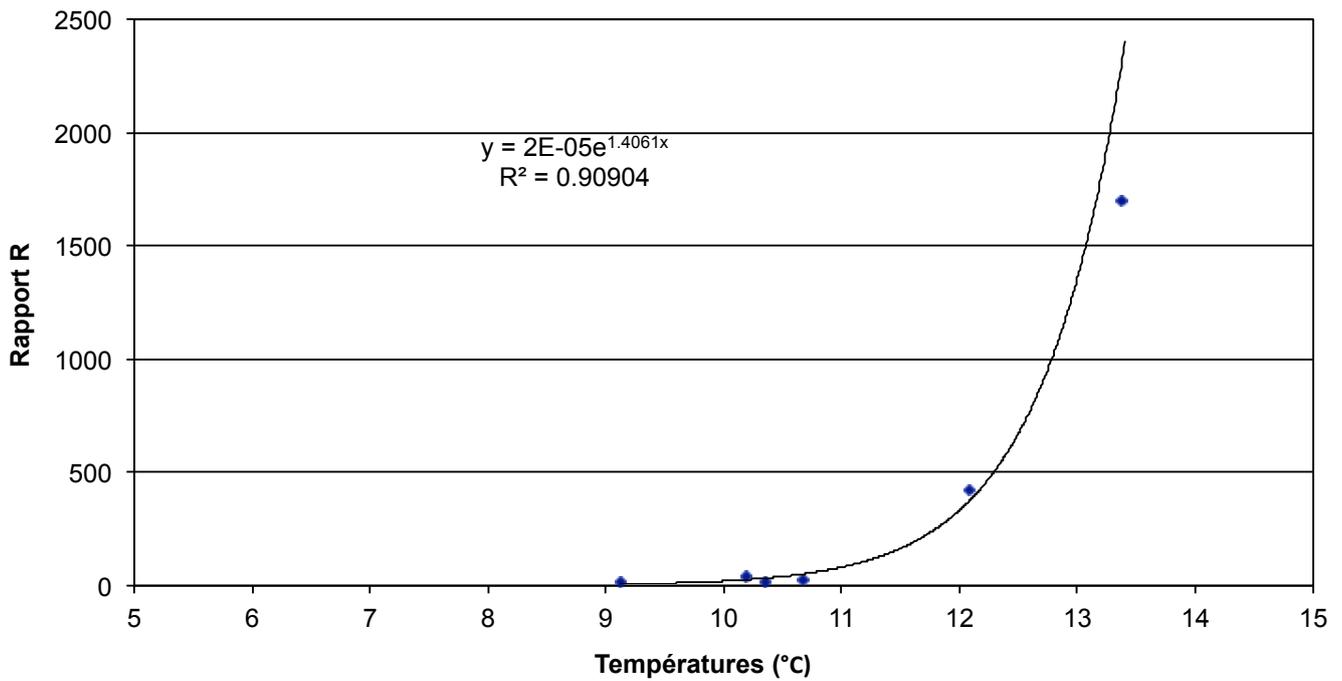
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 900-1000m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période novembre-décembre de 1981 à 2011



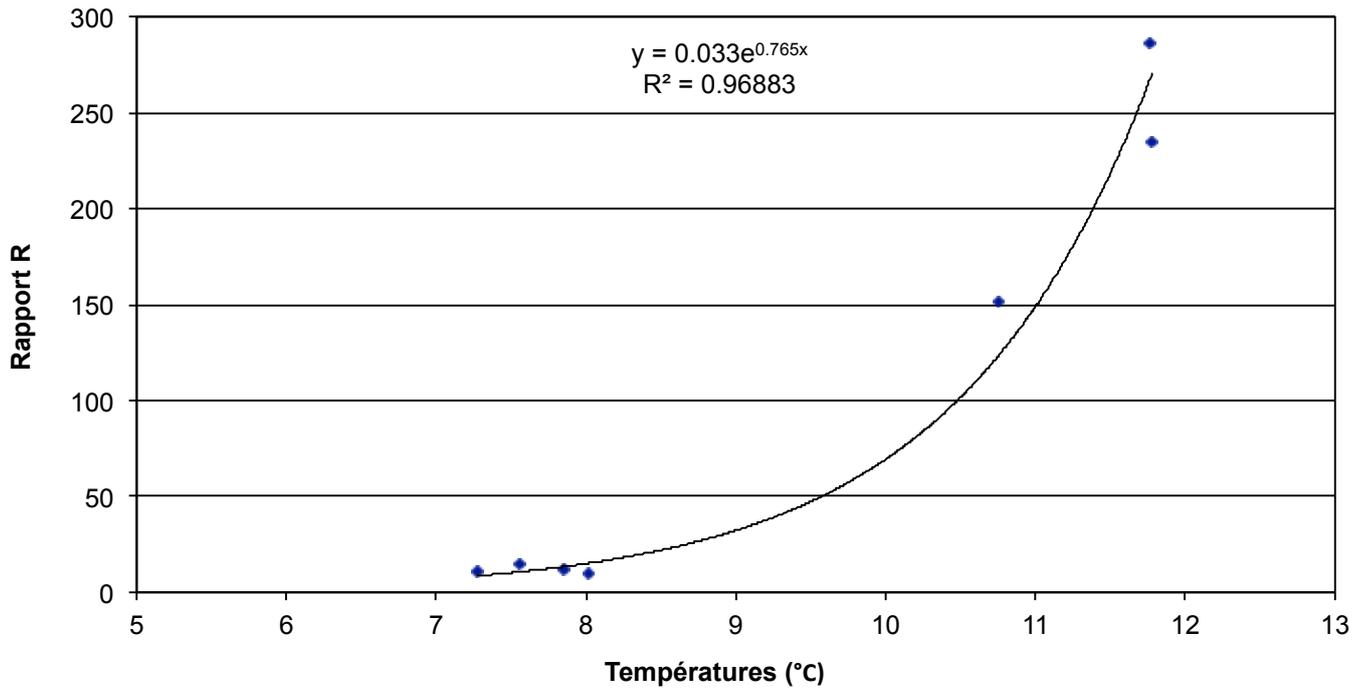
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 1000-1400m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période janvier-avril de 1981 à 2011



