

PROJET DE MASTER EN ENTREPRISE

30 JUIN 2011

Les précipitations et les dangers naturels en Suisse ont-ils subi un changement significatif durant les 150 dernières années ?

Auteur :
Eulalie SAUTHIER

Superviseur EPFL :
Christophe ANCEY
Superviseurs Entreprise
Pascal ORNSTEIN, CREALP
Eric BARDOU, CREALP



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE



Centre de recherche sur l'environnement alpin
Zentrum für alpine Umweltforschung
Research center on alpine environment

Table des matières

1	Résumé - Abstract	3
2	Introduction	4
3	Analyse en Composantes Principales	5
3.1	Rappel de l'analyse en composantes principales	5
3.2	Données des pluviomètres	5
3.2.1	Données suisses	6
3.2.2	Données du Val d'Aoste	6
3.3	Cercle de corrélation	6
3.3.1	Corrélation des stations valaisannes	7
3.3.2	Corrélation des stations tessinoises	8
3.3.3	Corrélation des stations de Suisse centrale Ouest	8
3.3.4	Corrélation des stations romandes	9
3.3.5	Corrélation des stations grisonnes	10
3.3.6	Corrélation des précipitations des stations du Val d'Aoste	11
3.4	Tendances annuelles sur la Suisse	13
3.5	Tendances saisonnières sur la Suisse	14
3.5.1	Printemps	14
3.5.2	Été	15
3.5.3	Automne	15
3.5.4	Hiver	16
4	Comparaison avec d'autres modèles de données	17
4.1	North Atlantic Oscillation	17
4.2	Glissements et inondations : mise en perspective	19
4.2.1	Glissements de terrain	19
4.2.2	Crues et inondations	19
4.2.3	Relation avec les tendances de précipitations	19
4.3	Piézomètres valaisans	20
4.3.1	Corrélation des piézomètres	22
4.3.2	Tendances des piézomètres	22
5	Analyses de longues séries de précipitations en Suisse	25
5.1	Traitements des données préalables	25
5.2	Relation entre les précipitations et le retrait des glaciers	26
5.3	Tendances des glaciers et des piézomètres	29
5.4	Prévisions des tendances futures	31
5.4.1	Méthode Peak Over Threshold	31
5.4.2	Stationnarité des valeurs extrêmes	31
5.4.3	Application des prévisions	32
6	Théorie des valeurs extrêmes appliquée sur les précipitations en Suisse pour des séries longue-durée 1864-2011	34
6.1	Introduction	34
6.2	Données	34
6.3	Théorie des valeurs extrêmes appliquée sur les précipitations	35
6.3.1	Théorie des valeurs extrêmes	35
6.3.2	Obtention des GEV paramètres	36
6.4	Interpolation sur la Suisse	37

6.5	Résultats de l'interpolation	37
6.6	Validation des stations	39
7	Conclusion	41
8	Remerciements	43
9	Bibliographie	44
10	Annexes	47
A	Annexes de la partie 3 et 4	47
A.1	Stations utilisées	47
A.2	Hyétoqramme des données brutes pour chaque zone de l'ACP	48
A.3	Abréviations des stations suisses	50
A.4	Stationnarité des données	52
A.5	Corrélations des zones par saison	52
A.6	Tendances saisonnières des piézomètres	58
B	Annexes de la partie 5	60
B.1	Stationnarité des précipitations	60
B.2	Stationnarité des températures	60
B.3	Distribution des précipitations extrêmes	60
B.4	Relation précipitations/retrait glaciers	62
B.5	Corrélation des précipitations et des glaciers avec un décalage temporel	62
B.6	Corrélation des précipitations et des glaciers selon le test de Mann-Kendall	63
B.7	Piézomètres valaisans versus retrait du glacier, sans décalage	63
B.8	Stationnarité du retrait des glaciers	64
C	Annexes de la partie 6	64
C.1	Stationnarité des précipitations	64
C.2	Graphe de niveau retour des stations suisses	64
C.3	Graphe de niveau retour des quatre stations	64
C.4	Codes R	64

1 Résumé - Abstract

Dans une société préoccupée par le changement climatique, ce projet cherche à montrer si les influences des variations de précipitations des deux derniers siècles sont significatives ainsi que les dangers naturels qui en découlent. Dans un premier temps, les courbes de tendances météorologiques et piézométriques dans la vallée du Rhône sont actualisées, puis comparées à d'autres courbes de précipitations en Suisse dans cinq régions principales. Une analyse avec des données italiennes du Val d'Aoste est menée, ainsi qu'avec les valeurs de l'indicateur de l'oscillation nord atlantique, des piézomètres valaisans, les réactivations du glissement de terrain des Peillettes (VS) et les différentes crues qui ont eu lieu.

Ensuite, des séries de données plus longues (1864-2011) sont traitées afin d'analyser les tendances probables. Ces séries de précipitations sont comparées avec le retrait des glaciers dans le but d'en retirer une relation probable. Un modèle de prévision est utilisé afin de voir vers quoi tendent les données.

Pour finir, la théorie des valeurs extrêmes est appliquée sur un jeu de précipitations basé sur 209 stations de Suisse avec pour objectif de tracer la carte de niveau de retour d'événements extrêmes sur tout le pays. Une validation du modèle donne les erreurs d'interprétation localement.

In a society worried by the climate change, this project will try to show if the influence of the rainfall variations are significant, over the last two centuries, and try to detect natural disasters deriving from these changes. The goal of this project is first to update the meteorological and piezometric trends in the Rhone valley and then to compare them to other trends in five different regions of Switzerland. An analysis between the north Italian trends will be done and with the North Atlantic Oscillation, the valaisan piezometers, the landslide of the Peillettes (VS) and the different floods.

Then long-term series of precipitations (1864-2011) will try to show potential trends. These trends will be compared to the evolution of the glaciers to find a possible relation. A forecast model will be used to observe previsions.

To conclude this analysis, generalized extreme values theory based on 209 stations will be interpolated to fill the grid of Switzerland and to plot the return level map based on the time return of extreme events. A validation of this model will give the model weaknesses.

2 Introduction

L'eau est un élément vital pour l'homme et également un des ses pires ennemis lorsqu'elle se transforme en événement extrême, qu'il y en ait trop ou trop peu. De nos jours, le changement climatique est très médiatisé et présent dans toutes les consciences. L'orientation de ce projet est d'analyser différents jeux de données de précipitations de Suisse pour mettre en évidence des tendances, (selon la disponibilité des données) afin de mieux connaître l'environnement qui nous entoure et être en mesure de se protéger contre les crues, car elles figurent parmi les plus grands risques en Suisse selon [Confédération, 1995] .

Le climat suisse est très particulier car il est influencé par la proximité de l'Atlantique qui envoie son air humide et tempéré vers les Alpes par l'intermédiaire de courants d'ouest dominants selon [MeteoSuisse, 2007]. Cette position permet de recevoir assez de précipitations, d'adoucir l'hiver tout en rafraîchissant l'été. De plus, la chaîne des Alpes fait barrière entre le nord et le sud, et est responsable des hivers plus doux dans le sud du pays, influencés par la Méditerranée. Cependant, cette séparation n'est pas suffisante pour décrire le climat en Suisse, car chaque vallée alpine abrite son propre micro-climat. Les vallées peuvent subir moins de précipitations qu'en plaine car celles-ci sont stoppées par les montagnes qui les entourent, le Tessin et l'Engadine en sont un exemple parfait. Selon [MeteoSuisse, 2007], les Préalpes reçoivent 2000 mm/an contre 500 mm/an en Valais et d'une manière générale hors du canton du Valais les précipitations en été sont deux fois plus importantes que les précipitations hivernales selon [MeteoSuisse, 2007].

La première étape de ce projet est d'actualiser les courbes de tendances météorologiques et piézométriques de la vallée du Rhône, obtenues par Analyse en Composantes Principales, avec un contexte temporel élargi. En effet, en 1999, le CREALP avait mis en évidence une alternance cyclique de périodes sèches et humides ainsi qu'un décalage entre les valeurs des pluviomètres et du niveau de la nappe phréatique. Ce rapport ([CREALP, 2005]) postulait en faveur d'événements météorologiques extrêmes pouvant être prédits suivant l'humidité de la période durant laquelle ils se produisent. Sur cette base, les données ont été actualisées et comparées à d'autres régions de Suisse extérieures au Valais - cinq principales régions- ainsi qu'au Val d'Aoste, en Italie. Ces précipitations seront ensuite mises en relation avec les valeurs de l'indicateur de l'oscillation nord atlantique, les glissements de terrain et les événements extrêmes des dernières années, comme les crues et les inondations.

Ensuite, des séries de données plus longues (1864-2011) seront traitées afin d'analyser des tendances potentielles. Puis ces séries seront comparées avec les mouvements des glaciers afin de trouver un possible décalage entre eux. Un modèle de prévision sur ces données sera établi.

Pour finir, une analyse des valeurs extrêmes sur un jeu de précipitations basé sur 209 stations de Suisse aura pour intention de tracer la carte de temps de retour d'événements extrêmes sur tout le pays. Une validation du modèle d'interpolation indiquera les zones moins bien représentées. En effet, l'enjeu des événements extrêmes est majeur car ces modifications de tendances peuvent avoir des impacts importants sur l'économie, la société et les écosystèmes.

3 Analyse en Composantes Principales

3.1 Rappel de l'analyse en composantes principales

L'Analyse en Composantes Principales, ci-après (ACP), est une méthode factorielle de statistiques multivariées qui permet d'étudier des jeux de données importants (en les triant par éléments observés) et de les visualiser graphiquement. La principale manipulation transforme un jeu de variables corrélées - un nuage de points - en un nouveau jeu de variables indépendantes, les composantes principales, indicateurs des axes principaux du nuage d'une distribution normale multidimensionnelle. Cette technique permet de réduire le nombre de dimensions par projection dans un sous-espace sur des axes choisis (les axes factoriels), de faire ressortir le comportement temporel et spatial des données et relever les liaisons existantes entre les individus et les variables. Pratiquement, cela revient à trouver les vecteurs propres de la matrice de corrélation centrée réduite.

Le logiciel libre R a été utilisé pour procéder à l'ACP des données pluviométriques. R possède de nombreux packages et fonctions utiles. Le package *stats* a été utilisé pour ce projet. Il retourne les résultats de l'ACP sous une forme de matrice contenant différents paramètres dont une variable moyenne et standard, des valeurs singulières, des *loadings* ainsi que des *sample scores*.

L'objectif de l'ACP dans ce projet se formule en deux temps. Deux graphes seront produits à partir de cette méthode : le cercle de corrélation et un graphe des tendances cumulées (sample scores).

Le premier graphe représente un cercle de corrélation, permettant de régionaliser les zones des pluviomètres, afin de trouver des tendances et des groupes de stations au comportement semblable. Le cercle de corrélation permet de projeter sur deux dimensions (les deux principaux facteurs), les variables obtenues sur les deux premiers axes. L'inertie des axes est l'explication du sens des facteurs, car la variable est représentée par une flèche sur le graphe et plus la variable est proche d'un axe, plus elle contribue à sa définition. De plus, lorsqu'une variable est proche du bord du cercle, cela signifie qu'elle caractérise bien la variable correspondante. Si elle est proche du centre, ses propriétés ne sont que peu mises en évidence par le cercle de corrélation et ne donne donc que peu d'information sur la corrélation. Par contre, lorsque deux variables sont proches l'une de l'autre et qu'elles sont proches du bord du cercle, alors cela indique une forte corrélation positive entre elles. Aussi, lorsque deux variables sont proches du cercle mais opposées entre elles, cela indique une forte corrélation négative entre elles. Si une variable est seule, proche du cercle de corrélation, cela indique une corrélation largement supérieure à la moyenne dans la relation entre la variable et la composante principale. Le cercle de corrélation peut avoir plusieurs formes visuelles : en effet, une rotation autour d'un des deux axes ou des deux axes est équivalente.

Le second graphique permet de produire une courbe de tendance avec les valeurs cumulées des scores sur les composantes principales (ou axes), PC1 et PC2. Celles-ci, obtenus en multipliant les valeurs propres et les vecteurs propres, mettent en évidence des tendances climatiques saisonnières ou annuelles en raison de leur forte variabilité. La tendance de chaque courbe dépend de la période d'observation et de ce fait certaines années peuvent être sèches et avoir des sous-périodes humides.

Les graphes produits sont analysés dans les chapitres ci-dessous.

3.2 Données des pluviomètres

De manière générale, les données peuvent parfois avoir des irrégularités, qui peuvent provenir de la modification du modèle de l'instrument, du déplacement de la station de quelques mètres ou du changement d'altitude. Les variables environnementales de la station varient et

les mesures ne sont plus cohérentes avec le jeu de données collectées jusqu'alors. Pour corriger ces anomalies, l'homogénéisation des données permet de supprimer ces défauts de mesure selon [M. Begert, 1995]. Les stations utilisées ici ont été rectifiées et leurs données brutes sous forme de hyétogramme sont dans l'annexe selon A.4.

3.2.1 Données suisses

Les valeurs des pluviomètres utilisées pour la première partie de ce projet ont été tirées de l'outil Climap, mis à disposition du LHE¹ par Météo Suisse.

Cinq zones de Suisse ont été choisies pour mener à bien l'analyse. Ce sont celles représentées sur la carte sur la figure 1. Les abréviations des stations se trouvent en annexes A.3.

Parmi toutes les stations de Suisse, une première sélection a été faite sur la base de l'étude préalable du CREALP ([CREALP, 2005]) pour une fenêtre d'analyse, fixée entre 1976 et 2010. A partir de cela, certaines stations ont été choisies, listées dans le tableau 5 de l'annexe A.1, tout en gardant un minimum de représentativité de 3 stations par zone. Cela a conduit à laisser de côté la Suisse centrale Est, qui n'avait que 1 à 2 stations utilisables.

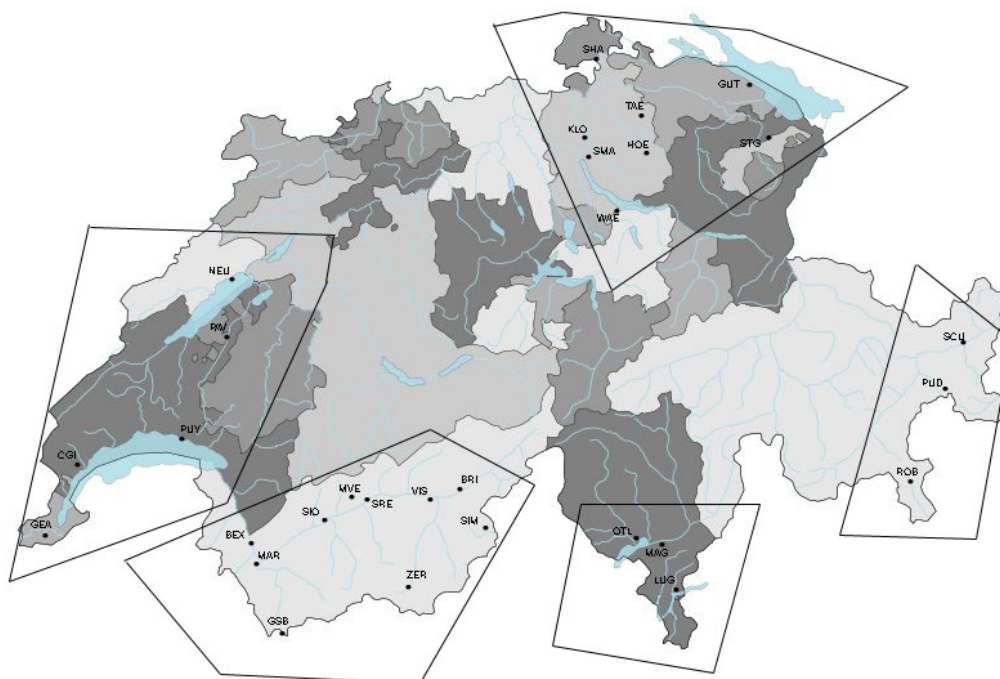


FIGURE 1 – Six principales zones choisies pour l'actualisation de l'étude du CREALP ([CREALP, 2005])

3.2.2 Données du Val d'Aoste

Une zone hors de Suisse a été ajoutée, le Val d'Aoste, particulièrement intéressant par sa proximité de la Suisse. Les stations suivantes ont été choisies (figure 3).

3.3 Cercle de corrélation

Pour chacune des zones choisies, une analyse de corrélation de leurs stations respectives a été menée. Les figures représentant les cercles de corrélation saisonniers se trouvent dans l'annexe A.5.

1. Laboratoire d'hydraulique environnementale



FIGURE 2 – Localisation du Val d'Aoste

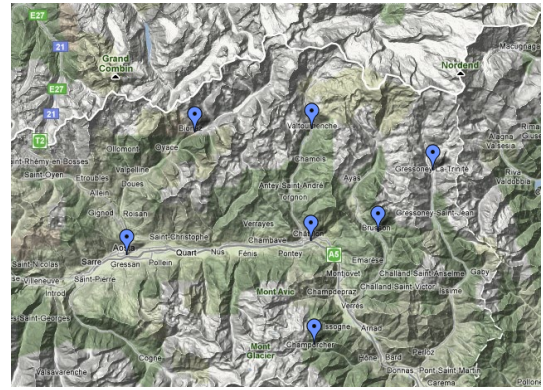


FIGURE 3 – Stations utilisées du Val d'Aoste

3.3.1 Corrélation des stations valaisannes

Le cercle de corrélation représentant les 10 stations valaisannes fait ressortir principalement 3 groupes de stations (figure 4).

Le premier est le groupe comprenant les stations de Martigny, Montana, Bex, Sierre et Sion. Elles sont réunies, et entre elles, et au bord du cercle, ce qui indique une forte corrélation entre elles. Par rapport à l'axe PC1, qui peut être interprété ici comme la mesure des précipitations, elles sont proches, ce qui indique qu'elles ont un comportement semblable dans la quantité de précipitations. Par rapport à l'axe PC2, elles sont aussi rapprochées. On peut interpréter ce second axe comme la proximité géographique de la tendance donnée par les variables. Toutes ces stations sont à l'entrée de la vallée du Rhône, en plaine et se comportent de manière très semblable. On peut donc établir un premier groupe de stations jusqu'à Sierre, soient les stations romandes.