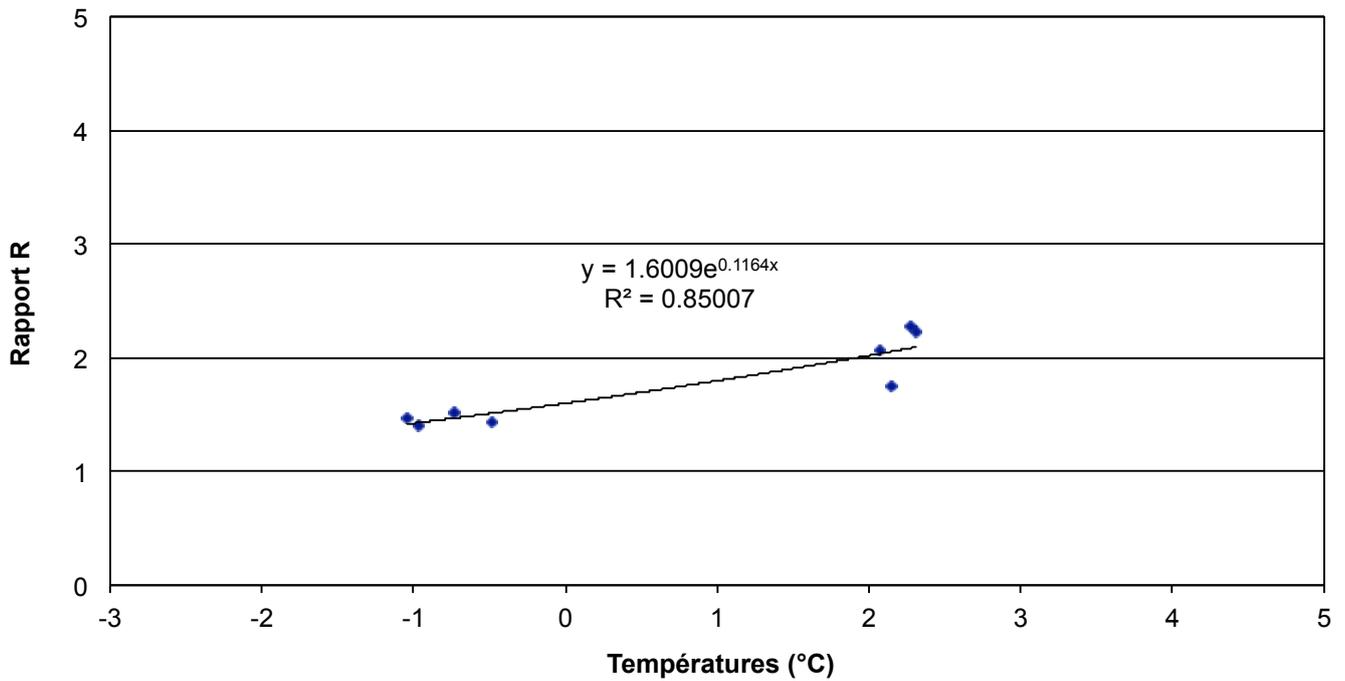
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 1000-1400m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période mai-juin de 1981 à 2011



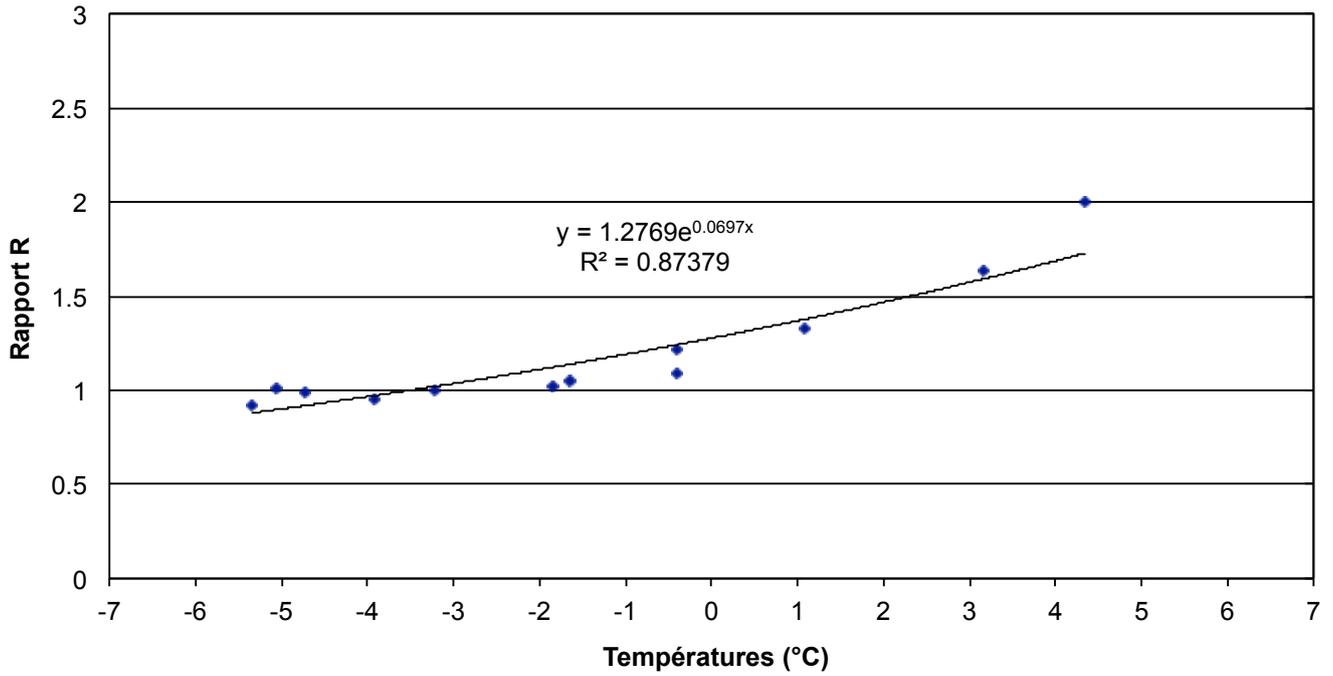
**Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 1000-1400m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période septembre-octobre de 1981 à 2011**



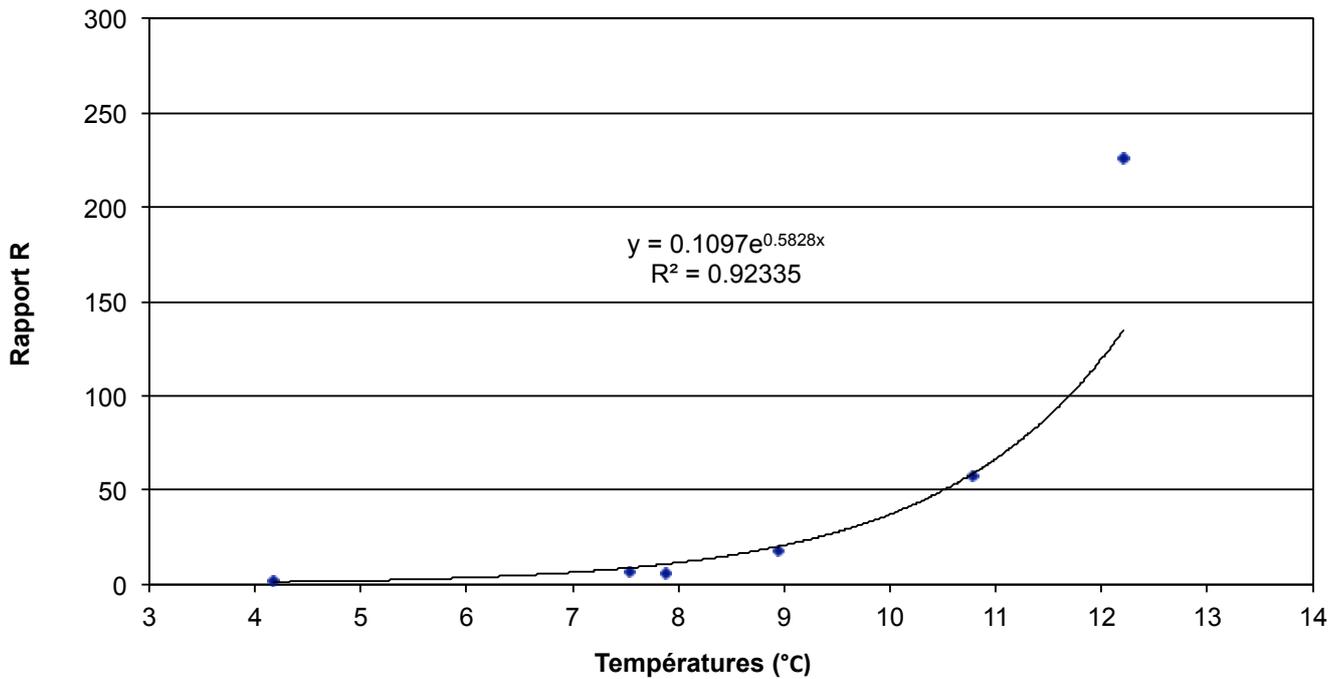
**Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 1000-1400m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période novembre-décembre de 1981 à 2011**



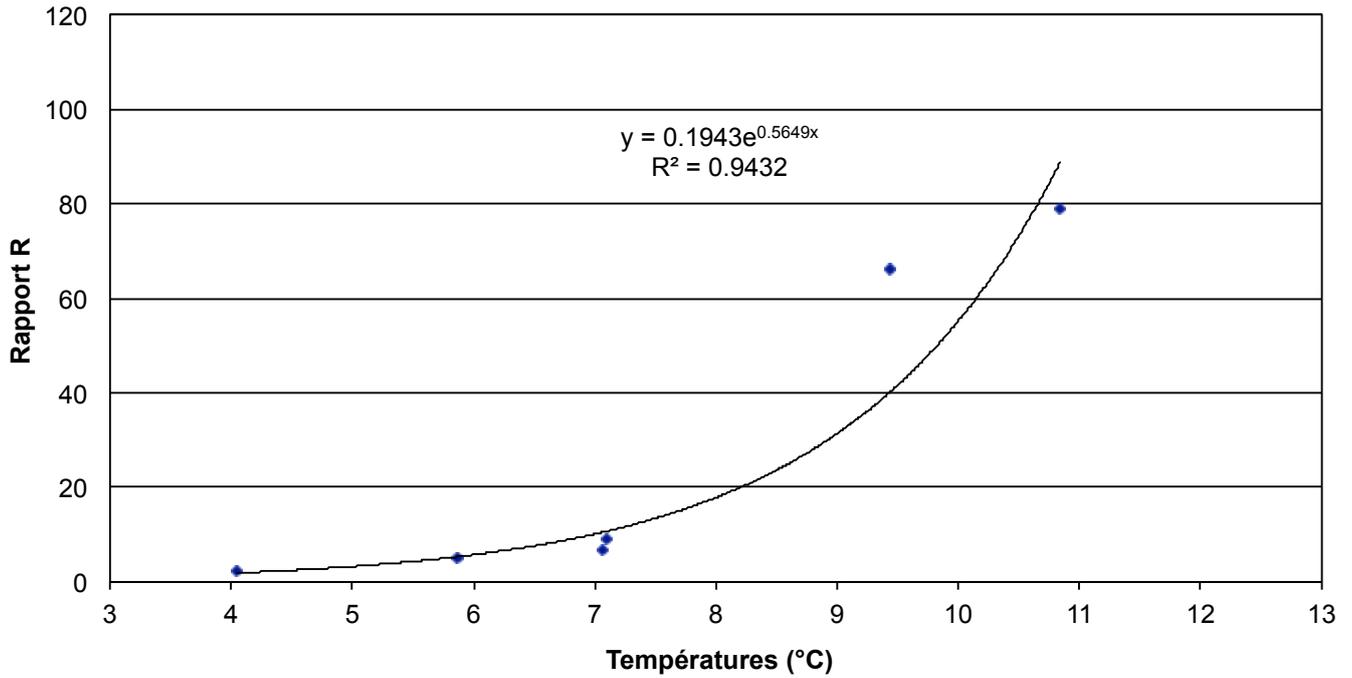
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 1400-2000m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période janvier-avril de 1981 à 2011



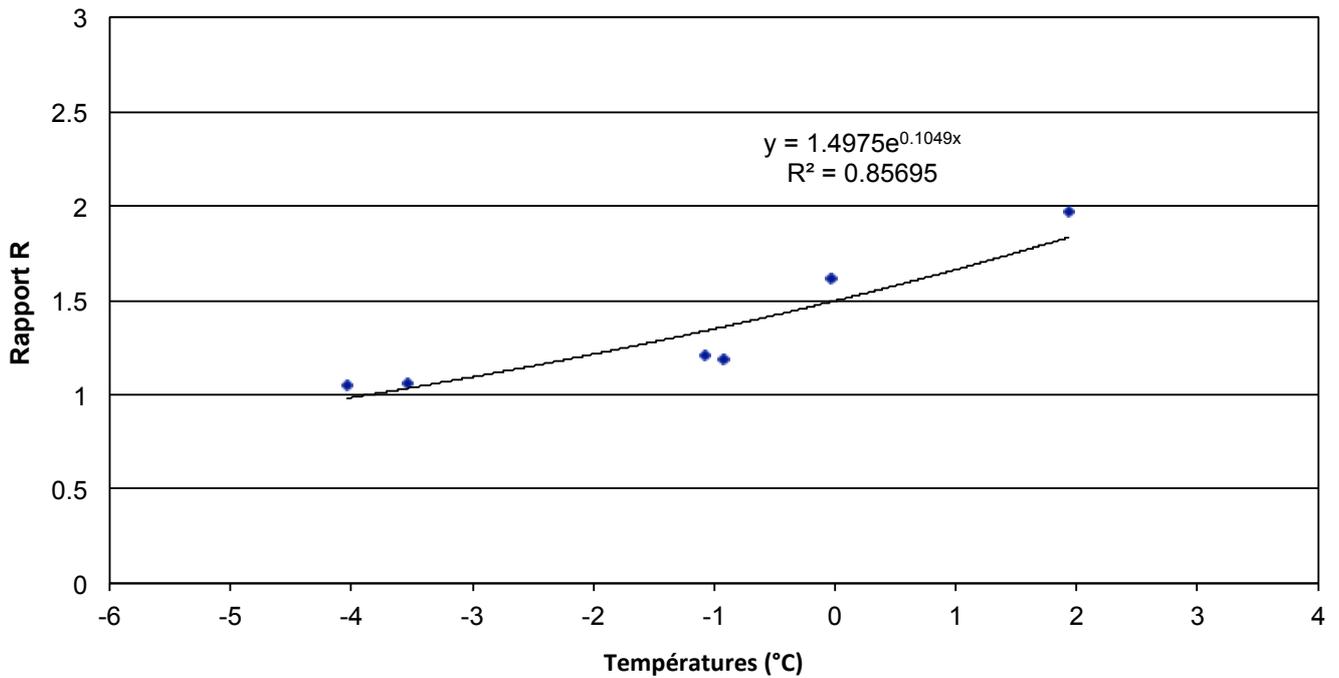
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 1400-2000m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période mai-juin de 1981 à 2011