Le second groupe est la réunion des stations de Brigue, Visp et Zermatt. Ces stations sont moins rapprochées entre elles, même si les flèches représentant Brigue et Visp sont très proches, et tout de même à proximité du bord du cercle de corrélation. Elles ont donc une corrélation entre elles forte, cependant moins que pour le groupe 1. De plus, leur corrélation sur la quantité de précipitations est proche malgré l'éloignement spatial donné sur l'axe F2, entre le groupe Visp-Brigue et Zermatt. Cela est logique car géographiquement Brig et Visp sont proches mais Zermatt est à une altitude supérieure dans la vallée. Cela indique que cette portion de la vallée du Rhône a des comportements très similaires.

Le troisième groupe comprend le Grand-Saint-Bernard (ci-après GSB) et le Simplon qui sont toutes les deux éloignées des autres stations. Pour le cas du Simplon, la station est à côté du bord du cercle de corrélation, mais seule, ce qui signifie qu'elle est très largement supérieure à la moyenne, par rapport à PC2. Pour le GSB, le fait que la station soit très proche de l'axe PC1 et que la variable soit seule indique qu'elle participe fortement à la composante principale PC1. Sur la composante PC2, elles sont géographiquement éloignées entre elles. On note également que le GSB est plus proche du groupe 2 que du comportement du Simplon.

Les cercles de corrélation représentant les stations valaisannes saisonnièrement (figures 34(a), 34(b), 34(c) et 34(c) de l'annexe A.5) montrent que peu importe la saison, le Simplon est toujours isolé. Le groupe de stations Brig, Visp et Zermatt est toujours proche entre elles, même si leur corrélation varie un peu. La station du GSB est toujours proche de l'axe PC1 et avec une corrélation variable vis-à-vis du groupe Brig, Visp et Zermatt. Toutes les stations de l'entrée du Valais sont toujours regroupées sur les quatre saisons, parfois avec des sous-rapprochements minimes.

On peut donc en déduire que le comportement des précipitations en plaine a un caractère semblable suivant la localisation et que les stations de haute altitude ne sont pas corrélées avec celles de plaine ni celles de haute altitude. Cela laisse entendre que les comportements des

stations de haute altitude sont complexes. Ces conclusions sont valables pour le Valais et pour ces stations-là.

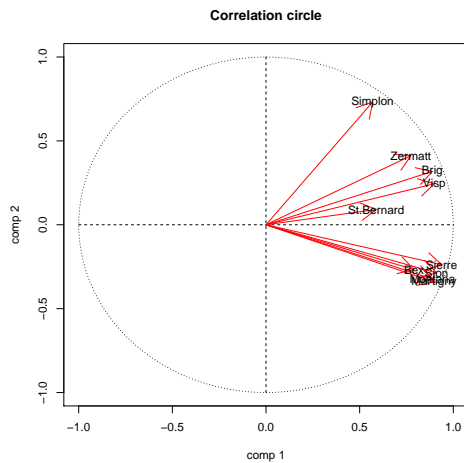


FIGURE 4 – Corrélation des stations valaisannes

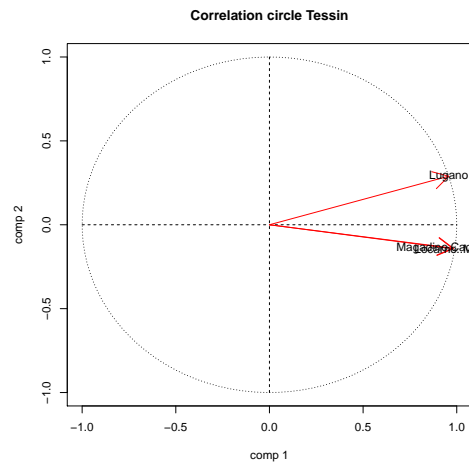


FIGURE 5 – Corrélation des stations tessinoises

3.3.2 Corrélation des stations tessinoises

Concernant les trois stations tessinoises (figure 5), elles se regroupent clairement en deux entités distinctes pour des stations avec une altitude très semblable (entre 203 pour Magadino et 383 pour Locarno, le maximum)

Le premier groupe représente Locarno/Monti et Magadino. Elles ont leurs flèches superposées l'une sur l'autre et proches du cercle, ce qui indique une très forte corrélation entre elles. Par rapport au placement des valeurs de l'ACP, l'axe PC1 pourrait représenter la quantité des précipitations, et il indique que les deux stations subissent un comportement semblable. L'axe PC2 peut indiquer la localisation spatiale, ce qui confirme que les deux stations sont proches l'une de l'autre au bord du lac de Locarno et qu'elles subissent un comportement météorologique presque identique. À l'opposé, le second groupe, qui contient uniquement la station de Lugano, est éloigné des autres stations, ce qui confirme que l'axe PC2 peut expliquer l'éloignement géographique, même si sa situation en bord de lac aurait pu les rapprocher du point de vue climatique. La variable Lugano est très proche du cercle ce qui indique qu'elle est largement supérieure à la moyenne des autres stations.

Le schéma se reproduit lorsque l'on fait une analyse saisonnière (figures 35(e), 35(f), 36(a) et 36(b) de l'annexe A.5). Les groupes de stations au comportement proche ne changent pas, ils sont simplement corrélés plus en été pour se décorrélérer de manière infime en hiver.

On peut donc dire qu'un éloignement spatial marqué influence le comportement des variables sachant que les stations ne subissent plus le même micro-climat local.

3.3.3 Corrélation des stations de Suisse centrale Ouest

Le groupe de stations de Suisse centrale Ouest (ci-après ZWCH) est situé en plaine pour toutes les stations contrairement aux zones valaisannes, tessinoises et grisonnes (figure 6).

On remarque deux groupes principaux : les stations réunies et les stations isolées. Le groupe des stations unies comprend Zurich Kloten, Zurich Fluntern, Aadorf, Wadenswil et Güttingen. Ces stations sont positivement corrélées entre elles et sont proches de l'axe PC1 auquel elles contribuent fortement. Concernant le deuxième axe, elles sont toutes très proches géographiquement dans la réalité et sur PC2, ce qui valide la thèse de l'effet de proximité.

Le second groupe des stations isolées comporte Shaffhausen et St Gall. Ces deux stations ont une corrélation largement différente des autres au vu de leur position isolée sur le cercle mais proche du bord. Pour St-Gall, on pourrait expliquer cet isolement par le fait qu'elle soit derrière une chaîne de montagne par rapport aux autres stations malgré une proximité spatiale, contrairement à Shaffhausen qui est plus éloignée physiquement mais toujours en plaine.

Cependant, une autre hypothèse pourrait expliquer ces comportements : PC2 pourrait aussi représenter l'altitude. En effet, le groupe de stations corrélées a une altitude très proche alors que les stations isolées ont une altitude soit supérieure pour Shaffhausen soit inférieure pour St-Gall. Cela laisserait supposer que pour des stations de plaine non encaissée dans une vallée, l'altitude des stations et leur position spatiale jouent un rôle. Cette relation précipitations/altitude correspond au gradient hypsométrique connu selon [Castellani, 1986]

Au fil des saisons, les corrélations des stations (annexe A.5 dont les figures 37(a), 37(b), 37(c) et 37(d)) restent purement identiques à la situation annuelle, avec St-Gall et Schaffhausen qui entourent le groupe d'autres stations. Les corrélations évoluent un peu mais le schéma reste le même.

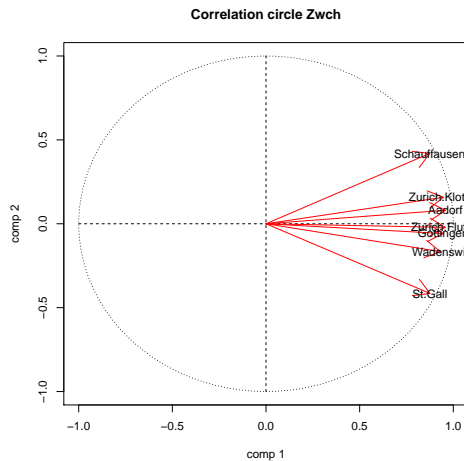


FIGURE 6 – Corrélation des stations de Suisse centrale ouest

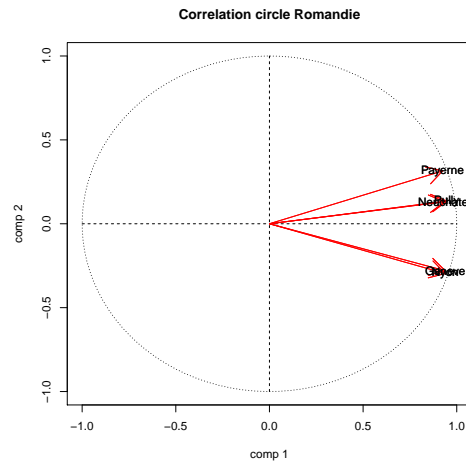


FIGURE 7 – Corrélation des stations sur le Plateau romand

3.3.4 Corrélation des stations romandes

Les cinq stations romandes ont un comportement avec 3 groupes de stations (figure 7).

Le premier groupe contient les stations de Genève et de Nyon fortement corrélées car proches et en bordure de cercle. Elles sont proches sur PC1 au niveau du comportement de précipitations et sur PC2 spatialement. Ce comportement peut être expliqué par leur emplacement en bordure et en bout de lac, en plaine. Le couloir de vent sur le Plateau romand donne généralement un souffle équivalent sur ces deux villes.

Le second groupe, avec les stations de Pully et Neuchâtel proches de l'axe PC1, est fortement corrélé par sa proximité entre elles autant sur l'axe PC1 que PC2, et sa proximité en bord du cercle. Ces deux stations ont une situation semblable au milieu de lac, également sensible au couloir de vent du plateau.

Pour le troisième groupe, la ville de Payerne reste toute seule, également en bord de cercle, plus éloignée sur l'axe PC2 que les deux autres villes, mais quasiment alignée sur l'axe PC1 avec les autres flèches. C'est sa situation géographique qui diffère. En effet, Payerne est en plaine dans une cuvette et subit donc d'autres conditions météorologiques, ce qui explique cette corrélation plus faible.

Cependant, de même que pour les stations de Suisse centrale, PC2 pourrait être représenté par l'altitude. A nouveau, les altitudes sont décroissantes, en passant du groupe 3 au groupe 1. De ce fait, la proposition précédente est renforcée. Les stations du Plateau seraient donc corrélées entre elles en fonction de l'altitude et pas seulement en fonction de leur emplacement.

Les cercles de corrélation des stations romandes durant les différentes saisons (figures 36(c), 36(d), 36(e) et 36(f) de l'annexe A.5) montrent que Nyon et Genève restent corrélées au printemps, en été et en automne et subissent une légère variation de corrélation lors de l'hiver. Pully reste seul contrairement au cercle de corrélation annuel, il s'éloigne de Neuchâtel pour le printemps mais s'en rapproche en été et en automne. En automne, Payerne s'en approche aussi. En hiver, Pully a un comportement plus semblable à Payerne, ce qui est assez étonnant, car Pully devrait subir le réchauffement du Lac. Payerne contrairement aux corrélations annuelles où elle a un comportement isolé, au fil des saisons se rapproche de Neuchâtel et Pully au printemps, automne et hiver. Ici aucune saison n'a vraiment de saison équivalente au point de vue du comportement des stations.

La corrélation entre les stations permet de noter des comportements semblables pour les stations de bordure de lac, avec une situation différente pour les stations de plaine.

3.3.5 Corrélation des stations grisonnes

Les trois stations grisonnes ont un comportement très éloigné les unes des autres, comme on le remarque sur la figure 8.

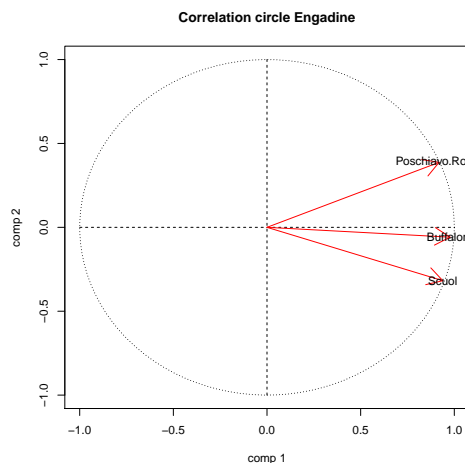


FIGURE 8 – Corrélation des stations d'Engadine

On ne peut même pas parler de groupes car elles ne sont corrélées que faiblement entre elles par le fait qu'elles soient proches du cercle sans être orthogonales. Buffalora est la plus influencée par l'axe PC1. L'axe PC2 influence la localisation et on peut voir qu'elles sont éloignées les unes des autres. En effet, elles sont dans trois régions différentes des Grisons à des altitudes semblables pour deux d'entre elles (1078 m, 1089 m, 1290 m).

Les stations ont une corrélation qui ne change pas lors des différentes saisons (figures 35(a), 35(b), 35(c) et 35(d) dans l'annexe A.1). Eventuellement la corrélation entre Buffalora et Scuiol peut grandir un peu en automne, et celle entre Poschiavo et les deux autres stations diminuer en hiver.

Cela montre que des vallées différentes amènent des climats hétérogènes.

3.3.6 Corrélation des précipitations des stations du Val d'Aoste

Le Val d'Aoste subit une situation de montagne. Deux cercles de corrélation (figures 9 et 10) représentent les données : le premier pour les années 1970 à 2003 qui a de nombreuses stations et l'autre de 1970 à 2007 avec moins de stations, les données n'étant pas toutes disponibles jusqu'en 2010.

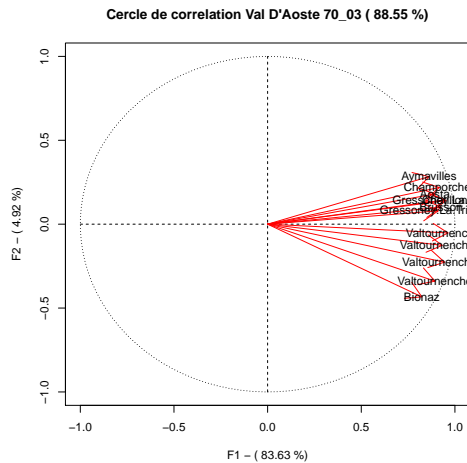


FIGURE 9 – Cercle de corrélation pour les stations du Val d'Aoste

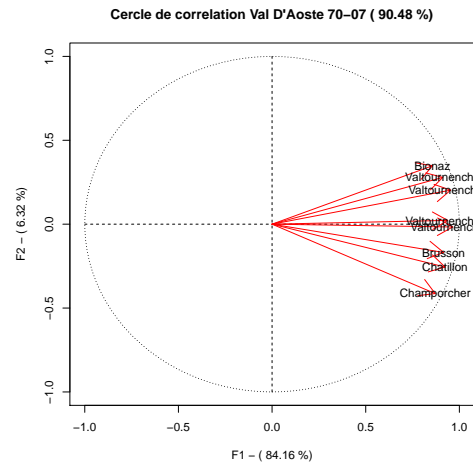


FIGURE 10 – Cercle de corrélation pour les stations du Val d'Aoste

Deux principaux groupes ressortent de la corrélation 1970-2003 sur la figure 9, soit le groupe Aymavilles, Champorcher, Aoste, Gressoney1, Gressoney2, Brusson et Châtillon et le second groupe avec les 4 stations de Valtournenche et celle de Bionaz.

Les groupes 1 et 2 sont assez bien définis et sont positivement corrélés car compacts et proches du cercle. L'axe PC1 peut représenter la quantité de précipitations et l'axe PC2 la localisation spatiale. On voit dans ce cas que les stations sont réparties selon un clivage nord/sud. L'altitude n'a ici aucune influence sur la corrélation.

La seconde corrélation des stations de 1970 à 2007 (figure 10) donne 3 principaux groupes. Le premier groupe identique à celui d'avant avec Bionaz et seulement deux stations de Valtournenche proches du cercle et rapprochées entre elles. Le second groupe est composé de deux stations de Valtournenche qui sont très proches de l'axe PC1 et de ce fait participent à la signification de l'axe. La cause est que ces deux stations sont très proches géographiquement et donc ont un comportement semblable.

Le troisième groupe avec Brusson, Châtillon et Champorcher sont des stations moins proches les unes des autres qu'auparavant mais toujours proches du cercle et sont donc bien corrélées positivement. L'axe PC2 indique à nouveau un clivage nord/sud.

L'analyse des cercles de corrélation des différentes saisons des précipitations du Val d'Aoste sont visibles sur les figures 37(e), 37(f), 38(a) et 38(b) en annexe A.5. On notera que les stations restent corrélées entre elles pour toutes les saisons, avec une corrélation qui peut légèrement changer. Par exemple, en hiver on voit que les stations ont une distribution plus aérée sur les cercles qu'en automne par exemple. L'été et le printemps se ressemblent quasiment : seules les quatre stations de Valtournenche ont une corrélation qui va un peu changer.

Cela indique que les stations font toutes face aux mêmes aléas au même moment, à leur corrélation près.

On remarque donc que l'altitude ne participe pas à la corrélation et est moins visible dans une zone de montagne sur son cercle de corrélation même si la moyenne d'altitude du groupe 1 est plus élevée que celle du groupe 2. On voit cependant que la position par rapport à la vallée participe à cette corrélation et que Valtournenche et Bionnaz sont en fond de vallée

contrairement aux autres stations qui sont en plaine ou à l'entrée des vallées.

Toutes les observations sur les cercles de corrélation permettent de remarquer que les régions géographiquement ou topologiquement semblables ont un comportement qui se ressemble sauf pour le Plateau. Les stations de plaine sont très liées au gradient hypsométrique, les stations de haute altitude ne ressemblent à aucune autre station, les stations de la même vallée sans séparation par d'autres montagnes ont un comportement très proche. Les corrélations sur les saisons montrent que les tendances annuelles sont très souvent conservées sur les graphes saisonniers.

3.4 Tendances annuelles sur la Suisse

Afin de produire des graphes de tendances des précipitations, une superposition des courbes annuelles des six zones mentionnées auparavant a été effectuée. Dans un second temps, les tendances saisonnières ont été produites.

Le graphe des tendances annuelles (11) sur la période 1976-2010 est grossièrement cyclique. On distingue une période plus humide au début du graphique dans les années 1975-1990, puis une diminution de la tendance jusqu'en 1990, avec une période à nouveau humide entre 2000 et 2005 pour finir sur un déficit sur les dernières années. Les six zones représentées par différentes couleurs sont le Valais, la Suisse centrale Ouest, l'Engadine, Le Plateau romand, le Tessin et le Val d'Aoste. Dans la légende, entre parenthèses, figurent les valeurs de régression indiquant la tendance qui domine pour la période visible, c'est-à-dire de 1976 à 2010. De manière générale, même si une tendance cyclique peut être observée, on remarque tout de même qu'individuellement les zones ont des particularités.