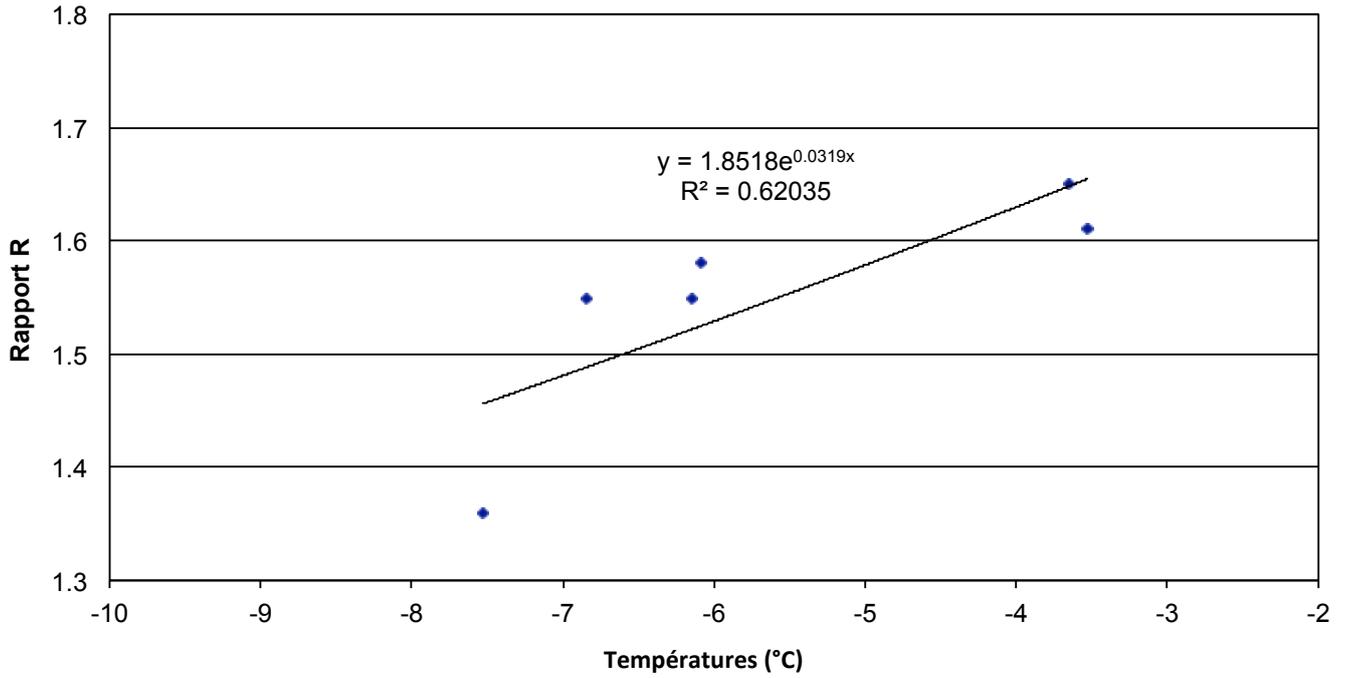
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 1400-2000m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période septembre-octobre de 1981 à 2011



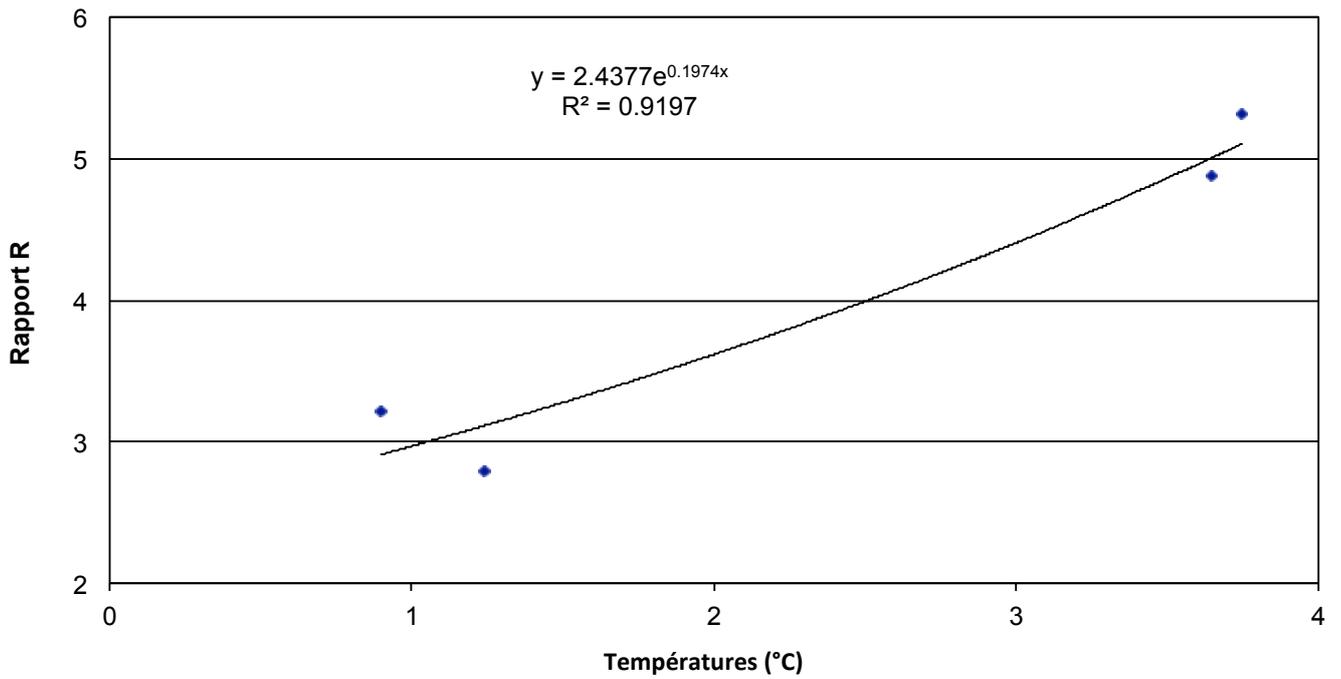
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels de 1400-2000m mesurés dans le Nord des Alpes pour la période novembre-décembre de 1981 à 2011



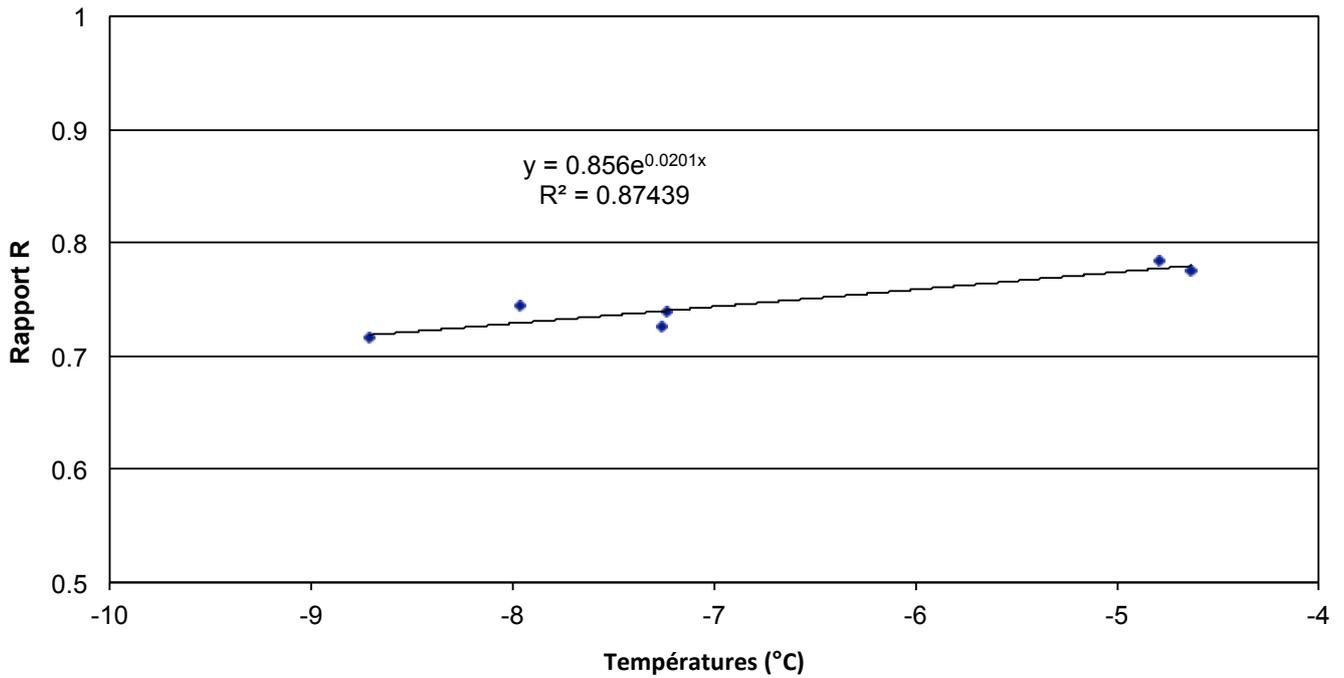
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels à 2500m mesurés au Saentis pour la période novembre-avril de 1981 à 2011



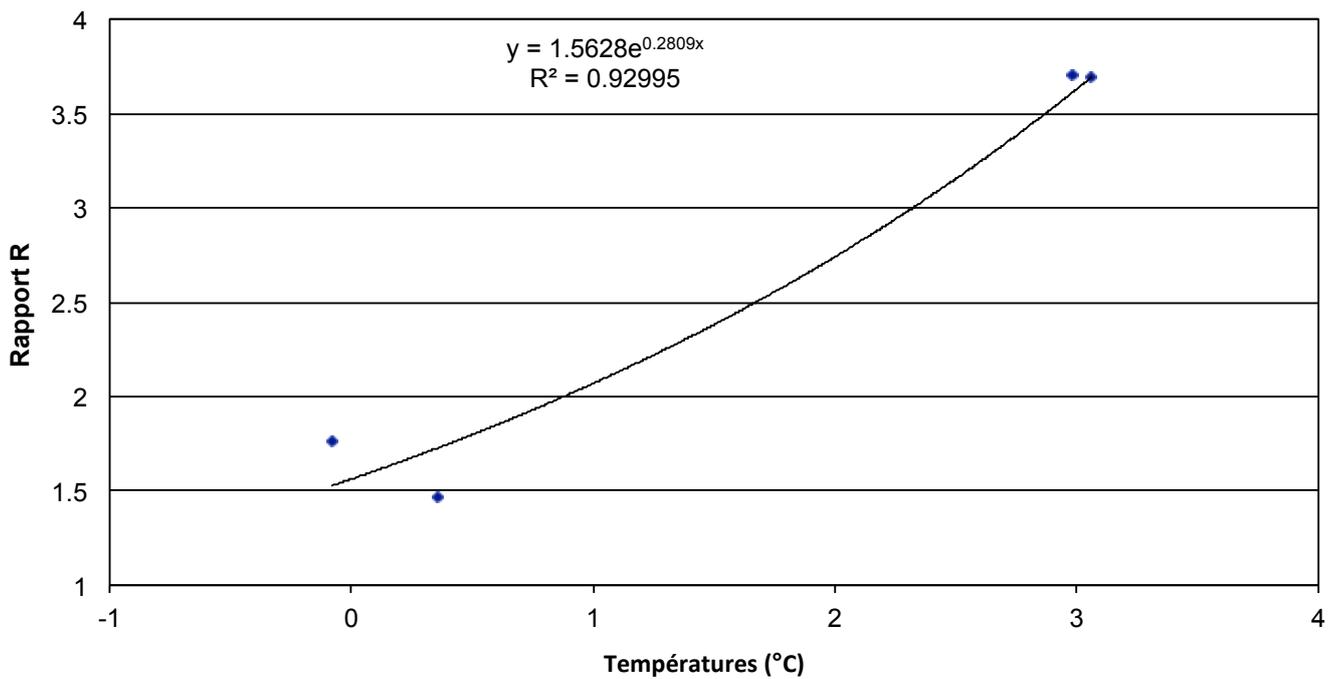
Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels à 2500m mesurés au Saentis pour la période mai-septembre de 1981 à 2011



Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels à 2700m mesurés au Weissfluhjoch pour la période novembre-avril de 1981 à 2011



Températures moyennes mensuelles et rapports R moyens mensuels à 2700m mesurés au Weissfluhjoch pour la période mai-septembre de 1981 à 2011