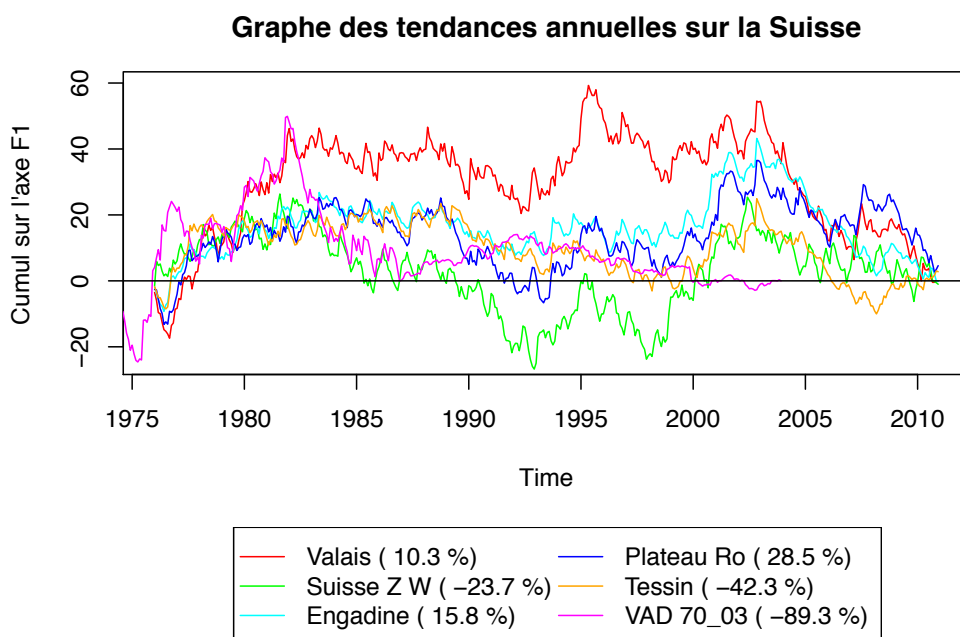


FIGURE 11 – Tendances cumulées annuelles en Suisse de 1976-2010

Le Valais a un comportement qui s'éloigne un peu de la moyenne des stations sur les années centrales, avec cependant un comportement semblable au Plateau romand et à l'Engadine sur les dernières années. La tendance des précipitations est à la hausse avec 10,3 % d'augmentation.

La Suisse centrale Ouest s'éloigne des autres zones entre les années 1990 et 2000 mais est semblable aux autres stations pour le début et la fin de l'analyse. La tendance de Suisse centrale d'Ouest est clairement en déficit de précipitations avec une diminution de 27,3% durant la période observée.

L'Engadine et le Plateau romand restent centrés dans la tendance générale avec une augmentation de respectivement de 15,8% et de 28%. Par endroit, les deux zones ont une courbe presque synchronisée comme au début du graphe (1975-1990) et entre les années 1995 à 2008, ou décalée comme dans les années 1992-1994.

Le Tessin quant à lui, avec une perte de 42,3%, est centré dans la tendance des autres zones. Le Val d'Aoste affiche une grande humidité en début d'analyse pour ensuite diminuer en précipitations petit à petit sans oscillation. Les régions du sud ont été également décrites par [M. Brunetti and Nanni, 2000], [M. Brunetti and F. Monti, 2004], [Lifland, 2007]

et [J. Schmidli and Schär, 2001] qui relèvent un assèchement des ces régions.

On remarque une diminution des précipitations pour les régions de Sud des Alpes sur la période 1976-2010 avec une augmentation pour les régions du Nord des Alpes à l'exception de la région de Nord-Ouest. De manière générale, on notera que les changements à long terme des précipitations ne sont visibles que lentement à cause des importantes fluctuations naturelles. En effet, il est tombé en Suisse, durant les dernières années, la même quantité de pluie annuellement en moyenne. Par contre les jours de pluie ont diminué selon [Nations-Unies, 2007], ce qui peut générer des difficultés pour l'agriculture.

3.5 Tendances saisonnières sur la Suisse

Le graphe 12 représente les tendances cumulées (sample scores) de l'analyse en composantes principales, sur l'axe PC1, pour chacune des saisons. Chaque saison représente trois mois de l'année respectivement : le printemps avec mars, avril et mai, l'été avec juin, juillet et août, l'automne avec septembre, octobre et novembre et enfin l'hiver avec décembre, janvier et février. De manière générale, chaque saison a ses particularités et est analysée ci-après.

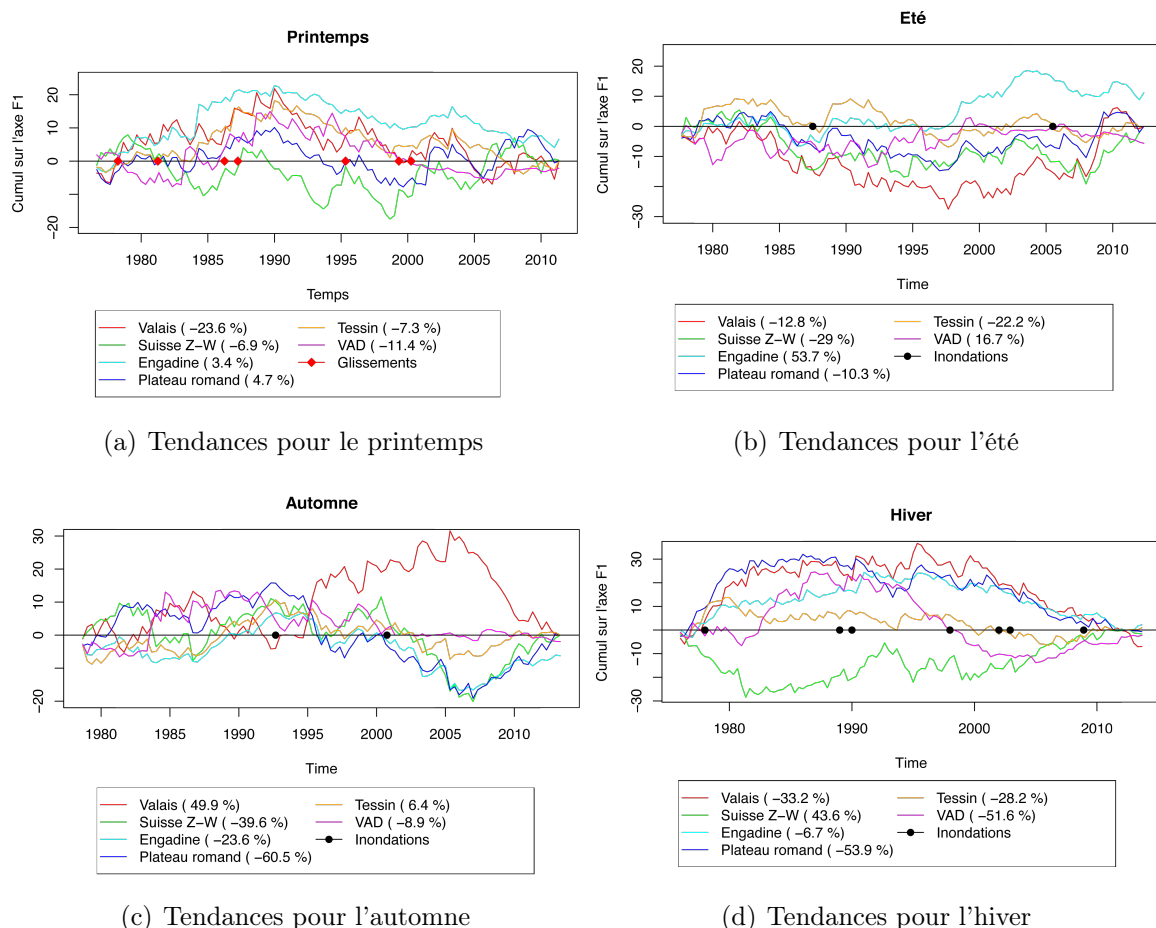


FIGURE 12 – Tendances cumulées annuelles en Suisse de 1976-2010

3.5.1 Printemps

Le premier graphe sur la figure 12(a) représente le printemps. Une tendance générale d'augmentation des précipitations jusqu'en 1990 est suivie d'une diminution plus douce jusqu'en 2010. Les différentes zones sont très semblables mise à part la Suisse centrale Ouest qui subit

des oscillations très marquées tout au long de la période observée. Sur la durée 1976-2010, les précipitations sont en baisse partout sauf en Engadine et sur le Plateau romand, avec le Valais en tête de la diminution. De plus, chaque réactivation du glissement des Peillettes (ronds rouges sur le graphe 12(a)) a eu lieu au printemps sans que l'amplitude de précipitations ne soit significativement modifiée.

Selon [M. Brunetti, 2006] et [Widmann and Schär, 1997], une augmentation des précipitations a bien lieu sur le Plateau romand de 1856 à 2003. Cependant, [M. Brunetti, 2006] annonce également une augmentation en Suisse centrale Ouest de 6% pour 100 ans qui n'a pas lieu ici. L'article [J. Schmidli and Schär, 2001] indique une augmentation au Tessin de 20 à 30% entre les années 1901 et 2003 qui se retrouve également sur le graphe 12(a). Ce même article prévoit un recul de 30% sur le sud des Alpes. Dans la Vallée d'Aoste, la diminution des précipitations sur la période 1976-2019 est de 51.6 %.

3.5.2 Eté

Sur le graphe d'été, la tendance est à la baisse assez distinctement et de manière généralisée jusqu'en 1997 où on assiste à une augmentation faible jusqu'en 2008 puis assez rapide. On ne remarque pas de fluctuations importantes dans la tendance, comme l'ont également relevé [Lifland, 2007], [M. Begert and Kirchhoffer, 2005] et [Schmidli, 2002]. Certaines stations semblent parfaitement synchronisées avec des pics aux mêmes moments, particulièrement le Valais, le Plateau romand sur toute la durée du graphe. D'une manière générale, sur la période 1976-2010, la plupart des zones sont en perte de précipitations sauf l'Engadine et le Val d'Aoste.

La sécheresse de 2003 ne montre pas de signe particulier au niveau des précipitations, ni les tempêtes de 2005. Les précipitations abondantes de 1987 ne ressortent que faiblement sur le graphe, comme celles de 2006.

Selon [Widmann and Schär, 1997], un accroissement des précipitations correspondrait à la situation du Plateau romand et du Tessin. Selon [M. Brunetti, 2006], une tendance négative mais non significative de 4 % dans les Greater Alpine Region, décrirait bien le Valais qui subit une diminution de précipitations de 12.8 %.

3.5.3 Automne

Le graphe concernant l'automne est très intéressant. Il montre des différences de comportement très ciblées et cycliques sur 5 à 15 ans suivant les zones. En effet, une augmentation douce des précipitations jusqu'en 1995 de manière globale suivie d'une diminution assez marquée pour toutes les zones, sauf le Valais qui augmente jusqu'en 2006. Ensuite la tendance s'inverse en 2006 avec une diminution très marquée des précipitations en Valais et une augmentation pour le reste des zones. De manière générale sur la période 1976-2010, seuls le Valais et le Tessin sont en augmentation, ce qu'avance également [Widmann and Schär, 1997]. Selon la littérature, l'augmentation des précipitations du Tessin de 6.4 % ce qui correspond à ce que relève [M. Brunetti, 2006]. Selon [Widmann and Schär, 1997], les précipitations sont en augmentation jusqu'aux années 1990. Le graphe 12(a) de l'automne donne les mêmes résultats.

Aussi, la crue de 1992 est visible sur le graphe 12(c) de l'automne, avec des pics à cette période-là, pour les courbes du Valais et du Tessin. La lave torrentielle de 2000, qui a touché le village de Gondo, est aussi visible.

Les précipitations les plus intenses sont observées sur les versants sud des Alpes suisses, comme au Tessin et dans les régions d'Italie du nord surtout en automne selon [Nations-Unies, 1998]. En effet, les courants d'altitude et une zone de basse pression amènent l'air de Méditerranée, qui est humide et se déverse au passage des Alpes.

Pour résumer, durant la saison automne de 1976-2010, toutes les stations sont en perte sauf le Valais.

3.5.4 Hiver

Le graphe représentant l'hiver est très particulier. On a un effet miroir entre le Plateau romand et le Valais versus la Suisse centrale Ouest, avec au centre les 3 autres zones.

On remarque que les zones Plateau romand et Valais sont très semblables et que leurs courbes sont quasiment synchronisées sur tout le graphe. L'Engadine montre comme ces deux zones une augmentation jusqu'en 2001, pour ensuite diminuer. Au contraire, la Suisse de l'Ouest subit une diminution jusqu'en 1982 avec une lente augmentation jusqu'en 2010. Le Tessin varie très peu. Le Val d'Aoste subit un cycle avec une très forte augmentation entre les années 1982 jusqu'en 1995, pour diminuer jusqu'en 2005 puis augmenter à nouveau. On remarque l'épisode de foehn en 2008 avec une diminution des précipitations. De manière générale, les tendances de toutes les stations diminuent sur la période 1976-2010 sauf la Suisse centrale Ouest avec une augmentation de 43.6 %. Le Plateau romand subit la plus grande augmentation sur cette série 1976-2010, également notée par [M. Brunetti, 2006]. Le Valais subit une diminution des précipitations de 23.6 % qui est également relevée par [J. Schmidli and Schär, 2001], [M. Brunetti, 2006] et [MeteoSuisse, 2007].

Sur le graphe 12(d), on remarque le pic de l'hiver 1985 particulièrement intense et celui de 1977/78 qui amena de la neige à Locarno. On remarque aussi l'hiver bien enneigé de 2008/2009. Sur les dernières années du graphique 12(d), 2003 à 2010, on observe une diminution des précipitations, également relevée par [M. Brunetti, 2006] pour l'année 2003.

De nombreux articles signalent une augmentation des précipitations en hiver entre 10 et 30 % tel que [Widmann and Schär, 1997], [M. Brunetti, 2006], [Lifland, 2007], [J. Schmidli and Schär, 2001], [Nations-Unies, 1998] et [MeteoSuisse, 2007]. La plupart de ces articles utilisent des séries de précipitations jusqu'en 1990. On remarque donc que sur le graphe 12 les précipitations augmentent également d'une même valeur durant cette période-là. Cependant, après les années 90, d'autres tendances s'ajoutent qui influencent le comportement de la tendance globale 1976-2010 ce qui explique la différence au niveau du pourcentage trouvé.

En résumé pour la période 1976-2010, le printemps voit toutes les zones en déficit sauf l'Engadine et le Plateau romand, l'été a toutes les zones en diminution sauf l'Engadine et le Val d'Aoste. L'automne montre toutes les stations avec des pertes sauf le Valais. Pour l'hiver, seule la Suisse centrale Ouest est en augmentation. Cependant, on peut relever que les tendances en hiver et automne sont plus marquées qu'en été ou printemps. Les précipitations croissantes en Engadine et au Tessin sont dues à l'effet de foehn qui fait tomber les précipitations sur le sud des Alpes au passage de la barrière montagnaise.

4 Comparaison avec d'autres modèles de données

Une fois les données pluviométriques analysées, d'autres éléments comme la North Atlantic Oscillation, les laves torrentielles, les crues ainsi que les mesures piézométriques ont été ajoutés à l'analyse.

4.1 North Atlantic Oscillation

La « North Atlantic Oscillation » (ci-après NAO) indique le mode majeur de variations du climat dans l'hémisphère nord. Cet indice est très utile et particulièrement important en hiver, car il exerce un contrôle fort sur le climat de l'hémisphère nord. Pour obtenir cette valeur, on soustrait la pression normalisée au niveau de la mer à Gibraltar ou aux Açores et cette différence donne l'indice NAO.

Si l'indice est positif, alors l'anticyclone des Açores est plus fort ou alors la dépression est plus creusée qu'usuellement et un fort vent arrive d'Atlantique. De plus, l'hiver sera humide et plus doux sur les Alpes. Le temps restera froid et sec durant les autres saisons en Europe du Nord. Le vent, quant à lui, sera décalé au Nord.

Si l'indice est négatif, alors les vents d'Atlantique seront plus faibles et l'anticyclone de Sibérie enverra du froid sur l'Europe du Nord. Le temps sera sec et passablement froid.

Lors d'analyses de précipitations, il est intéressant de connaître la situation anticyclonique à l'endroit des stations à ce moment-là. L'indice NAO a donc été superposé sur les données et les observations précédentes afin de dégager une relation possible. Les données NAO proviennent du site web [Unit, 2009] pour les 2 derniers siècles (figure 13).

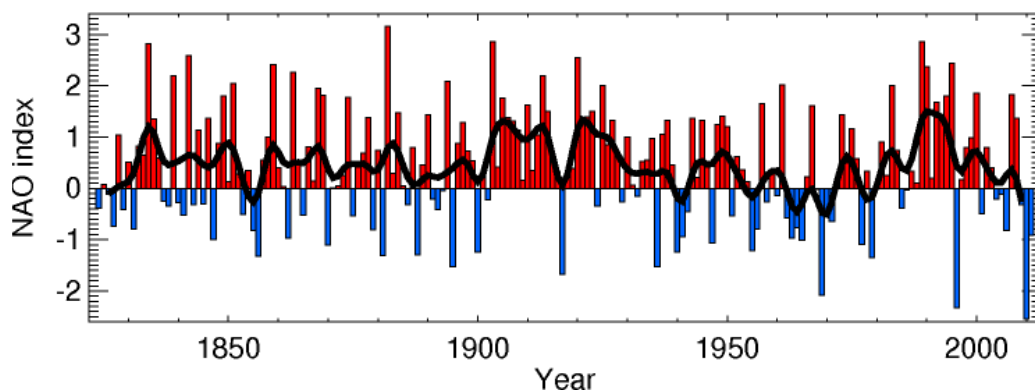


FIGURE 13 – Valeurs des NAO pour les deux derniers siècles

Sur cette base, il est intéressant d'envisager ce que l'on peut tirer de la comparaison entre la valeur de l'indice NAO et les cumuls des scores sur l'axe PC1 des précipitations. Cette comparaison est visible sur l'image 14.

De manière générale, on remarque une légère tendance à un indice négatif lors d'une diminution des précipitations et un indice positif lors de l'augmentation de celles-ci. Afin de savoir si cette tendance est réelle ou si cela découle d'une coïncidence, une étude d'occurrences a été faite (tableau 1).