## Annexe 3 : Projections des températures (CH2018, 2018)

Region	Season	Scenario	Estimates 2035			Estimates 2060			Estimates 2085		
			lower	med.	upper	lower	med.	upper	lower	med.	upper
CHNE	DJF	RCP8.5	0.49	1.41	2.06	1.79	2.38	2.89	3.07	3.77	4.96
		RCP4.5	0.64	1.24	2.01	0.93	1.79	2.89	1.3	2.01	2.96
		RCP2.6	0.49	1.05	1.82	0.53	1.28	2.11	0.59	1.28	2.08
	MAM	RCP8.5	0.43	1.01	1.45	1.14	1.82	2.71	2.15	3.28	4.16
		RCP4.5	0.18	0.78	1.49	0.61	1.31	1.99	0.88	1.56	2.33
		RCP2.6	0.18	0.88	1.32	0.24	0.91	1.47	0.3	0.98	1.47
	JJA	RCP8.5	0.9	1.42	2.13	2.06	2.48	4.05	3.38	4.5	7.01
		RCP4.5	0.79	1.29	2.04	1.38	1.92	2.94	1.61	2.25	3.58
		RCP2.6	0.55	1.1	2.08	0.73	1.23	2.27	0.64	1.18	2.16
SON	RCP8.5	0.87	1.23	2.15	1.74	2.52	3.86	2.86	3.92	5.76	
	RCP4.5	0.68	1.12	1.89	0.94	1.68	3.03	1.52	2.02	3.33	
	RCP2.6	0.5	1.05	1.92	0.72	1.3	2.18	0.54	1.19	2.33	
CHW	DJF	RCP8.5	0.54	1.41	1.91	1.78	2.26	2.62	2.91	3.72	4.79
		RCP4.5	0.61	1.21	1.8	0.99	1.77	2.71	1.36	2.02	2.82
		RCP2.6	0.46	0.98	1.63	0.58	1.25	1.82	0.6	1.23	1.82
	MAM	RCP8.5	0.38	0.89	1.36	1.16	1.86	2.6	2.03	3.14	4.01
		RCP4.5	0.18	0.7	1.4	0.64	1.33	1.9	0.92	1.51	2.26
		RCP2.6	0.13	0.86	1.22	0.23	0.89	1.48	0.3	0.88	1.47
	JJA	RCP8.5	0.87	1.46	2.16	2.17	2.56	4.38	3.53	4.58	7.22
		RCP4.5	0.79	1.31	2.05	1.45	2.01	2.99	1.64	2.38	3.77
		RCP2.6	0.54	1.15	2.06	0.69	1.26	2.36	0.66	1.3	2.25
SON	RCP8.5	0.85	1.24	2.23	1.69	2.45	3.72	2.87	3.91	5.91	
	RCP4.5	0.66	1.09	1.9	0.92	1.63	2.96	1.53	1.96	3.21	
	RCP2.6	0.49	0.94	1.93	0.75	1.25	2.14	0.52	1.24	2.3	
CHS	DJF	RCP8.5	0.61	1.35	2.2	1.76	2.4	3.32	3.18	3.8	5.43
		RCP4.5	0.57	1.27	1.96	1.01	1.85	3.19	1.3	2.13	3.29
		RCP2.6	0.38	1.15	1.71	0.6	1.31	1.85	0.52	1.31	1.97
	MAM	RCP8.5	0.63	0.94	1.38	1.43	1.93	2.77	2.45	3.37	4.41
		RCP4.5	0.26	0.76	1.48	0.8	1.43	2.12	1.08	1.67	2.37
		RCP2.6	0.24	0.95	1.27	0.3	0.84	1.51	0.3	0.83	1.6
	JJA	RCP8.5	1.17	1.63	2.29	2.29	2.94	4.15	4.1	5.04	7
		RCP4.5	1	1.36	2.21	1.48	2.14	2.96	1.8	2.57	3.62
		RCP2.6	0.77	1.31	2.15	0.89	1.27	2.54	0.75	1.29	2.44
SON	RCP8.5	0.78	1.4	2.18	1.77	2.59	3.58	3.16	4.12	5.9	
	RCP4.5	0.74	1.19	1.8	1.14	1.75	2.79	1.71	2.17	3.24	
	RCP2.6	0.5	1.13	1.85	0.73	1.22	2.11	0.51	1.29	2.16	
CHAE	DJF	RCP8.5	0.59	1.38	2.38	1.8	2.48	3.8	3.15	3.86	5.64
		RCP4.5	0.64	1.33	2.03	0.89	2.04	2.96	1.34	2.39	2.97
		RCP2.6	0.51	1.21	1.75	0.57	1.42	2.09	0.56	1.28	2.07
	MAM	RCP8.5	0.43	1.08	1.56	1.35	2.13	3.16	2.54	3.75	5.05
		RCP4.5	0.37	0.91	1.56	0.73	1.42	2.28	1	1.84	2.62
		RCP2.6	0.19	1.06	1.29	0.27	0.98	1.6	0.33	1.01	1.59
	JJA	RCP8.5	1.2	1.7	2.51	2.46	3.34	4.77	4.1	5.3	7.21
		RCP4.5	0.96	1.51	2.33	1.6	2.41	3.43	1.93	2.77	4.17
		RCP2.6	0.66	1.43	2.39	0.98	1.59	2.87	0.9	1.54	2.81
SON	RCP8.5	1.01	1.54	2.26	2.13	3.13	3.91	3.39	4.48	6.19	
	RCP4.5	0.74	1.29	1.99	1.34	2.06	3.09	1.72	2.43	3.37	
	RCP2.6	0.59	1.23	1.99	0.68	1.34	2.3	0.58	1.36	2.24	
CHAW	DJF	RCP8.5	0.68	1.37	2.1	1.75	2.37	3.55	3.08	3.9	5.57
		RCP4.5	0.64	1.27	1.69	0.99	1.89	2.73	1.37	2.18	2.85
		RCP2.6	0.42	1.08	1.68	0.64	1.39	1.86	0.62	1.27	1.86
	MAM	RCP8.5	0.45	1.04	1.55	1.4	2.17	3.1	2.5	3.87	4.86
		RCP4.5	0.36	0.86	1.51	0.73	1.48	2.24	1.05	1.84	2.59
		RCP2.6	0.22	1.04	1.31	0.29	1	1.53	0.34	0.98	1.55
	JJA	RCP8.5	1.16	1.72	2.58	2.58	3.37	4.93	4.3	5.47	7.32
		RCP4.5	0.94	1.42	2.44	1.62	2.43	3.57	2.02	2.83	4.27
		RCP2.6	0.7	1.4	2.5	0.99	1.61	3.02	0.87	1.49	2.94
SON	RCP8.5	1	1.47	2.29	1.98	3.05	3.99	3.25	4.56	6.34	
	RCP4.5	0.71	1.3	1.99	1.37	1.98	3.07	1.75	2.33	3.48	
	RCP2.6	0.6	1.08	1.99	0.87	1.3	2.3	0.55	1.37	2.24	

Figure 26 : Evolution des températures par rapport à la période actuelle (1981-2010) calculée par les modèles climatiques régionaux pour les nouveaux scénarios d'émissions des gaz à effet de serre en Suisse (CH2018, 2018, p.223)