Tableau 1 – Test d'occurrence sur la relation entre les NAO et les précipitations

	Indice NAO +	Indice NAO -
Augmentation des précipitations	47	42
Diminution des précipitations	65	51

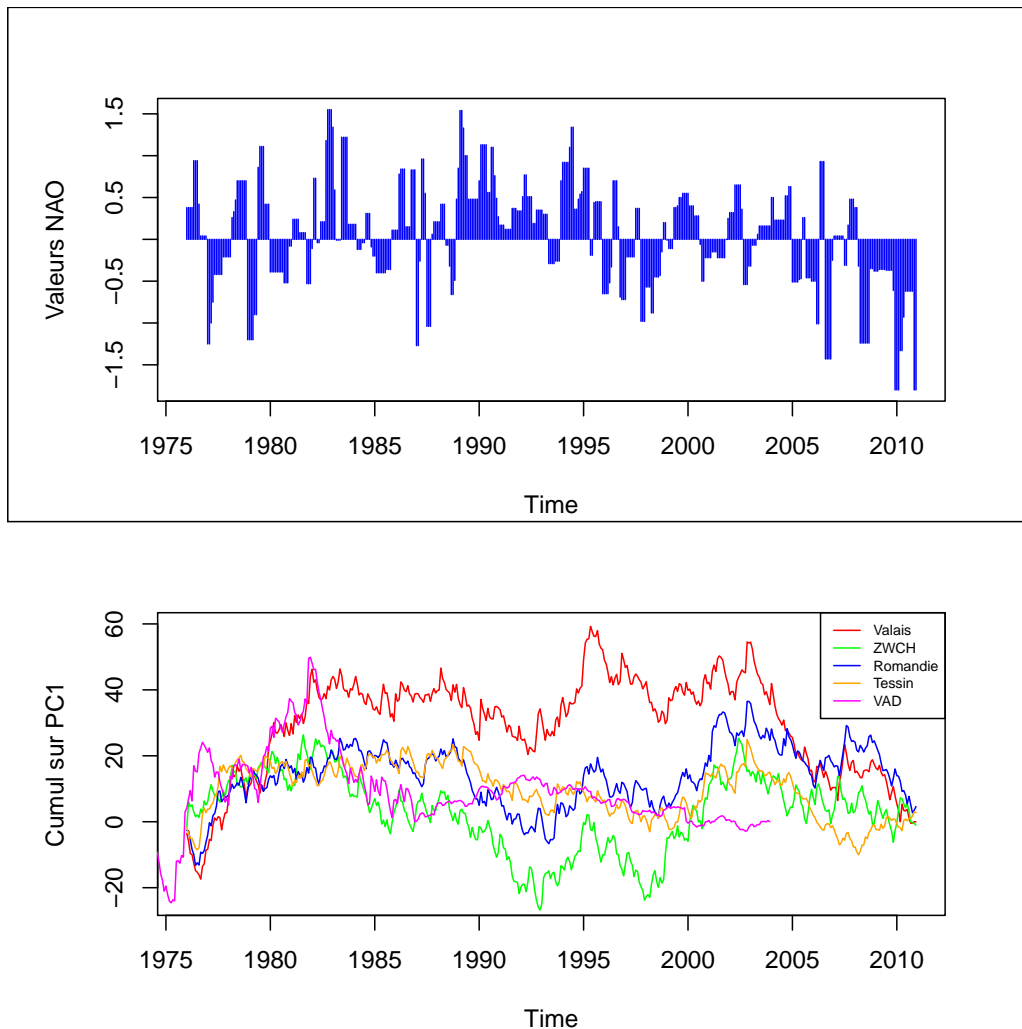


FIGURE 14 – NAO en comparaison avec les cumuls sur F1

A partir de la comparaison dans le tableau 1, on remarque que rien de concret ne peut être formulé, car aucune tendance ne se démarque clairement : une diminution majoritaire des précipitations a lieu, lorsque l'indice est positif. Mais une augmentation a aussi lieu lorsque l'indice est positif. Il est donc pas possible d'expliquer les variations des précipitations avec des indices climatiques généralisés.

Selon [P. Shmocker-Fackel, 2009], en Suisse du nord (sans le Tessin) aucune corrélation ne semble exister entre la fréquence des inondations, les températures et les indices NAO. Il n'y a pas de tendances générales en Europe, mais des similarités selon la région géographique, ce qui semble concorder avec les résultats obtenus sur le tableau 1. Il apparaît également selon [C. Frei, 1995] que les indices NAO ne sont pas corrélés avec les précipitations alpines. Selon [M. Brunetti, 2006] et [J. Schmidli and Schär, 2001], la relation NAO/précipitations semble concorder avec des précipitations du Sud des Alpes mais semble s'identifier moins bien avec la partie Nord.

Selon [C. Frei, 1995], il semblerait que ce soient les modèles de circulation atmosphérique sur une échelle de temps décennale qui soient responsables des changements spatiaux hétérogènes en Suisse et non l'indice NAO.

4.2 Glissements et inondations : mise en perspective

4.2.1 Glissements de terrain

Etant intéressé par les glissements actifs du Valais, dans un but de compréhension d'occurrences d'événements, le CREALP ([CREALP, 2005]) a fourni des données des glissements actifs, et a surveillé le glissement des Peillettes en Valais. Ces données sont dans le tableau 2 et seront superposées aux précipitations sur la figure 15.

Tableau 2 – Réactivation du glissement des Peillettes

Années
1er avril 1978
1er avril 1981
15 avril 1986
15 avril 1987
23 mai 1995
12 mai 1999
30 avril 2000

4.2.2 Crues et inondations

Une recherche bibliographique sur les événements type crues ou inondations en Suisse entre 1976 et 2010 a été menée afin de mettre en avant les principales catastrophes qui ont eu lieu dans le passé. La liste obtenue se trouve dans le tableau 3.

Tableau 3 – Événements retenus pour cette étude

Années	Événement	Localisation	Source
1978			
printemps 1987	Crues	Gr, TI	
juin 1987	Crues	GR, TI	
24/25 août 1987	Crues	UR, VS, TI, GR	
1989	Crues	Suisse	
1990	Crues	Suisse	
22 au 24 sept 1993	Crues	VS, TI	[Confédération, 2008]
1998	Crues		[Confédération, 2006]
mai 1999	Crues	Suisse	
octobre 2000	Crues	VS, TI	[Confédération, 2008]
2002/2003	Crues		[Confédération, 2009a]
2002/2003	Nappes basses	Plateau, TI	[Confédération, 2009a]
19 au 22 août 2005	Crues	ZCH	[Confédération, 2006]
printemps 2007	Sécheresse	TI, Engadine	[Confédération, 2007]
hiver 2008	Vent du sud	nord des Alpes	[Confédération, 2009b]

4.2.3 Relation avec les tendances de précipitations

Sur le graphe 15, on observe la distribution des glissements de terrain, des inondations ou crues en Suisse, ajustée sur les tendances de précipitations des différentes régions. On remarquera qu'une crue est presque toujours présente avec un pic des courbes de tendances sur le

graphe aussi bien annuellement qu'au niveau saisonnier. Mais malheureusement, il est impossible de cerner la distribution de leur occurrence. Cela ne correspond à aucune distribution simple connue, ni même à une loi des valeurs extrêmes.

Concernant les glissements de terrain, il n'apparaît lors d'une réactivation aucun signe visible sur le graphe de tendances des précipitations. Comme aucune tendance claire ne se dégage, mais seulement des événements aléatoires, on conclura donc qu'aucune tendance généralisable des occurrences de ces événements n'a été trouvée.

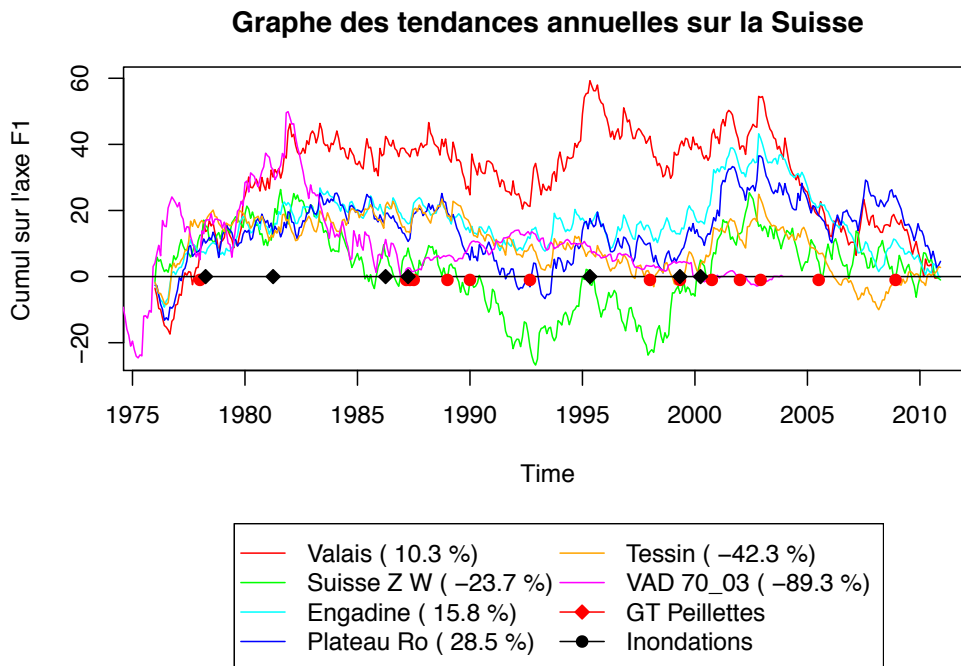


FIGURE 15 – Glissements de terrain et cumuls sur PC1

Par contre, il se pourrait que les épisodes antérieurs de pluie influencent les circonstances de déclenchement. Sur le graphe 16, les tendances des cumuls des scores sur PC1 de l'hiver ont été mis en relation avec les réactivations des Peillettes qui ont eu lieu au printemps suivant.

On remarque que sur sept occurrences de glissements de terrain, cinq ont eu lieu avec un pic qui montre des grosses précipitations, et deux ont eu lieu sans pic. Malheureusement sept événements ne suffisent pas pour avancer une théorie valable.

De plus, une étude [Nations-Unies, 1998] a montré qu'il est difficile de donner une tendance aux crues des siècles passés à cause de leur trop forte variabilité naturelle. Il apparaîtrait également que lors de périodes de transition climatique, les fréquences des crues et des inondations ont tendance à augmenter. Une alternance de cycles de crues entre des périodes calmes et actives a été relevée. La période 1940-1970 étant calme en événements, on remarque que 1970 jusqu'à 2010 est nettement moins calme avec les inondations de 1999, 2000, 2005 et 2007. Selon les variations naturelles, ces aléas devraient encore durer quelques dizaines d'années selon [P. Shmocker-Fackel, 2009]. Cela expliquerait le fait que de nombreux événements aient été dénombrés, mais qu'aucune loi ne justifie ce phénomène.

4.3 Piézomètres valaisans

Lors d'une précédente étude menée par le CREALP [CREALP, 2005], un décalage entre les précipitations et les hauteurs de la nappe semblait avoir été identifié. Lors cette dernière

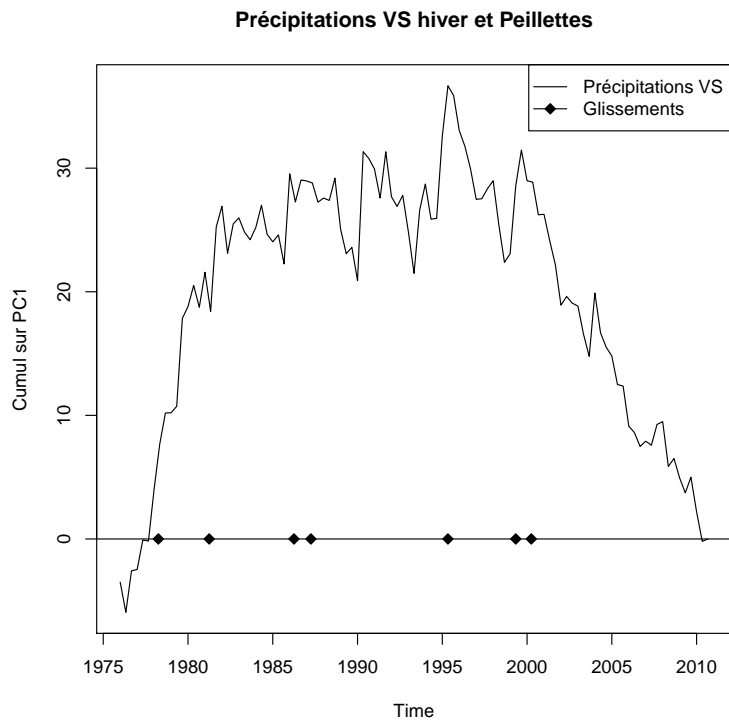


FIGURE 16 – Cumul sur PC1 en hiver et occurrences des glissements de terrain

actualisation, les données des précédentes études ont été réutilisées. Certains piézomètres² le long de la vallée du Rhône ont été sélectionnés (figure 17). Les piézomètres LM2, LM3, LM7, LM8, LM9 sont dans la nappe captive et LM1, LM4, LM5, LM6, LM10 sont dans la nappe libre. Les données brutes sont dans l'annexe 33(b) et 33(c)

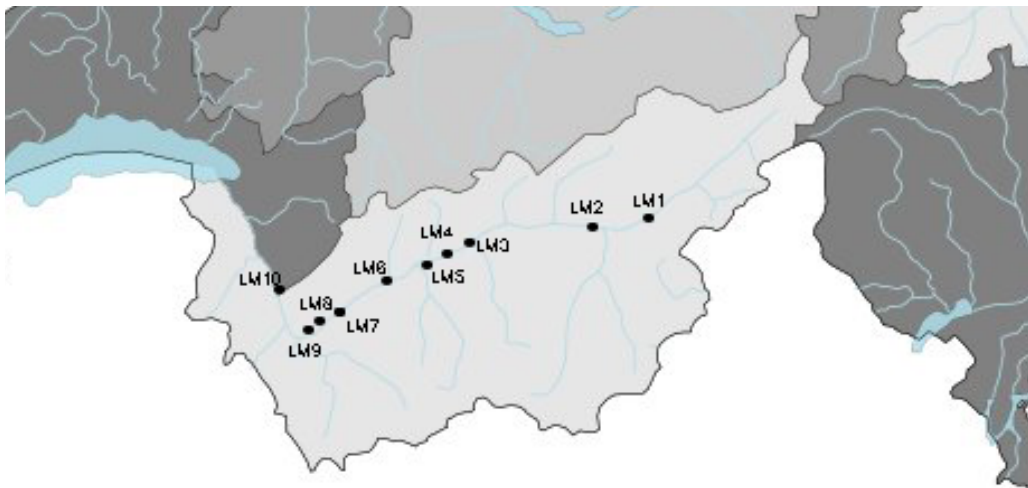


FIGURE 17 – Piézomètres valaisans utilisés

2. Les piézomètres sont des tubes, permettant depuis la surface d'accéder à l'eau d'une nappe phréatique pour en mesurer la hauteur.

4.3.1 Corrélation des piézomètres

Les corrélations des piézomètres sont représentés sur les figures 18 et 19, les stations ayant des valeurs jusqu'en 2009 et celles ayant des valeurs jusqu'en 2010.

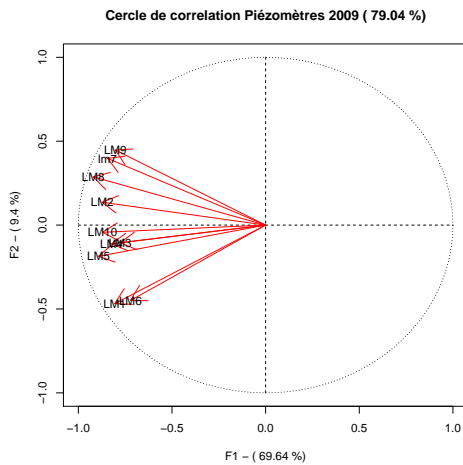


FIGURE 18 – Piézomètres valaisans jusqu'en 2009

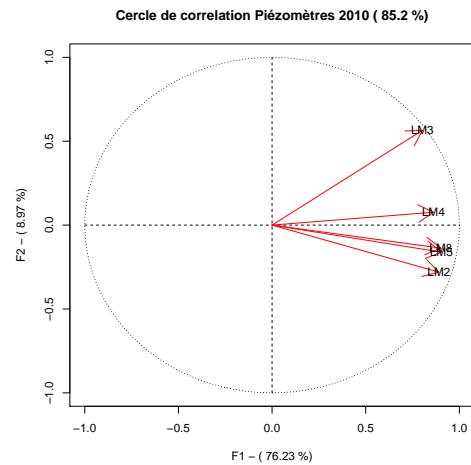


FIGURE 19 – Piézomètres valaisans jusqu'en 2010

Les stations sur la figure 18 sont corrélées en groupe défini. On remarque les piézomètres LM1 et LM6 qui sont corrélés entre eux et le reste des stations qui sont plus ou moins corrélés entre elles. On remarque le groupe de stations LM7, LM8, LM9, la station LM2 un peu moins corrélés et le groupe LM 10, LM 5, LM 3, LM 4 qui correspondent au centre du Valais. A nouveau l'axe PC2 représente la localisation.

Les stations sur la figure 19 sont corrélées mais difficilement regroupables. On voit que la station LM3 ressort du groupe et que les autres sont centrées autour de l'axe PC1. Les stations LM 8 et LM 3 sont très corrélés également.

Les piézomètres de la série de données jusqu'en 2009 ont leurs cercles de corrélations saisonniers sur les figures 38(c), 38(d), 38(e) et 38(f). Les piézomètres LM4, LM5, LM10 restent corrélés sur toutes les saisons avec une légère augmentation de la corrélation au printemps et en hiver. Le piézomètre LM1 est moins corrélé avec les autres stations au printemps, en été et en automne. Le piézomètre LM3 est corrélé avec le groupe de piézomètres LM5, LM4, LM10 sauf au printemps. LM2 varie en hiver et reste stable durant les autres saisons. Le groupe LM 8, LM 9, LM7 est très corrélé sauf au printemps où la corrélation est plus faible et les piézomètres sont plus proches de l'axe PC1. On remarque que les regroupements présents annuellement sont toujours présents mais plus évidents en hiver.

Les piézomètres qui couvrent jusqu'à l'année 2010 seront sur les figures 39(a), 39(b), 39(c) et 39(d). L'été est très semblable à l'automne avec le piézomètre LM3 un peu moins corrélé au reste. Le printemps et l'hiver sont très proches avec un groupe de stations très corrélés.