## Annexe 4 : Projections des précipitations (CH2018, 2018)

Region	Season	Scenario	Estimates 2035			Estimates 2060			Estimates 2085		
			lower	med.	upper	lower	med.	upper	lower	med.	upper
CHNE	DJF	RCP8.5	-3.1	7.5	18.2	0.1	9.7	24.1	1.6	14.5	26.8
		RCP4.5	-3.8	6.1	16.7	-6.3	7.3	15.5	-9.8	10.8	19.2
		RCP2.6	-5.5	5.2	20.3	-4.4	4.7	15.6	-7.3	5.7	19
	MAM	RCP8.5	-3	3.9	17.5	0.2	8.6	20.9	-1.5	8.2	34.7
		RCP4.5	-2.6	4.3	10.9	-4.6	6	15.3	-0.7	5.9	18.7
		RCP2.6	-6.8	3.6	11.3	-6.9	4.2	13.2	-6.5	0.1	13.2
	JJA	RCP8.5	-15.5	-2.7	7.6	-24.9	-8.1	9.2	-39	-16.9	-5
		RCP4.5	-17.5	-4.6	1.8	-14.8	-7	-0.6	-25.4	-7.3	7.3
		RCP2.6	-19.5	-2.7	3.5	-15.8	-2.8	6.5	-15	-2.7	8.6
SON	RCP8.5	-8.6	1.2	16.2	-12.1	0.2	8.7	-11.1	-2	12.8	
	RCP4.5	-11.7	-3.3	13.7	-16.2	1.7	13.3	-8.3	3.3	10.1	
	RCP2.6	-10.9	-1.8	17.2	-15.8	-0.6	12.9	-14.1	-2.2	12	
CHW	DJF	RCP8.5	-0.8	10.3	16	0.4	7	20.6	4.9	15.4	23.9
		RCP4.5	-2.3	6.6	16	-4.8	6	19	-6.5	8.2	16.5
		RCP2.6	-6.8	6.3	17.6	-0.6	5.5	14	-1.8	5.5	16.1
	MAM	RCP8.5	-3.8	4	13.4	-1	5	15.5	-2.9	4	25.7
		RCP4.5	-5.4	2.3	10.8	-7.7	3.7	9.6	-0.4	4.3	18.9
		RCP2.6	-9.2	1.6	12.1	-5.7	2.4	13	-5.6	0	12.2
	JJA	RCP8.5	-20.3	-3.9	4.9	-31.6	-11.4	0.2	-42.8	-24.2	-10
		RCP4.5	-18.5	-6	3.7	-19.4	-9.5	-0.1	-28	-8.5	-0.6
		RCP2.6	-18.6	-5.2	3.9	-19.8	-5.1	5.6	-18.9	-3.7	5.9
SON	RCP8.5	-9.7	1.5	11.6	-11.7	-0.3	8	-17.2	-3.4	7.9	
	RCP4.5	-9.2	-2.3	12.5	-11.2	-0.2	8.3	-9.4	1.1	8.4	
	RCP2.6	-11	-1.9	12.9	-13.1	-0.8	15.2	-13.8	-2.4	12.3	
CHS	DJF	RCP8.5	-9	4	22.2	-12.7	9.2	26.4	6.2	21.8	38.4
		RCP4.5	-11	13.6	20.6	-8.6	9.8	26.9	-3.6	8.6	36.9
		RCP2.6	-14.4	10.5	27.2	-8.1	14.1	37.9	-11.8	11.9	35.1
	MAM	RCP8.5	-11.3	-1.5	12.5	-7.2	1.7	14.6	-13.9	1	11.9
		RCP4.5	-9.5	-1.6	11.6	-8.3	0.3	9.8	-8.2	1.8	12.7
		RCP2.6	-9.5	-2.7	11	-12.6	-1.3	8.5	-10	-0.2	18.4
	JJA	RCP8.5	-13.1	-5.4	10.5	-25.1	-12.1	10.8	-39.5	-22.8	1.6
		RCP4.5	-13.5	-5.3	7.5	-19.1	-8.7	4.5	-21.8	-8.2	13.6
		RCP2.6	-16	-4.8	6.2	-11.8	-2.6	12.8	-10.9	-3.7	14.6
SON	RCP8.5	-15.4	-0.7	18.2	-15.2	2.5	12.9	-19.7	0	11.6	
	RCP4.5	-11.3	-0.9	17.2	-14.7	-2.5	8.7	-12.5	0.3	19.6	
	RCP2.6	-11.2	3.9	20.9	-9.9	1.1	15	-13	-2.4	13.3	
CHAE	DJF	RCP8.5	0.5	5.6	15.3	-4.1	7.2	20.9	-1.7	16.6	24
		RCP4.5	0.4	8.1	17.8	-0.8	8.2	13	-5.7	8.3	21.6
		RCP2.6	-2.6	4.1	16.3	-0.2	6.7	19.2	-2.7	6.4	18.6
	MAM	RCP8.5	-5.7	1.7	10.5	-7.5	4.4	13.8	-9.3	4.8	26.8
		RCP4.5	-5.3	-0.8	9.9	-6.8	0.7	8.9	-5.7	3.3	14.4
		RCP2.6	-5.1	-1.6	11.7	-5.8	0.3	10.2	-5.6	2.1	9.9
	JJA	RCP8.5	-6.4	-0.8	9.1	-14.2	-4.8	16.3	-27.3	-9.8	11.3
		RCP4.5	-9.1	-2.4	1.3	-9.6	-3.7	4	-12.2	-0.8	14.2
		RCP2.6	-11.1	-1.5	10.8	-8.6	-1.5	9.8	-7.8	-1.6	8.7
SON	RCP8.5	-8.9	-1.9	11.4	-11.5	1.2	6.6	-11	-2.9	12.5	
	RCP4.5	-9.7	-1.5	11.2	-12.6	0.1	13.8	-9.4	0.9	5.7	
	RCP2.6	-10.1	-0.6	17.5	-10	0	11.6	-10.7	-1.4	10.1	
CHAW	DJF	RCP8.5	-0.9	8.9	14.7	-2.8	7.6	16.4	0.2	12.3	18.1
		RCP4.5	-1.6	7.7	16	-3.3	4.6	16.5	-4.4	7.4	15.1
		RCP2.6	-5.5	6.6	14.8	-0.2	7.7	13.6	-2.1	8	14.4
	MAM	RCP8.5	-4.4	-0.3	13.2	-10	0.2	10.6	-9.8	0.1	15.8
		RCP4.5	-4.5	0.4	6.6	-9.7	-0.7	7.6	-9.4	-0.6	17.5
		RCP2.6	-8.4	-1	11	-5.1	-0.6	6.1	-4.8	0.4	6.6
	JJA	RCP8.5	-11.5	-6.1	7.1	-21	-13.3	4.4	-35.1	-20.9	1.6
		RCP4.5	-15.7	-4.8	-0.4	-23.9	-9.1	0.4	-21.5	-8.7	5.8
		RCP2.6	-16.2	-3.1	7.9	-17.2	-5.2	6.7	-16.5	-3.6	8.6
SON	RCP8.5	-9.4	-2.6	11.6	-12.5	-3.3	5.8	-17	-6	2.9	
	RCP4.5	-10.7	-4.4	12.8	-14.4	-3.7	5.3	-9.2	-4.2	4.8	
	RCP2.6	-12.5	-3.2	15.6	-9.5	-3.5	10.6	-9.7	-4.4	10.7	

Figure 27 : Evolution des précipitations par rapport à la période actuelle (1981-2010) calculée par les modèles climatiques régionaux pour les nouveaux scénarios d'émissions des gaz à effet de serre en Suisse (CH2018, 2018, p.226)

## Annexe 5 : Entretien avec M. Sergei Aschwanden

### Compte rendu de l'entretien du 4 mars 2020 à Villars

#### Informations personnelles

1. Quelle est votre fonction au sein de la Commune / Office tourisme / Remontée mécanique ... ?  
*Directeur générale de la porte de Alpes (Villars, Gryon, Diablerets, Bex) combiné au poste de responsable de la station de Villars (Office du tourisme, centre des sports)*
2. Depuis combien d'année travaillez-vous ici ? dans ce domaine ?  
*Depuis 6 ans en tant que directeur du centre des sport de Villars, depuis 4 ans au poste de responsable de Villars et depuis 2 ans et demi comme directeur général de la porte des Alpes*

#### Ressource « Neige »

##### Historique et mise en valeur : évolution, importance de la ressource ?

3. Comment la neige a-t-elle permis le développement de votre activité/ de la station ? Les conditions d'enneigement des dernières années ont-elles été favorables à votre activité / à la station globalement ?