Les tendances saisonnières (annexe figures 40 et 41) des piézomètres n'ajoutent rien à l'analyse.

4.3.2 Tendances des piézomètres

Les tendances des piézomètres valaisans sont comparables à celles des précipitations du Valais, de période cyclique (figure 20). On remarque les années 2002/2003 avec un niveau de nappe particulièrement bas, qui n'a pas cessé de diminuer depuis.

La courbe des précipitations et celle des piézomètres ont des similarités entre les années 1987 et 1999. Les deux signaux sont décalés d'environ 2 à 3 ans. Cependant on ne peut pas

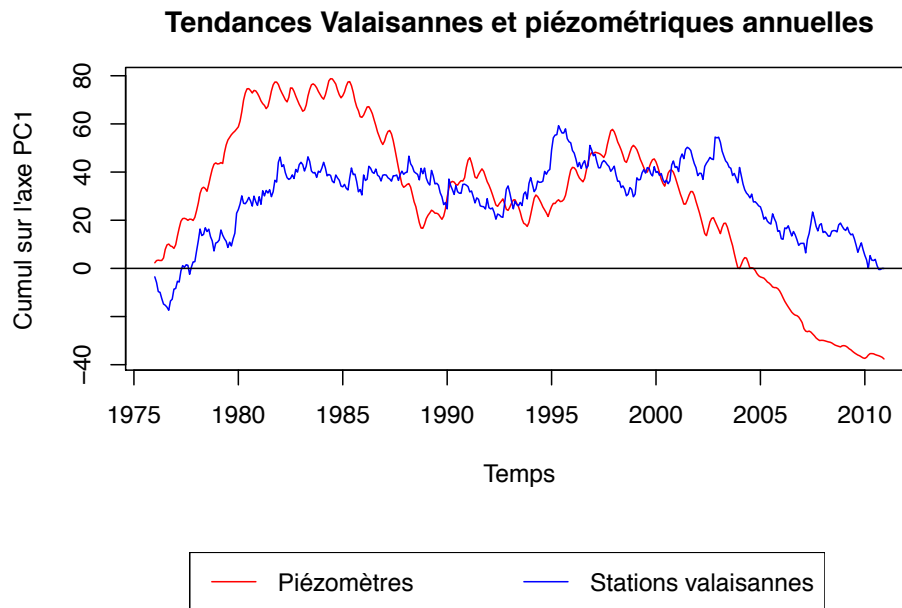


FIGURE 20 – Tendances des piézomètres et des précipitations jusqu'à l'année 2010

parler de tendances généralisables car le reste du graphique n'est pas du tout semblable. De plus, une analyse de corrélation croisée³ a été menée (figure 21). La corrélation maximale entre les deux signaux est au lag 2 avec une valeur de 0.15. Cela voudrait dire qu'un décalage de 2 ans existe entre les deux signaux. Le problème est que cette corrélation est de 0.15 %, ce qui est très faible.

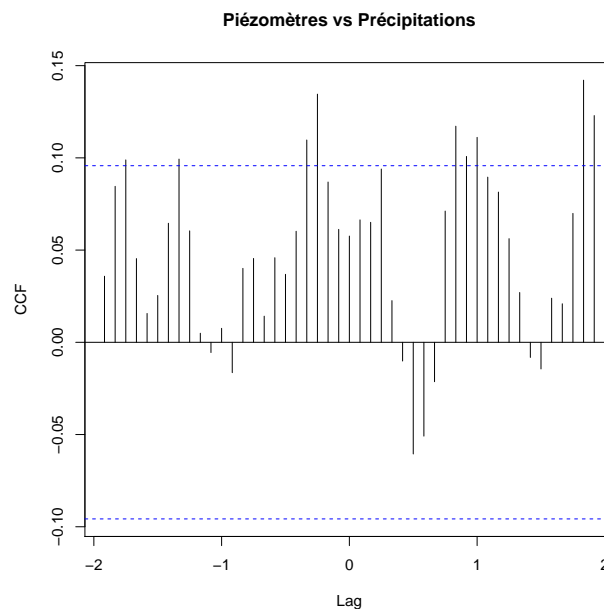


FIGURE 21 – Corrélation croisée entre les courbes de piézomètres et celles des précipitations

L'analyse de la piézométrie permet de montrer que même si des signes peuvent laisser penser qu'une relation existe entre les précipitations et les piézomètres, en réalité le signal est tout de même trop différent pour une telle relation. D'autres causes doivent être en jeu pour retarder

3. Désigne la matrice de covariance de deux vecteurs

l'arrivée d'eau dans la nappe directement, telle qu'un temps de résidence important dans le sol, des drainages qui amènent l'eau dans une autre région et des barrages qui font stagner l'eau à certains endroits.

5 Analyses de longues séries de précipitations en Suisse

Dans une seconde partie, des séries de données plus longues que celles de la première partie, c'est-à-dire dès 1864 jusqu'à 2010, ont été utilisées dans l'objectif d'analyser si des tendances caractéristiques s'y trouvaient. Dans un autre temps, ces données ont été comparées avec le retrait des glaciers dans le but de mettre en avant une quelconque relation. Puis, dans un troisième temps, plusieurs tests ont été menés pour sonder si, d'une manière ou d'une autre, des prévisions pouvaient être tirées de ces informations.

Quatre stations ont été retenues parmi celles qui se trouvent sur le site de MétéoSuisse où les séries à long terme de températures et précipitations en Suisse sont traitées selon [MeteoSuisse, 2007]. Les stations retenues sont encadrées sur la figure 22. Elles ont été choisies car elles existent depuis un laps de temps suffisamment long et qu'elles se trouvent proches de glaciers pour la suite de l'analyse.

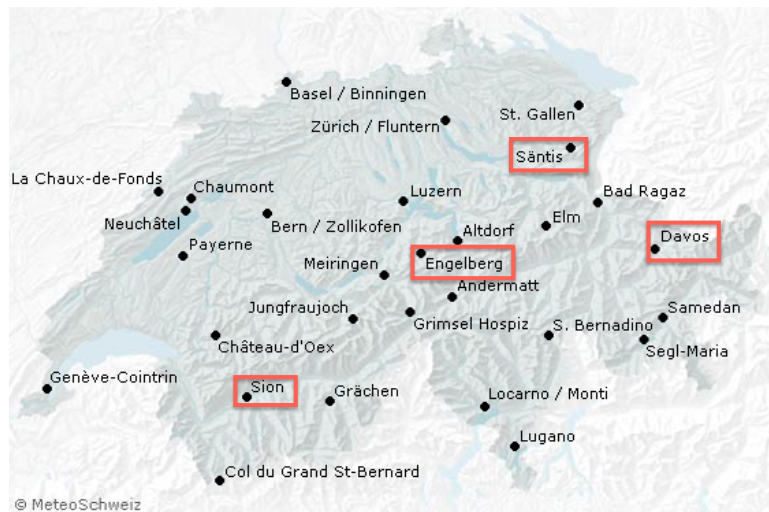


FIGURE 22 – Localisation des quatre stations sélectionnées

5.1 Traitements des données préalables

La figure 23 montre les séries de précipitations sans aucun traitement. On note que les séries sont normales : des variations d'intensité, un jeu continu sauf pour Davos et les premières années au Sântis. Mis à part une cyclicité sur les premières années de données d'Engelberg, on remarque que Sion reçoit moins de pluies que les trois autres stations qui sont plus en altitude. Afin de pouvoir utiliser les stations pour des comparaisons avec d'autres valeurs, il est important de savoir si les données sont stationnaires⁴. Un test de stationnarité est donc mené, ainsi qu'un contrôle des résidus et de l'autocorrélation du signal (annexe B.1). Les quatre stations sont gardées .

A Davos, dès la fin des années 1880 jusqu'aux années 2000, les résidus sont inférieurs à 0. Le cumul a donc été inférieur à la moyenne. La troisième image concernant Davos 42(a) représentant la variation du coefficient d'autocorrélation des résidus indique un demi-cycle de 1 lag ce qui correspond à $\frac{1an}{12mois} = 1an$ par trait, ce qui montre un cycle de 2 ans pour ces données-là. Les lignes bleues indiquent l'intervalle de confiance à 95 %. Un pic indiquant une tendance saisonnière aurait une valeur de 1 au lag 0 : ce n'est pas le cas ici.

A Engelberg, les résidus ont des valeurs supérieures à 0 dans les années 1890 à 1950. On remarque à nouveau une période peu humide à la fin du XIXe siècle. La variation du coefficient

4. La structure du processus sous-jacent supposé évolue ou non avec le temps. Si la structure reste la même, le processus est alors dit stationnaire. [Wikipédia, 2011]

d'autocorrélation indique a nouveau une tendance cyclique de 2 ans.

Au Säntis, la distribution des résidus (figure 43(d) en annexe B.1) indique un manque de précipitations pour le siècle qui a suivi 1880 même si certaines années furent plus humides. Concernant l'autocorrélation des résidus, la tendance est moins claire que pour Davos et Engelberg, avec un pic au lag 1 et 2 sans montrer de cycle précis. Il ne faut pas oublier de mentionner que cette station, se trouvant très en altitude, peut être sensible à différents paramètres techniques extérieurs comme le vent ou le gel et donner des valeurs un peu décalées. Elle va cependant rester dans le groupe des quatre stations car elle est au milieu de glaciers et de ce fait est donc intéressante.

A Sion, sur le graphe des résidus on remarque que la quantité de précipitations diminue dès 1900. Cependant, contrairement à Davos, à la fin des années 1880, un pic de précipitations a lieu. Aussi, dès les années 2000, on retrouve des précipitations supérieures à la moyenne. Les coefficients de corrélation sont à nouveau un peu flous sans cycle apparent et un pic au lag 2.

Comme on le voit sur les figure 42(b), 43(a), 43(c) et 43(f) des annexes B.1, les quatre stations vont pouvoir être gardées et utilisées dans la suite de l'analyse.

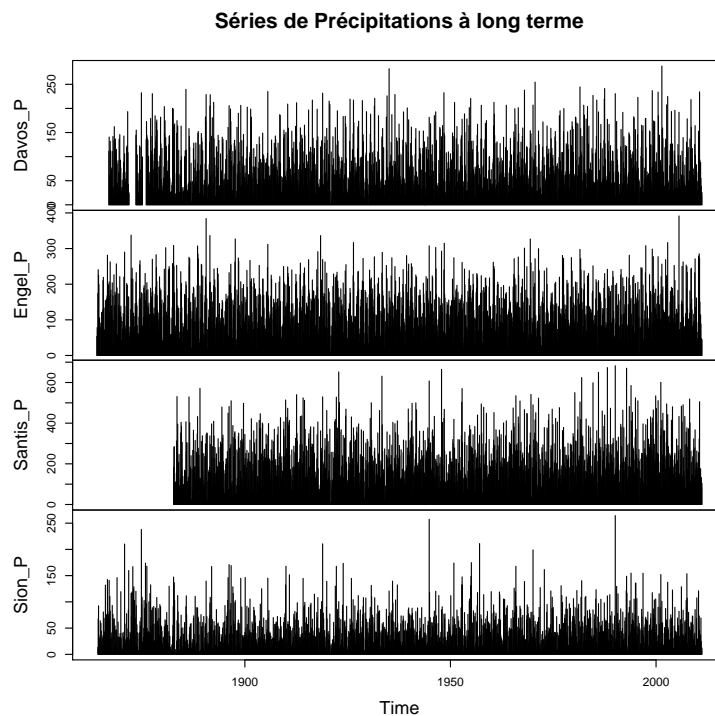


FIGURE 23 – Séries de données de précipitations

5.2 Relation entre les précipitations et le retrait des glaciers

A partir de données testées, une première analyse peut être menée, en mettant en relation les fluctuations de précipitations et l'avancée/retrait des glaciers, afin de voir si une telle relation existe. Autour de chacune des quatre stations un certain nombre de glaciers ont été choisis (table 4). Pour le Valais, il aurait été possible de choisir de nombreux glaciers supplémentaires en amont de la vallée du Rhône, mais seuls les glaciers aux alentours de Sion ont été sélectionnés. Les valeurs du retrait sont données annuellement pour chaque glacier.

Les résultats de la mise en corrélation des stations avec les glaciers donnent des résultats mitigés. Une tendance principale ressort tout de même : une relation entre de fortes précipitations et un avancement du glacier semble exister. Cependant, même si cette théorie semble

Tableau 4 – Glaciers à mettre en relation avec les 4 stations

Stations	Canton	Glaciers alentours choisis
Davos	GR	Verstancлагletscher, Vadret Calderas, Vadret da Porchabella
Davos	GR	Scalettagletscher
Engelberg	OW	Griessenfirn, Firnalpeligletscher
Säntis	GL	Hintersulzfirn, Plattalvagletscher, Glaernischfirn, Limmernfirn
Sion	VS	Zmuttgletscher, Glacier de Zinal, Turtmannletscher
Sion	VS	Schwarzgletscher, Rhonegletscher, Glacier d' Otemma,
Sion	VS	Glacier de Moiry , Langgletscher, Leukerbad,
Sion	VS	Fieschergletscher, Glacier de Ferpêcle, Bas Glacier d' Arolla
Sion	VS	Glacier de Tsijiore Nouve, Glacier de Moming,
Sion	VS	Glacier du Mont Miné, Chaltwassergletscher, Griesgletscher

valide pour certains cas de glaciers, de nombreux glaciers ont subi un retrait au fil des années malgré des précipitations positives.

Pour Davos (figure 24(a) et 24(b)), on compte donc uniquement sept occurrences entre précipitations et avancements du glacier. Au contraire, la tendance de recul des glaciers autour de Davos ne semble pas coïncider avec un comportement spécial des précipitations.

Pour Engelberg, les glaciers semblent synchronisés en 1965 avec un pic d'avancement important (figure 25(a)). Les quelques avancées peuvent être reliées à de fortes précipitations également, mais la tendance n'est pas généralisable. A nouveau, les retraits du glacier ne sont pas reliés à un comportement particulier des précipitations.

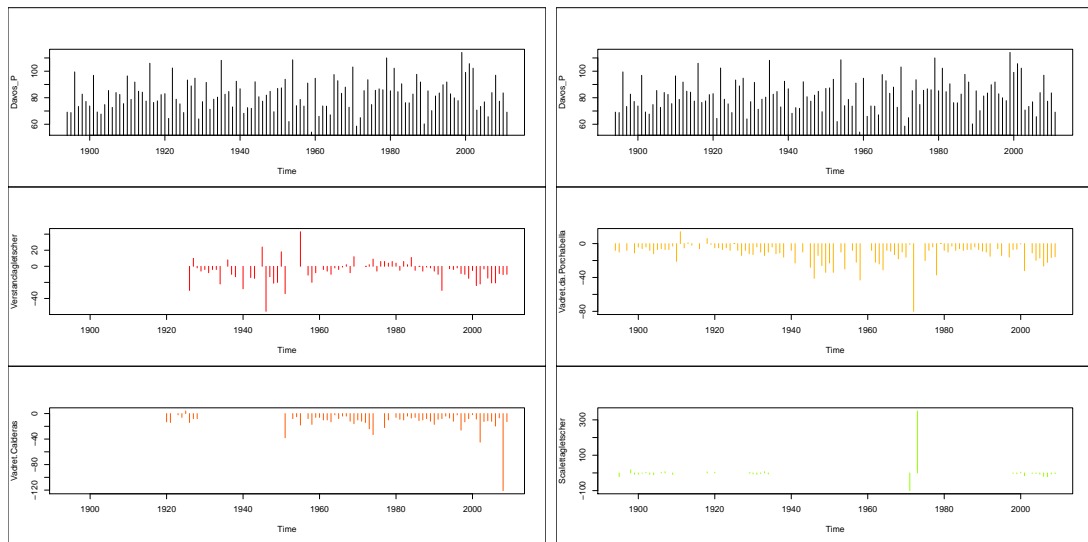
Aux alentours de Säntis, la tendance décrite ci-dessus semble encore moins marquée. Sur la figure 24(d), seules six occurrences d'avancement de glaciers sont visibles. Par contre sur l'image 24(c) de nombreuses occurrences sont présentes, mais encore une fois une mise en relation exhaustive des liens n'est pas possible.

A Sion (figures 24(e) et 24(f)), la tendance est encore moins marquée, car presque aucun glacier n'avance vraiment, ce qui dénonce encore la théorie ci-dessus.

Il semble donc qu'une faible relation pourrait tout de même exister entre certaines précipitations et un avancement de la langue glaciaire grâce à la synchronisation par endroit des valeurs. Cependant, cette tendance n'est de loin pas généralisable et surtout non inversable. En effet, un retrait du glacier ne peut pas être mis en relation avec une baisse de précipitation, comme on a pu le voir sur les figures 24(a), 25(a), 24(c) et 24(e). Afin de voir si une tendance peut être dégagée des valeurs de retrait des glaciers, on a cherché à tirer une régression au milieu des nuages de points des valeurs de retrait de glaciers de la même année. Les figures se trouvent en Annexe B.4 et montrent qu'aucune régression ne peut donner un sens à ces valeurs. En effet, peu importe la quantité de précipitations tombées, les glaciers reculent toujours, ce qui donne une droite de régression horizontale sans tendance au milieu du nuage de points.

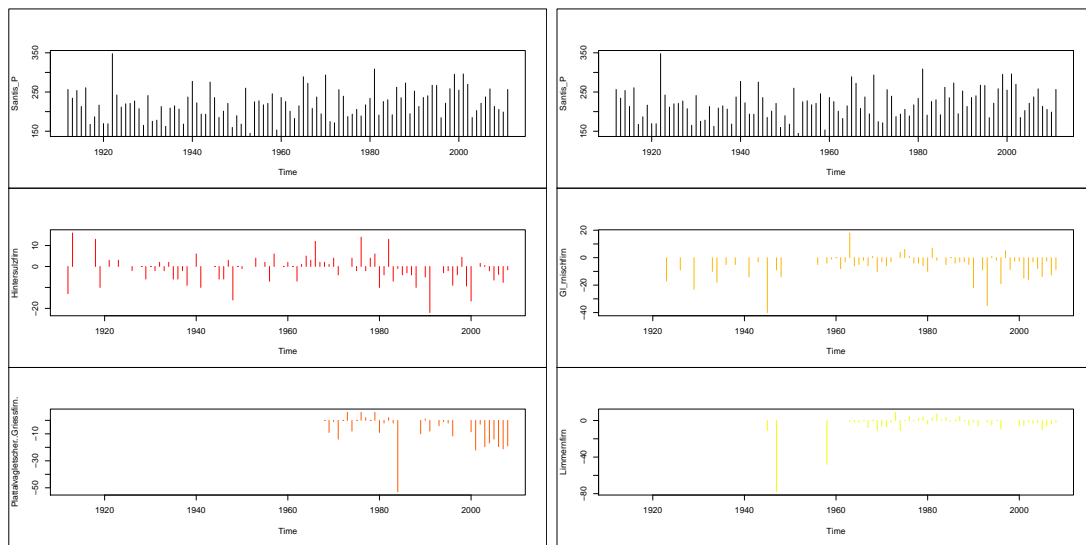
Puis, les mêmes régressions ont été menées avec un décalage de 1 à 3 ans entre les précipitations et les valeurs des glaciers, les graphes sont en annexe B.5. En plus de ces graphes, le test Mann-Kendall a été utilisé pour chercher les corrélations (« tau rank correlation ») entre les deux signaux. Les résultats des coefficients de Mann-Kendall sont en annexe B.6.