*Villars fait partie des Alpes vaudoises et jusqu'aux années 2000 la neige est tombée en abondance, ce qui a permis de développer le tourisme d'hiver en lien avec le ski et la station de Villars a toujours été pionnière dans le développement des activités de montagnes. Le pouvoir d'achat est 4 fois supérieur en hiver qu'en été, par conséquent la saison d'hiver a un fort impact économique, qui ne peut pas être supprimé du jour au lendemain. Toutefois, la conscience du changement climatique est présente et la neige n'est aujourd'hui plus aussi abondante que par le passé.*

4. Quelle est l'importance de l'enneigement pour vos activités/ la station ? Selon vous quelles activités sont ici directement ou indirectement liées à la neige ?

*Il y a des liens directs comme les remontées mécaniques et indirects avec la neige, mais le chiffre d'affaire est beaucoup plus important en hiver qu'en été avec un rapport de 1/15. Même si au niveau des nuitées il y a une parité entre l'été et l'hiver, la part de marché hivernal et son impact économique sont ce qui fait vivre la station. Toutefois, aujourd'hui il est important de développer la diversification des activités pour éviter une crise financière si la neige venait à manquer.*

##### Sensibilité/vulnérabilité : impact et temporalité, déjà des pénuries ?

5. Avez-vous constaté une différence d'enneigement (en quantité et qualité) depuis 10-20 ans ? Si oui, quels ont été les impacts d'un manque de neige ? Baisse de fréquentation ? changement de clientèle/ d'offre ? fermeture de pistes...

*Aujourd'hui, la station n'a plus les mêmes garanties d'enneigement que par le passé, surtout en début de saison. Il n'est plus possible de garantir de la neige pour le 15 décembre même avec l'enneigement mécanique, à cause de fortes variations de températures. Ensuite, les journées d'enneigement diminuent en fonction de l'altitude, la station a perdu 40 jours de neige et donc la saison est aujourd'hui de 80 jours alors qu'avant c'était 120 jours.*

*Toutefois, du mois de janvier jusqu'au mois de mars, l'enneigement est garanti par la neige naturelle qui est complétée par la neige artificielle, mais il y a une incertitude si cela va continuer dans le contexte de changement climatique. Le début de saison est très important pour le chiffre d'affaire de la station, donc plus la saison démarre tard, plus les conséquences économiques sont importantes. Cependant, la météo est aussi à prendre en compte, car elle influence également de manière très importante la fréquentation de la station. Donc la neige est un point, mais si la météo est bonne, les gens viennent en station surtout les propriétaires de résidences secondaires. Après, le défi consiste à proposer un maximum d'activités indépendamment des conditions météorologiques.*

6. Les vacances de Noël sont très importantes pour le tourisme d'hiver en station, quelles sont les conséquences d'un manque d'enneigement à cette période par rapport aux relâches ou à Pâques ? (Indicateur de Noël => 30% bénéfiques en 2 semaines, Steiger 2010)

*La neige est garantie pour les relâches et Pâques, mais en début de saison il y a toujours une incertitude liée à l'enneigement. Par conséquent, si la neige n'est pas assurée à Noël et que la météo n'est pas bonne, là cela devient très compliqué. Donc, la station est en train de réfléchir pour maximiser la diversification des activités, qui sont indépendantes des conditions météorologiques. Par exemple, Villars a construit récemment un centre de wellness, qui permet d'assurer une activité quelque soit la météo.*

7. Avec le réchauffement climatique, il devrait y avoir de moins en moins de neige à cette altitude dans les années à venir, cette évolution est-elle problématique pour votre activité / la station ? (Réduction d'ici 2085 de 15 à 35 % selon les scénarios CH2018, et même jusqu'à 50% pour les régions de basse altitude)

*Personne ne souhaite un réchauffement climatique et une diminution du manteau neigeux, mais c'est un phénomène planétaire et la station peut difficilement changer cette situation. Par conséquent, même si aujourd'hui cela ne pose pas encore de problèmes majeurs, la diversification des activités va permettre d'éviter une situation problématique à l'avenir. Aujourd'hui, les conséquences d'un manque de neige sont encore difficiles à gérer, mais d'ici une période de 3 à 7 ans, la station sera capable de faire face à cette situation.*

#### Résilience : mesures de lutte et d'adaptation ?

8. L'enneigement artificiel s'est beaucoup développé ces dernières années, selon vous est-ce une mesure suffisante et durable ? Avez-vous déjà pris d'autres mesures pour garantir l'enneigement ? Si oui, lesquelles sont-elles efficaces ? (usine à neige, stockage en été)

*Pour Sergei Aschwanden, il ne faut pas développer davantage la neige artificielle car c'est repousser le problème plus loin. La neige de culture est une transition qui permet d'investir dans des infrastructures pour pouvoir travailler sur la diversification des activités. Le stockage de neige représente beaucoup d'énergie et beaucoup d'investissements pour un résultat minime et cela ne permet pas de résoudre le problème de fonds. Soit le changement climatique s'accroît et on ne pourra plus skier dans le Préalpes, soit des mesures d'atténuation permettront de limiter le réchauffement et dans ce cas la neige artificielle sera un complément intéressant.*

9. Est-ce que des mesures/stratégies d'adaptation ont été prises à l'échelle de la station, de domaines d'activités, de groupes d'acteurs ? (diversification des activités et des débouchés en cas de manque de neige) Y a-t-il des discussions en la matière ?

*Il y a des discussions régulièrement lors des séances de comité des offices du tourisme depuis au moins 6 ans. Des applications concrètes sont par exemple la construction du centre de wellness et l'aménagement du lac de Frenze. Toutefois, on parle d'investissements à plusieurs millions de francs et comme la commune ne possède pas ce budget, il faut une planification sur le long terme et des finances saines. La stratégie « Alpes vaudoises 2020 » établie par le canton de Vaud permet de débloquer des fonds pour développer le tourisme 4 saisons. Compte tenu de ces mesures, Sergei Aschwanden voit l'avenir des Alpes vaudoises et de la station de Villars plutôt de manière positive.*

Risque de pénurie de la ressource: que faire sans neige ?

10. Si l'enneigement devait ne plus être assuré en hiver, comment envisagez-vous l'avenir de la station ? La station reste/restera-t-elle attractive pour les touristes ? Si oui comment ?

*Au vu de l'évolution actuelle, ce scénario risque de devenir réel, comme il n'y a de changements au niveau global pour limiter le changement climatique. Toutefois, la station devrait garder une certaine attractivité car le problème du réchauffement amènera également des opportunités, comme la recherche de fraîcheur en montagne pendant les étés caniculaires. De plus, si il n'y a plus de neige, les activités possibles en automne le seront aussi en hiver, comme le VTT, le vélo électriques ou la randonnée. Si le manteau neigeux ne permet pas de faire du ski de piste, des activités pourront quand même se développer, comme le ski de randonnée ou la raquette, car elles ne demandent que 15 cm de neige. Donc, il y aura un basculement du chiffre d'affaire, qui sera généré plutôt en été que pendant l'hiver. Par conséquent, le ski deviendra un marché de niche en haute montagne et il faudra réadapter l'offre hivernale pour les stations de moyenne montagne, avec des activités non-skieurs.*