Le test de Mann-Kendall est un test qui permet de savoir s'il existe une tendance monotone basée sur la corrélation de deux signaux. Les corrélations proches de 1 indiquent de fortes similarités, alors que des valeurs proches de -1 indiquent un fort désaccord. Une absence d'association est relevée si la corrélation est de 0. On remarque alors que lors d'un décalage de un, deux ou trois ans les régressions sont presque toujours plates. Dès qu'elles prennent une tendance, elles sont très influencées par une valeur extrême. Concernant la corrélation précipitations/glaciers, on ne remarque pas de tendances claires si ce n'est que la corrélation est plus significative avec un décalage de 1 à 2 ans.



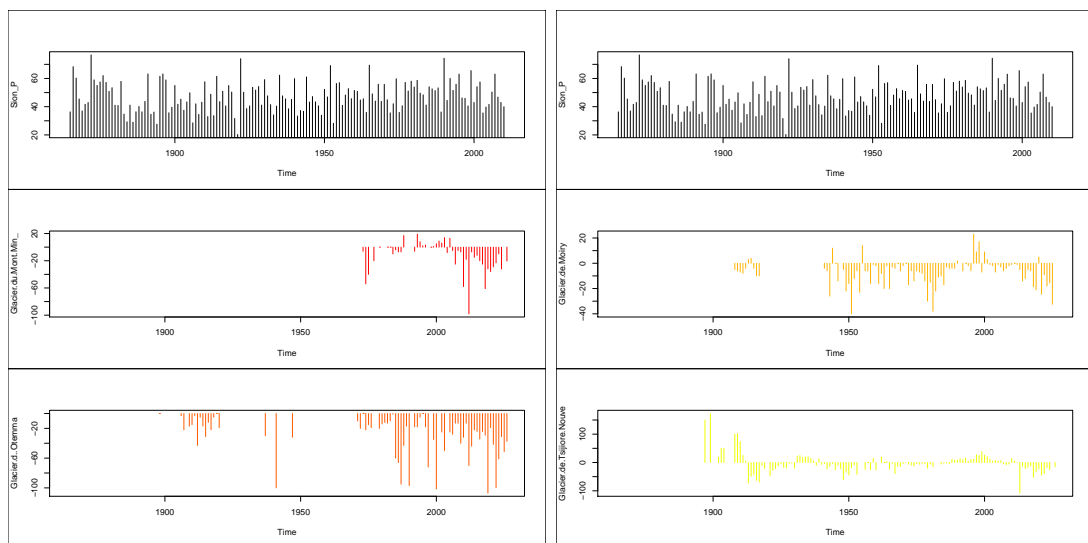
(a) Corrélation station Davos et Glaciers

(b) Corrélation station Davos et Glaciers



(c) Corrélation station Säntis et Glaciers

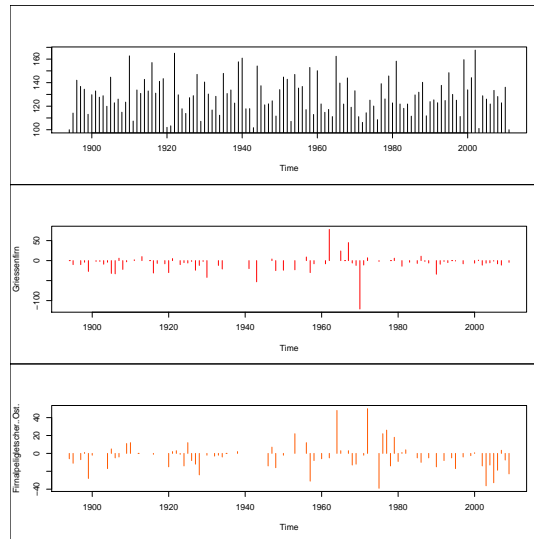
(d) Corrélation station Säntis et Glaciers



(e) Corrélation station Sion et Glaciers

(f) Corrélation station Sion et Glaciers

FIGURE 24 – Relation entre les précipitations dans la station et des glaciers alentours



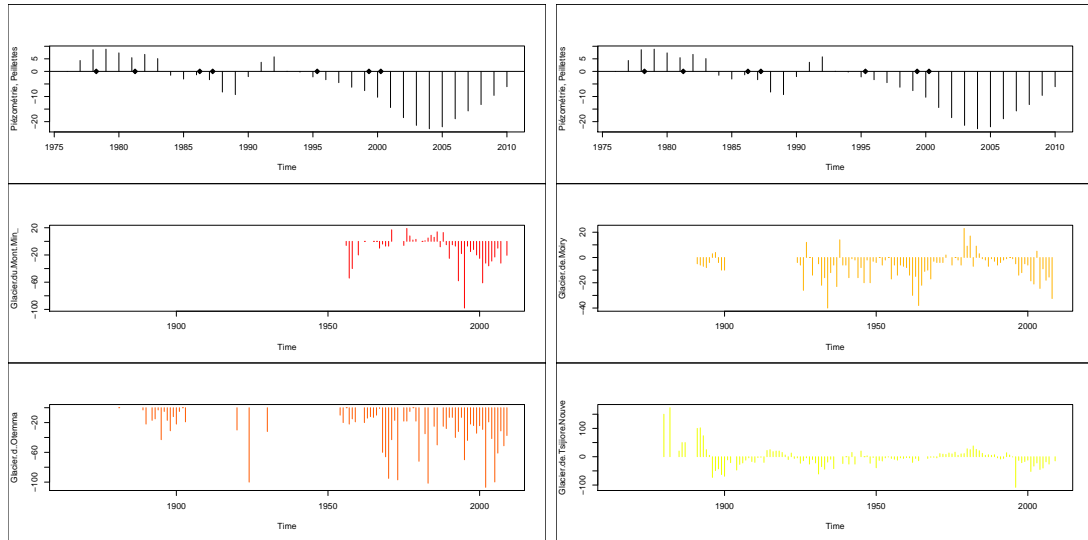
(a) Corrélation station Engelberg et Glaciers

FIGURE 25 – Relation entre les précipitations dans la station et des glaciers alentours

A Davos, par exemple (tableau de l'annexe 6), la corrélation avec un décalage d'un an entre les signaux est plus grande que la corrélation entre la même année, deux ou trois ans d'écart. Par contre, à Säntis (annexe 8) et à Sion (9), on trouve une seule corrélation supérieure à une corrélation entre les signaux de la même année. On ne peut donc pas tirer de conclusion claire de la relation précipitations/glaciers.

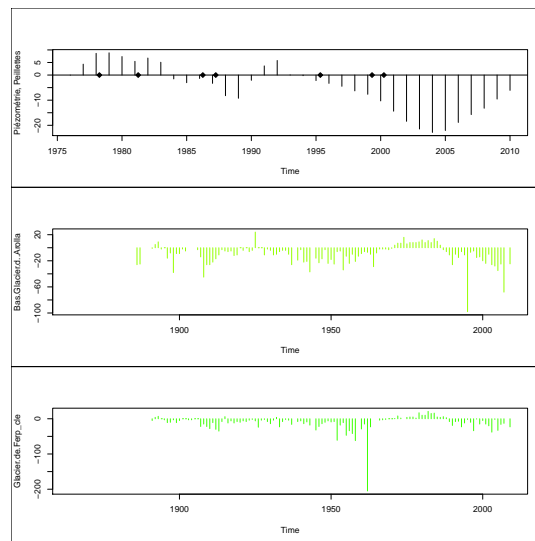
5.3 Tendances des glaciers et des piézomètres

A partir de cela, il a été jugé intéressant de continuer la recherche et de comparer les valeurs des piézomètres, mentionnés dans la première partie de ce travail, avec les glaciers et les glissements de terrain (graphes 26). Le test de Mann-Kendall a été ensuite appliqué à la relation piézomètres/glaciers uniquement, car le vecteur de glissements de terrain n'avait pas la taille nécessaire pour ce test. Les résultats de la corrélation sont en annexe B.6 dans le tableau 10. Des régressions ont été produites et sont en annexe B.4.



(a) Corrélations glaciers, piézomètres et activation du glissement

(b) Corrélations glaciers, piézomètres et activation du glissement



(c) Corrélations glaciers, piézomètres et activation du glissement

FIGURE 26 – Corrélations glaciers, piézomètres et activation du glissement

On remarque (figure 26) que chaque activation du glissement des Peillettes coïncide avec un niveau de la nappe positif ou négatif (5 occurrences d'activation avec une nappe inférieure à 0 contre 2 supérieure), avec un retrait des glaciers (5 sur 5 occurrences) et avec un retrait de glaciers plus grand que la normale, si les données des glaciers sont présentes. De plus, si l'on regarde les résultats du test de Mann-Kendall fait avec les glaciers autour de Sion, les corrélations sont beaucoup plus élevées que pour la relation glaciers/précipitations. La comparaison avec un décalage d'un an ou deux est plus marquée que les corrélations avec l'année courante. Cela voudrait dire que les années chaudes ou avec moins de précipitations, non seulement les glaciers fondent mais la nappe recule, parfois avec 1 à 2 ans de décalage. Tout comme le disent les corrélations, les régressions sur les nuages de points piézomètres/glaciers indiquent des tendances plus tranchées que lors de la comparaison glaciers/précipitations. Certaines valeurs extrêmes changent tout de même encore parfois la tendance.

Cependant, même si des faits peuvent soutenir une théorie, ce n'est pas suffisant pour en faire une loi. D'autres recherches avec des données plus précises pourraient être menées. L'analyse ne va pas aller plus loin au sujet des glaciers. De plus, des prévisions des retraits ou avancées futurs ne vont pas être menées à terme, car les valeurs des états des glaciers ne sont pas stationnaires (cf. annexe B.8) et comportent trop de lacunes de valeurs, ce qui rend la prédiction impossible. Il aurait été intéressant d'avoir les données journalières voir mensuelles pour cette analyse.

5.4 Prévisions des tendances futures

Afin de calculer les tendances futures, une prévision basée sur le filtre de Kalman⁵ a pu être envisagée en remplaçant le retrait des glaciers par les températures, bien qu'aucune étude sur ces températures n'ait été menée dans ce rapport auparavant. Pour accomplir cela, il est nécessaire non seulement de contrôler que les valeurs extrêmes du vecteur de précipitations sont stationnaires mais aussi que les valeurs de températures sont également stationnaires (cf. annexe B.2).

5.4.1 Méthode Peak Over Threshold

Afin de mettre en évidence les valeurs extrêmes d'un échantillon indépendant et uniformément distribuées (X_1, X_2, \dots, X_n) , il est coutume de choisir un seuil s convenable⁶. Ici, la fonction de répartition de la loi généralisée de Pareto va être utilisée et donnée par :

$$G(x) = \left(1 + \frac{\tilde{\xi}x}{\tilde{\sigma}}\right)^{-\frac{1}{\tilde{\xi}}}$$

Pour décrire les extrêmes, on peut en tirer :

$$\mathbb{E}[X - s | X > s] = \frac{\sigma_s}{1 - \xi} = \frac{\sigma_{s_0} + \xi(s - s_0)}{1 - \xi}$$

5.4.2 Stationnarité des valeurs extrêmes

Une fois le seuil choisi, les valeurs dépassant ce seuil ont été ajustées par une loi de Poisson $p(k) = P(X_k | \lambda) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}$. On trace ensuite la fonction de répartition empirique des données et la fonction de répartition de la loi de Poisson $P(\lambda)$. Si les deux courbes sont semblables alors les valeurs extrêmes sont stationnaires et ces valeurs peuvent être utilisées pour des prévisions.

5. Prédiction basée sur les états précédents

6. Si s est trop grand, alors trop peu de valeurs seront sélectionnées et la valeur de l'estimateur sera trop grande. A l'inverse si s est trop petit, les valeurs ne pourront pas être considérées comme extrêmes et la densité de probabilité de l'échantillon ne s'identifiera pas à une loi de Pareto.

Les choix des seuils ont été appliqués sur les données. Les graphes ainsi que les résultats de la distribution se trouvent dans l'annexe B.3. On peut dire que les valeurs extrêmes sont stationnaires pour les 4 stations ce qui permet d'envisager des prévisions.

5.4.3 Application des prévisions

Afin de calculer des valeurs futures basées sur les états précédents de valeurs existantes, un modèle linéaire non dépendant du temps est utilisé (équations (1) et (2)), avec z_t étant l'état prédit, F la matrice de transition d'état, G la matrice d'entrée, Q le gain de Kalman, u_t un vecteur de dimension m de variable d'entrée, R la matrice donnée du bruit et e_t un vecteur de dimension p de bruit potentiel, selon [Gilbert, 2009].

$$\begin{cases} z_t = F z_{t-1} + G u_t + Q y_t & (1) \\ y_t = H z_t + R e_t & (2) \end{cases}$$

Appliqué sur les valeurs de précipitations des 4 stations, les prévisions donnent les résultats de la figure 27. On remarque que les prévisions n'apportent pas un grand changement. Les prévisions de précipitations s'approchent de la valeur moyenne des valeurs antérieures et les températures aussi, même si elles subissent une hausse plus marquée.

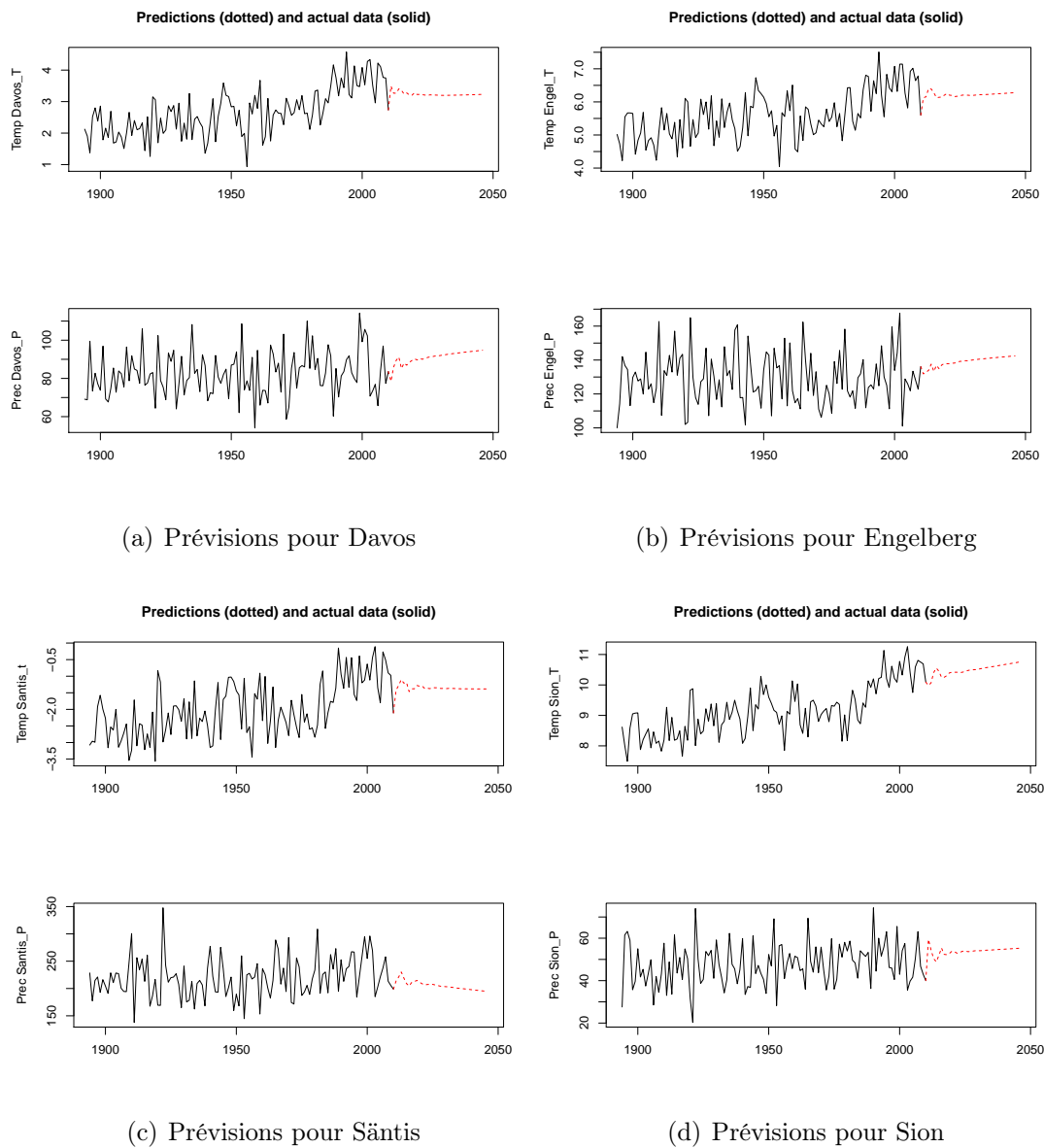


FIGURE 27 – Prévisions de précipitations et de températures pour quatre stations

6 Théorie des valeurs extrêmes appliquée sur les précipitations en Suisse pour des séries longue-durée 1864-2011

6.1 Introduction

Les événements climatiques changent de lieux et d'amplitudes. Pour être informé d'une occurrence d'événement inhabituel, l'analyse des valeurs extrêmes permet de calculer la fréquence des événements très rares. L'objectif de ce chapitre est de produire à partir de séries de précipitations de longue durée (1864-2011) des cartes de niveau retour de précipitations pour des périodes de retour⁷ variables pour la Suisse entière.

Ces informations sont importantes pour les autorités car des dégâts matériels, humains et économiques peuvent être minimisés par la connaissance. En effet, à partir de la fréquence des phénomènes, on peut trouver une intensité objective de la gravité, ce qui permet de dimensionner des ouvrages hydrauliques, des habitations, de cerner les zones à risque pour l'aménagement du territoire, de donner aux services publics la possibilité d'avertir la population ou aux assurances de calculer les primes. De plus, en zones de montagne, elles permettent d'aider à la décision pour le management du risque. Durant les 10 dernières années, les régions des Alpes et plus particulièrement la Suisse, ont subi plusieurs événements de précipitations extrêmes qui ont causé de nombreux dommages et tragédies, comme les pluies de 1987 et la lave torrentielle de Gondo en 2000. L'analyse des valeurs extrêmes permet de se rendre compte de l'ampleur des événements qui pourraient survenir et de s'y préparer.

Pour ce faire, une distribution de valeurs extrêmes est utilisée, basée sur une interpolation point par point sur la Suisse, calculée à partir de stations connues. Il est possible de voir sur les cartes produites la répartition géographique des événements extrêmes.

6.2 Données

Les données de 209 stations de Suisse ont été utilisées pour représenter une longue période de mesure de 1864 à 2011. Ces données ont été fournies par MétéoSuisse par l'intermédiaire du programme IDAWEB et sont constituées de moyennes mensuelles pour chaque année.

Les stations ont été sélectionnées pour être distribuées sur toute la Suisse le plus uniformément possible, comme on le voit dans la figure 28. Une liste des abréviations du code des stations est disponible dans les annexes A.3.

Comme au chapitre précédent, un test de stationnarité a été mené (annexe C.1) sur les données pour la Suisse. Les stations non stationnaires ont été supprimées, de même que les stations avec des valeurs improbables. Les raisons peuvent être que les stations ont été déplacées (altitude ou localisation) ou alors qu'elles ont subi de sérieuses irrégularités de mesures.

7. Une période de retour qualifie le temps entre deux événements pour laquelle le débit d'une pluie sort de la moyenne

Les stations suivantes ont été laissées de côté suite à ce contrôle. Pour la Suisse :

- | | | |
|------------------|------------------------|----------------|
| 1. Bellinzon | 6. Grand-Saint-Bernard | 11. Scudellate |
| 2. Château d'Oex | 7. La Cure | 12. Sierre |
| 3. Escholzmatt | 8. Lauterbrunnen | 13. Tamiens |
| 4. Frutigen | 9. Säntis | |
| 5. Gryon | 10. Saignelegier | |

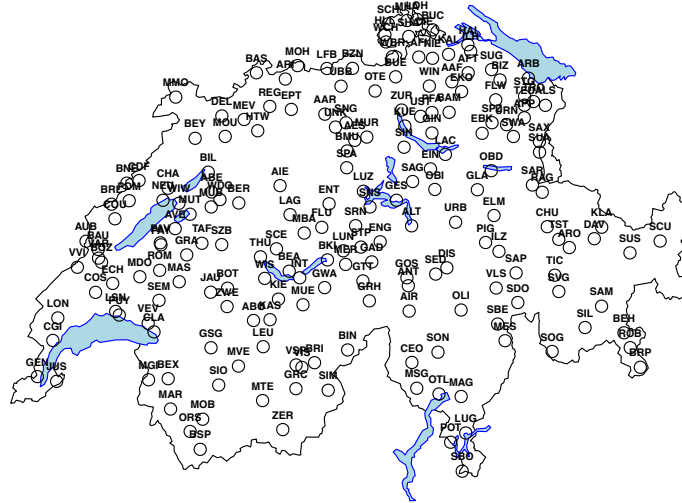


FIGURE 28 – Stations sélectionnées pour l’analyse

Ces stations sélectionnées peuvent aussi bien se situer dans des villes que isolées dans la campagne ou en montagne et leur altitude varie de 203 à 2505 mètres. Toutes les stations seront utilisées, mais par contre chacune sera exclue tour à tour des calculs et servira de validation afin de savoir si la méthode d’interpolation est valable partout avec la même exactitude. Cela permettra de savoir quelles sont les zones à interpréter avec plus de retenue.

6.3 Théorie des valeurs extrêmes appliquée sur les précipitations

6.3.1 Théorie des valeurs extrêmes

En probabilité, la distribution généralisée des valeurs extrêmes (GEV) appartient à la famille des distributions continues développées avec la théorie des valeurs extrêmes pour combiner les loi de type Gumbel, Fréchet et Weibull.

Pour utiliser cette loi, il faut d’abord s’assurer que les données sont indépendantes ou stationnaires. On prend notre série de n valeurs indépendantes d’une variable aléatoire X et on cherche le maximum parmi les valeurs X_i , où X_i est par exemple une série temporelle de données journalières.

$$M_n = \max_{1 \leq i \leq n} X_i$$

Pour des données peu dépendantes ou indépendantes, la probabilité que le maximum M_n ne dépasse pas une certaine valeur est donnée par $\text{Prob}(M_n \leq x)$. La fonction de répartition est donnée, selon [Coles, 2001], par :

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}$$

Cette GEV distribution utilise trois paramètres, qui sont : un paramètre de localisation μ , un paramètre d'échelle σ ($\sigma > 0$) et un paramètre de forme ξ . Le paramètre de localisation indique si la distribution est centrée, le paramètre d'échelle indique la diffusion de la distribution, et le paramètre de forme indique le comportement de la queue de la distribution. Ils indiquent quelle GEV distribution est suivie parmi les trois principales qui sont :

- Si ξ tend vers 0, alors la distribution suit une loi de Gumbel, à deux paramètres, qui est de la forme :

$$Gu(x; \mu, \sigma) = \exp[-\exp(-\frac{x - \mu}{\sigma})]$$

- Si $\xi > 0$, la distribution tend vers une loi de Fréchet, à trois paramètres, donnée par :

$$Fr(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp(-\frac{1}{(1 + \xi(x - \mu)/\sigma)^{-\frac{1}{\xi}}})$$

- Si $\xi < 0$, la distribution tend vers une loi de Weibull, à trois paramètres, donnée par :

$$We(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp(-(|\xi| \frac{\frac{\mu + \sigma}{|\xi|} - x}{\sigma})^{\frac{1}{|\xi|}})$$

Le comportement de la convergence de la loi de Fréchet qui tend lentement vers 0 alors que x croît, implique que la fonction de répartition converge lentement vers 1. Une série d'événements suivant une telle distribution pourrait avoir des phénomènes rares avec une amplitude beaucoup plus importante qu'usuellement. Ces événements-là sont, de ce fait, particulièrement surveillés par le management de risques car ils peuvent produire des événements très extrêmes. De son côté, la loi de Weibull décrit plutôt des phénomènes qui convergent vers une valeur sachant que le phénomène tend vers un palier et que la densité de probabilité est de ce fait nulle au-delà de ce palier.

La période de retour permet de savoir sur quelle période s'étendent les événements donnés par les lois ci-dessus. En d'autres mots, la période de retour définit l'intervalle de temps moyen pendant lequel deux événements ont une intensité qui dépasse ou égale un certain palier. Cela permet de définir le niveau de retour q_p qui est défini comme le $(1-p)^{eme}$ quantile. La probabilité associée est $T = \frac{1}{p}$ avec $p \in (0 < p \leq 1)$. Un événement est censé dépasser ce seuil en moyenne toutes les $\frac{1}{p}$ années. Le niveau de retour est alors donné par l'inversion de l'égalisation de la loi de Gumbel au temps de retour :

$$|q_n| = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi}[1 - (-\log(1 - p))^{-\xi}] & \text{pour } \xi \leq 0 \\ \mu - \sigma \log - \log(1 - p) & \text{pour } \xi = 0 \end{cases}$$

L'intervalle de confiance est défini selon la méthode delta. Les graphes de niveau retour en fonction de la période de retour sont en annexe C.2 pour toutes les stations. Les intervalles de confiance ne disent rien sur les erreurs de mesure, mais ils disent si l'on peut faire confiance aux valeurs trouvées.

6.3.2 Obtention des GEV paramètres

Chacune des stations peut être déterminée par ses trois paramètres clefs de la GEV distribution μ , σ et ξ . Ces valeurs sont théoriques et pour avoir une valeur estimée de ces paramètres, il faut calculer l'estimation du maximum de vraisemblance, $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ et $\hat{\xi}$ pour chacune des stations. En R, la fonction *fgev* permet de calculer une valeur numérique pour ces trois paramètres.

6.4 Interpolation sur la Suisse

Afin de produire une carte de niveau retour, il est nécessaire de calculer les trois paramètres μ , σ et ξ pour chacun des points l de Suisse pour un réseau de 1 km de points. Ces points inconnus verront leurs valeurs $\tilde{\mu}$, $\tilde{\sigma}$ et $\tilde{\xi}$ interpolées à partir des stations connues $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ et $\hat{\xi}$. Les paramètres aux stations inconnues peuvent être résumés par \tilde{H} et ceux des stations connues \hat{H} .

De nombreuses méthodes existent pour interpoler de tels paramètres comme le krigage, les modèles de régression linéaires, les modèles de régression basés sur les splines. Cependant, selon [Blanchet and Lehning, 2010], la pondération inverse à la distance sera choisie, car elle paraît la plus précise (deuxième meilleur modèle selon l'article) et la mieux adaptée à notre cas de figure. La pondération inverse à la distance permet de calculer les valeurs des paramètres pour des stations inconnues (considérées comme simples points sur la grille avec une position géoréférencée) grâce à la formule 3. Elle fonctionne de la manière suivante : connaissant le point dit « inconnu sur la grille », on calcule la distance par rapport à toutes les stations connues selon la formule 3 que l'on somme. Son avantage est qu'elle diminue les effets dus à l'altitude et à la distance. Ainsi, pour chaque station inconnue, on calcule la valeur interpolée en se basant sur les 209 autres stations connues.

Les paramètres ($\tilde{\mu}$, $\tilde{\sigma}$ et $\tilde{\xi}$) à l'endroit l que l'on cherche à interpoler sont décrits de la manière suivante, avec $\|l - l_i\|_2$ la distance entre la station estimée l_i et la station inconnue l .

$$\tilde{H} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\hat{H}_i}{\|l - l_i\|_2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\|l - l_i\|_2}}$$

Ici la distance est calculée avec la distance au carré, qui comprend l'altitude, soit :

$$\|l - l_i\|_2 = \sqrt{(\text{latitude}_l - \text{latitude}_{l_i})^2 + (\text{longitude}_l - \text{longitude}_{l_i})^2 + (\text{alt}_l - \text{alt}_{l_i})^2} \quad (3)$$

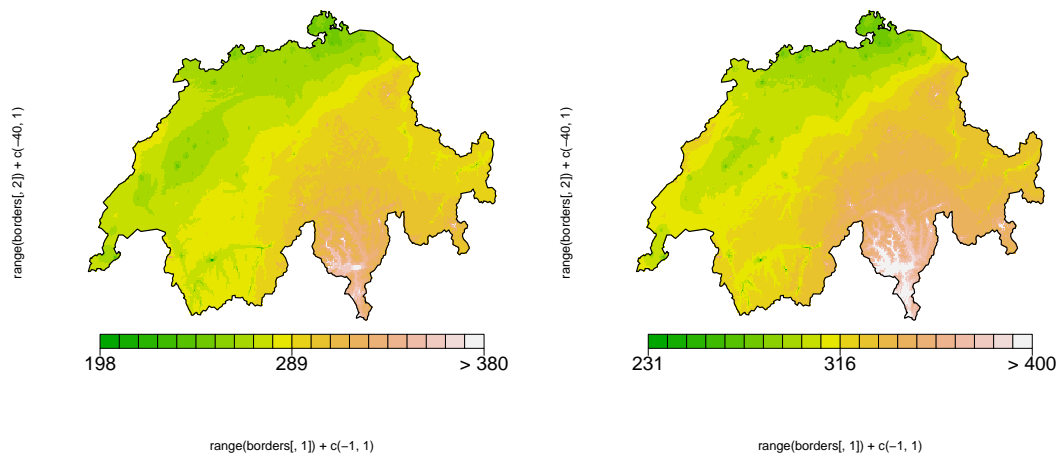
Avec des longs pas de temps, on note une corrélation entre l'altitude et la pluie. Un gradient hypsométrique a été appliqué ici afin de corriger l'altitude par rapport au précipitations de 30 mm / 100 m selon [Castellani, 1986]. Ensuite, afin de dessiner une carte des niveaux retour, la valeur de ξ définit quelle GEV distribution il faut suivre pour obtenir des valeurs des niveaux retour en mm pour un temps de retour choisi. Pour visualiser les valeurs interpolées, un maillage de 1 km sur toute la Suisse a été utilisé.

6.5 Résultats de l'interpolation

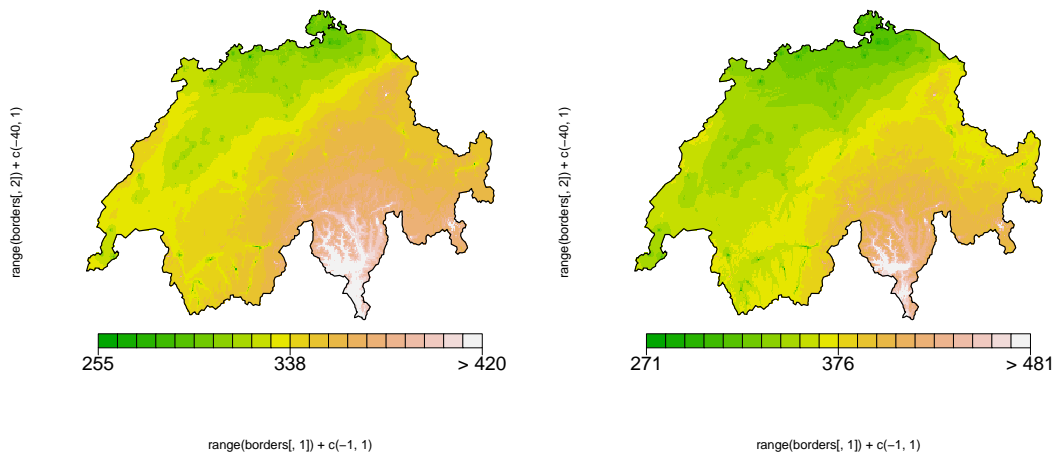
Une carte de niveau retour avec des temps de retour de différentes périodes (10 ans, 25 ans, 50 ans, 100 ans) a pu être générée, comme on peut le voir sur la figure 29.

Les cartes se lisent de la manière suivante : chaque carte représente un temps de retour différent. Pour la première carte 29(a), on a un temps de retour de 10 ans. Les valeurs dessinées sur la carte représentent la valeur maximale qui peut se produire une fois tous les 10 ans. Cela permet de connaître à quelle quantité en mm devrait résister une digue ou un barrage auquel on aimerait assigner un temps de retour de 10 ans. Pour savoir si ces valeurs peuvent être suivies, il suffit regarder sur le graphe temps-retour/niveau-retour en annexe C.2 si les valeurs se trouvent dans l'intervalle de confiance des 95 %.

On remarque de manière générale que les caractéristiques climatiques des différentes zones, délimitées par les niveaux retour peu importe le temps retour choisi, se ressemblent. Le Tessin ressort particulièrement en étant toujours la région qui reçoit le niveau retour le plus élevé. Cela peut s'expliquer par le fait que le Tessin est l'un des principaux endroits de Suisse qui reçoit le plus de précipitations annuellement selon [MeteoSuisse, 2007] avec la région du centre ouest comme on le voit sur la figure 30. Au contraire, le Plateau a les niveaux retour les plus



(a) Niveaux retour pour une période de retour de 10 ans (b) Niveaux retour pour une période de retour de 25 ans



(c) Niveaux retour pour une période de retour de 50 ans (d) Niveaux retour pour une période de retour de 100 ans

FIGURE 29 – Niveaux de retour pour un temps de retour donné

faibles. Les chaînes de montagne se démarquent bien des régions de plaine ainsi que les bassins versants de Suisse. On remarque les Préalpes qui reçoivent plus de précipitations qu'en plaine et qui donnent la limite géographique. Les vallées valaisannes sont particulièrement bien marquées avec un niveau retour plus petit dans la vallée du Rhône que sur les versants.

Il est intéressant de noter que plus le temps de retour est élevé, plus le niveau de retour devient grand. Cela est tout à fait normal car la probabilité d'un événement très extrême est plus grande durant une longue période si l'événement n'a pas eu lieu auparavant.

Evidemment cette carte indique les temps de retour grossièrement pour voir les tendances, elle ne tient donc pas compte des particularités locales.

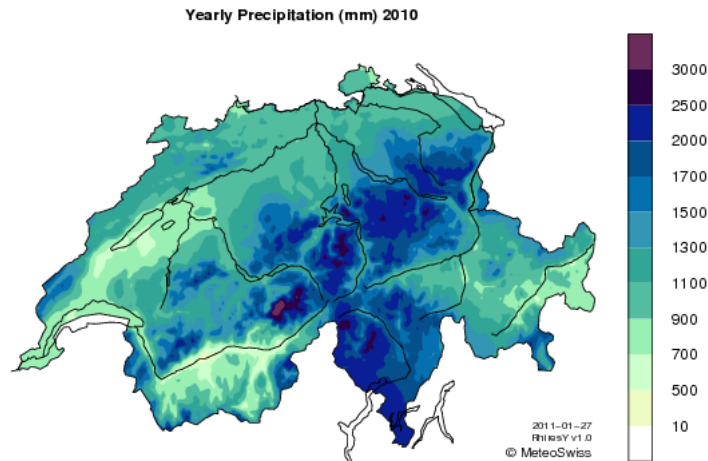


FIGURE 30 – Moyenne annuelle de précipitations sur la Suisse. Source [MeteoSuisse, 2007]

6.6 Validation des stations

L'utilisation du modèle de la pondération inverse à la distance (IDW) a été testé pour savoir s'il était valide et s'il produisait des erreurs raisonnables sur les stations connues. Cela permet de savoir quelles stations répondent moins bien à cette interpolation par manque de stations proches. Comme IDW donne une interpolation exacte, à chaque station l_i une valeur interpolée $\tilde{H}(l_i)$, donnée par l'équation IDW, correspondra à un résultat estimé $\hat{H}(l_i)$, donné par la fonction f_{gev} , qui doivent être semblables. Cela permet de pouvoir contrôler les résultats obtenus à chaque station.

La validation du modèle a été conduite de la sorte : une des 209 stations a tour à tour été retirée de la liste et été interpolée avec IDW pour connaître l'erreur du modèle à un endroit de la grille. Même si les 209 stations seront utilisées pour l'interpolation sur la grille de la Suisse, cela permet de voir quelles régions sont sous représentées. On aurait aussi pu choisir un certain nombre de stations fixes à retirer de la liste et à interpoler. Cependant cette solution n'aurait été représentative que pour les stations choisies et aurait omis certains aspects du climat comme les différences d'altitude, et les micro climats des vallées alpines.

Pour la validation des stations connues, les deux estimateurs - les valeurs interpolées $\tilde{H}(l_i)$ et les valeurs estimées initiales $\hat{H}(l_i)$ peuvent être comparés.

Afin de bien garder la distribution des données, les estimateurs eux-mêmes n'ont pas été comparés mais leurs quantiles. Une comparaison entre les quantiles de la GEV distribution interpolée sera confrontée aux valeurs observées elles-mêmes. Afin de contrôler que les quantiles sont corrects, des QQplots ont été tracés. Ils ne sont pas montrés dans ce rapport.

Les $M_i^{(1)}, \dots, M_n^{(k)}$ ($k=209$) quantiles observés à la station l_i ont la probabilité $p_k = \frac{k-\frac{1}{2}}{k}$ seront comparés à la valeur trouvée avec le $(1-p_k)^{eme}$ quantile de la distribution GEV interpolée à la station l_i nommée $\tilde{q}_{p_k, i}$.

Les quatre différentes méthodes de précision ont été utilisées :

1. Racine carrée de la moyenne des erreurs au carré

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{NK} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K (M_i^{(k)} - q_{p_k,i})^2}$$

2. Valeur absolue de la moyenne des erreurs

$$MAE = \frac{1}{NK} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K |M_i^{(k)} - q_{p_k,i}|$$

3. Maximum de l'erreur prédite

$$MPE = \max_{i \in 1 \dots N} \max_{k \in 1, \dots, k} |M_i^{(k)} - q_{p_k,i}|$$

4. Biais = $\frac{1}{NK} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K (M_i^{(k)} - q_{p_k,i})$

Les différentes erreurs, une par méthode de précision, aux différentes stations connues sont données sur la carte de la Suisse de la figure 31. Cela permet de voir les régions qui pourraient être sous représentées.

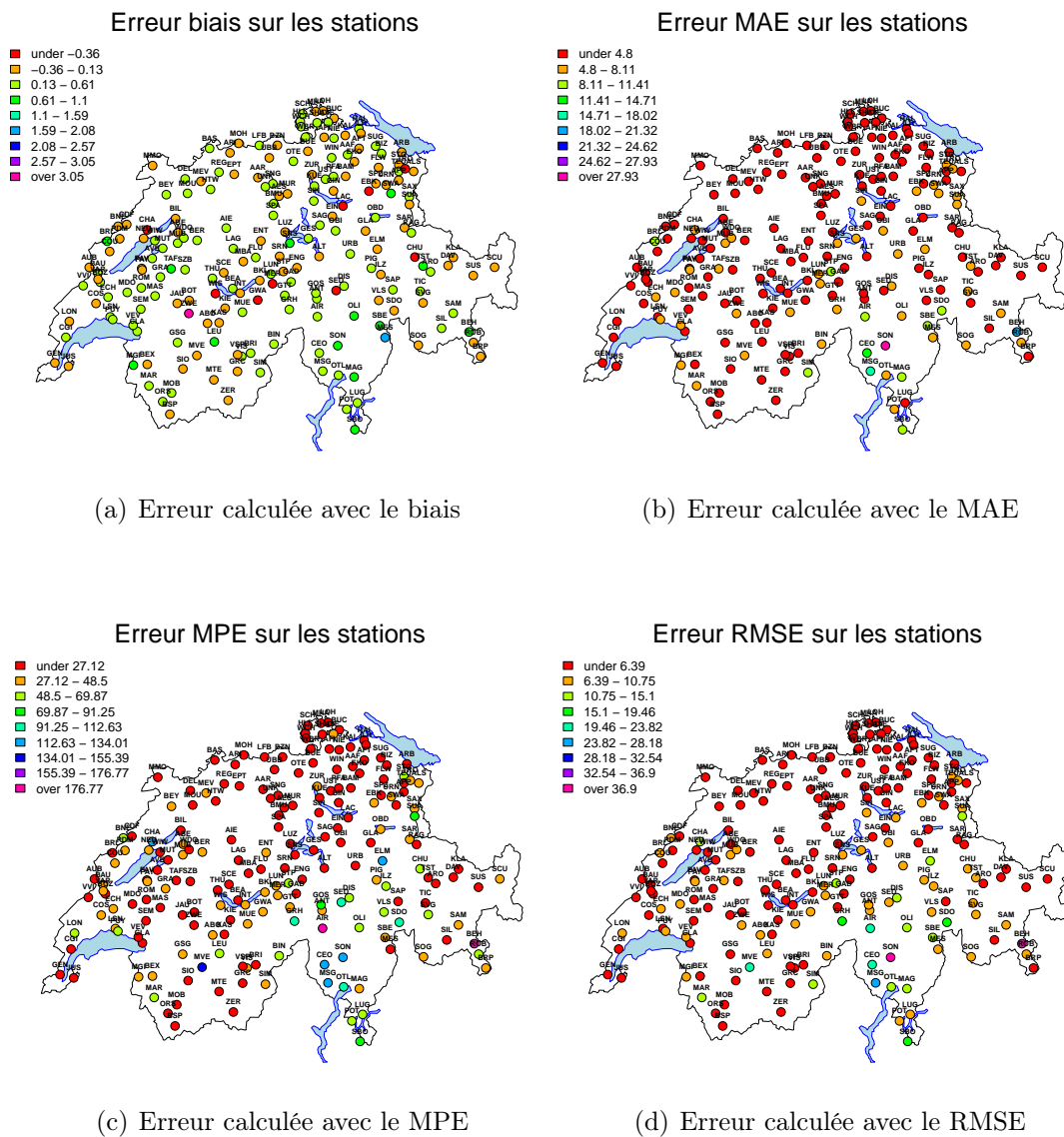


FIGURE 31 – Carte d'erreurs sur la Suisse pour un temps de retour de 50 ans

7 Conclusion

Les différents résultats des six zones analysées montrent une tendance annuelle cyclique. On remarque une diminution des précipitations pour les régions de Sud des Alpes sur la période 1976-2010 pour une augmentation pour les régions du Nord des Alpes à l'exception de la région du Nord-Ouest. De manière générale, on notera que les changements à long terme des précipitations ne sont visibles que lentement à cause des importantes fluctuations naturelles. Chaque saison a ses propres tendances, mais les corrélations sur les saisons montrent que les tendances annuelles sont très souvent conservées sur les graphes saisonniers. Toutes les observations sur les cercles de corrélations permettent de remarquer que les régions géographiquement ou topologiquement semblables ont un comportement proche. Les stations de plaine sont très liées au gradient hypsométrique, les stations de haute altitude ne ressemblent à aucune autre station, les stations de la même vallée sans séparation par d'autres montagnes ont un comportement très proche. L'indice NAO ne semble pas avoir de relation avec les précipitations en Suisse. Le glissement des Peillettes a été mis en relation avec les précipitations de la même année et puis avec celles de la saison d'avant. Aucune loi ne semble suivre la première comparaison, la seconde mériterait d'être approfondie avec plus de valeurs. Enfin, une relation entre les valeurs des piézomètres et des précipitations a mis en évidence un décalage uniquement durant les années 2000-2005.

Dans un second temps, l'observation d'une série de données plus longues (1864-2011) n'a pas permis de noter de cycle particulier. Ces données ont été mises en relation avec les retraits de glaciers alentours avec un décalage de 0 à 3 ans et aucune tendance ne semble corrélérer les quantités de précipitations et le retrait des glaciers. Ces glaciers ont également été mis en relation avec les niveaux piézométriques et les glissements de terrain. Il semblerait qu'une faible corrélation existe entre le retrait des glaciers et les niveaux piézométriques, et que plusieurs réactivations du glissement des Peillettes soit synchronisées avec un retrait important des glaciers. Enfin, des prévisions ont été calquées sur cette série de précipitations et la série de températures équivalentes, selon un modèle basé sur les états précédents. Ces prévisions ont donné des tendances de températures et de précipitations convergeant vers les valeurs moyennes de l'échantillon.

Enfin, des cartes de niveau retour, pour un temps retour donné, ont été établies. Ces cartes montrent que les événements extrêmes ne sont pas distribués de la même manière sur les différentes régions de Suisse. Les vallées, les chaînes de montagne ainsi que les plaines ont des régimes différents. La distribution de l'intensité des précipitations en Suisse et des niveaux de retour sont fortement influencés par le relief. Celui-ci modifie la trajectoire et l'évolution des schémas de précipitations locales et provoque des processus régionaux complexes de pluies.

Pour clore cette analyse, les pistes, qui pourraient encore être exploitées, sont :

- Influence des oscillations atmosphériques sur les précipitations
- Décalage Piézométrie/ Précipitations dans d'autres régions
- Décalage Glissement de terrain/Précipitations pour d'autres glissements ou dans d'autres cantons
- Comparaison Glaciers/précipitations avec des données mensuelles
- Comparaison Glaciers/Piézométrie avec des données mensuelles et dans d'autres régions
- Comparaison Glaciers/Glissement de terrain avec des données mensuelles et dans d'autres régions
- Génération de carte de niveaux retour avec des valeurs journalières

Si le climat se modifie, la Suisse subirait des événements extrêmes, plus nombreux et plus intenses, des sécheresses, des crues plus violentes et des vagues de chaleur. Ces conséquences pourraient être passablement lourdes pour l'environnement, l'économie, l'agriculture et la société. Cependant, aucune loi ne semble décrire ces phénomènes à elle seule. Les manifestations

sur la Suisse semblent donc plus complexes et basées sur des événements conjoints. Il serait donc intéressant d'approfondir dans ce sens, en cherchant à combiner les variations régionales et les précipitations. Comme l'a dit Haldane⁸ : « Nous ne pouvons pas prédire l'avenir, mais nous pouvons l'inventer ». Il faut donc continuer à chercher en combinant plusieurs phénomènes, s'il le faut, pour identifier le modèle que suit le climat. Les enjeux socio-économiques sont suffisamment importants pour mériter des recherches supplémentaires.

8. Généticien britannique du XIXe

8 Remerciements

L'accès aux données a été fourni par MétéoSuisse, l'Office fédéral de Météorologie et Climatologie. Un grand merci également à toutes les personnes qui ont joué un rôle dans ce projet : M. Ancey pour son suivi et son temps, M. Pascal Ornstein et M. Eric Bardou du CREALP, Juliette Blanchet, Loïc Etienne ainsi qu'aux relectrices !

9 Bibliographie

Références

- [Alazard, 2005] Alazard, D. (2005). Introduction au filtre de kalman.
- [Alpenkonvention, 2006] Alpenkonvention (2006). Changement du climat dans l'espace alpin : effets et défis.
- [Ancey, 2010] Ancey, C. (2010). Note de cours : Risques hydrologiques et aménagement du territoire.
- [B. S. Everitt, 2006] B. S. Everitt, T. H. (2006). A handbook of statistical analyses using r.
- [Bader and Bantle, 2004] Bader, S. and Bantle, H. (2004). Veröffentlichung.
- [Barnier, 2011] Barnier, J. (2011). R pour les sociologues (et assimilés).
- [Blanchet and Lehning, 2010] Blanchet, J. and Lehning, M. (2010). Mapping snow depth return levels : Smooth spatial modeling versus station interpolation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14 :2527–2544.
- [C. Casty and Böhm, 2005] C. Casty, H. Wanner, J. L. J. E. and Böhm, R. (2005). Temperature and precipitation variability in the european alps since 1500. *International Journal of Climatology*, 25 :1855–1880.
- [C. Frei, 1995] C. Frei, H.C. Davies, J. G. C. S. (1995). Climate dynamics and extreme precipitation and flood events in central europe. *Integrated Assessment*, Vol.1 :281–299.
- [Castellani, 1986] Castellani, C. (1986). Regionalisation des précipitations annuelles par la methode de la regression lineaire simple : l'exemple des alpes du nord. *Rev. Geog. Alpine*, Vol. 74 :393–403.
- [Coles, 2001] Coles, S. G. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer.
- [Confédération, 1995] Confédération (1995). *Office fédéral de la protection civile*.
- [Confédération, 2006] Confédération (2006). Analyse des crues de 2005. www.bafu.admin.ch/naturgefahren/01921/01948index.html?lang=fr.
- [Confédération, 2007] Confédération (2007). Actualités météorologiques. www.meteosuisse.admin.ch/web/fr/meteo/actualite_meteo.html.
- [Confédération, 2008] Confédération (2008). Les crues de 2000, de 1999, de 1993 et de 1987. www.bafu.admin.ch/hydrologie/01834/02041/020045/index.html?lang=fr.
- [Confédération, 2009a] Confédération (2009a). Etiages et sécheresse. www.bafu.admin.ch/hydrologie/01834/02041/020047/index.html?lang=fr.
- [Confédération, 2009b] Confédération (2009b). Retrospective saisonnière. www.meteosuisse.admin.ch/web/fr/climat/climat_aujourd'hui.html.
- [CREALP, 2005] CREALP (2005). Actualisation des courbes de tendances météorologiques et piézométriques dans la plaine du rhône – vs.
- [Duclert, 2011] Duclert, A. (2011). <http://www.duclert.org/AidememoireR/Le-langage/Syntaxedebase.php>.
- [E. Reynard and Penelas, 2008] E. Reynard, L. Thomi, V. N. C. B. and Penelas, M. (2008). Apprendre par les catastrophes naturelles : le cas des inondations récentes en suisse.
- [ETH,] ETH. Rapport glaciologique (1881-2009) : les variations des glaciers suisses no. 1-126. *Annuaire de la commission d'experts pour la cryosphère de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)*.

- [Frei, 2007] Frei, C. (2007). Changement climatique et catastrophes naturelles en suisse.
- [Frei and Schär, 1998] Frei, C. and Schär, C. (1998). A precipitation climatology of the alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology*, 18 :873–900.
- [Garcia, 2008] Garcia, E. (2008). Pca and spca tutorial.
- [Gilbert, 2009] Gilbert, P. (2009). Brief user’s guide : Dynamic systems equation.
- [Guerrier, 1978] Guerrier, G. (1978). Synthèse de données climatologiques (thermométrie et pluviométrie) par l’analyse en composantes principales.
- [He, 1995] He, Y. (1995). *Time Series Pack*. Wolfram Research.
- [Hojsgaard, 2006] Hojsgaard, S. (2006). Example of multivariate analysis in r - principal component analysis (pca) computing.
- [Holland, 2008] Holland, S. (2008). Principal components analysis (pca).
- [Horel, 1984] Horel, J. (1984). Complex principal component analysis : Theory and examples. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, volume 23, 1660.
- [Hyndman, 2008] Hyndman, R. (2008). Times series and forecasting in r.
- [J. Schmidli and Schär, 2001] J. Schmidli, C. Schmutz, C. F. H. W. and Schär, C. (2001). Mesoscale precipitation variability in the alpine region during the 20th century. *International Journal of Climatology*.
- [J.D. Cryer, 2008] J.D. Cryer, K. C. (2008). *Time Series Analysis with Application in R*. Springer.
- [Jolliffe, 2004] Jolliffe, I. (2004). *Principal Component Analysis*. Springer.
- [L. Lebart, 1995] L. Lebart, A. Morineau, M. P. (Octobre 1995). *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. Dunod.
- [Lifland, 2007] Lifland, J. (2007). European heat waves double in length since 1880. *American Geophysical Union for Immediate Release*, 7 :18.
- [M. Begert and Kirchhoffer, 2005] M. Begert, T. S. and Kirchhoffer, W. (2005). Homogeneous temperature and precipitation series of switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*, 25 :65–80.
- [M. Begert, 1995] M. Begert, T. Schlegel, W. K. (1995). Homogenous temperature and precipitation series of switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*, Vol. 25 :65–80.
- [M. Brunetti and Nanni, 2006] M. Brunetti, M. Maugeri, F. M. and Nanni, T. (2006). The variability and change of italian climate in the last 160 years. *Società Italiana di Fisica*, 29 :DOI 10.1393.
- [M. Brunetti and F. Monti, 2004] M. Brunetti, M. M. and F. Monti, T. N. (2004). Changes in daily precipitation frequency and distribution in italy over the last 120 years. *Journal of Geophysical Research*, 109 :D05102.
- [M. Brunetti and Nanni, 2000] M. Brunetti, M. M. and Nanni, T. (2000). Variations of temperature and precipitation in italy from 1866 to 1995. *Theoretical Applied Climatology*, 65 :165–174.
- [M. Brunetti, 2006] M. Brunetti, M. Maugeri, T. N. I. A. R. B. a. W. S. (2006). Precipitation variability and changes in the greater alpine region over the 1800-2003 period. *Journal of Geophysical Research*, 111 :D11107.
- [Mankin, 2010] Mankin, E. (2010). Principal components analysis : A how-to manual for r.
- [MeteoSuisse, 2007] MeteoSuisse (2007). www.meteosuisse.admin.ch.

- [Mills, 2004] Mills, T. (2004). Modelling trends in england and wales precipitation. 14 :1581–1594.
- [Mills, 2007] Mills, T. (2007). Time series modeling of two millennia of northern hemisphere temperatures : Long memory or shifting trends. *Royal Statistical Society*, 170 :83–84.
- [Nations-Unies, 1998] Nations-Unies (1998). Organe consultatif sur les changements climatiques : la suisse face au changement climatique : Impact des précipitations extrêmes. *Pro-Clim*.
- [Nations-Unies, 2007] Nations-Unies (2007). Organe consultatif sur les changements climatiques : le climat change - que faire? *Le nouveau rapport des Nations Unies sur le climat (GIEC 2007) et ses principaux résultats dans l'optique de la Suisse*.
- [P. Shmocker-Fackel, 2009] P. Shmocker-Fackel, F. N. (2009). Changes in flood frequencies in switzerland since 1500. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- [Probst and Tardy, 1987] Probst, J. and Tardy, Y. (1987). Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century. *Journal of Hydrology*, 94 :289–311.
- [P.S.P. Cowpertwait, 2009] P.S.P. Cowpertwait, A. M. (2009). *Introductory Time Series with R*. Springer.
- [Quiby, 1984] Quiby, J. (avril 1984). L'analyse en composantes principales et son application en météorologie. *Rapport de travail de l'Institut Suisse de Météorologie*.
- [R.S. Bivand, 2008] R.S. Bivand, E. J. Pebesma, V. G.-R. (2008). *Applied Spatial Data Analysis with R*. Springer.
- [Schmidli, 2002] Schmidli, J. (2002). Reconstruction and analysis of mesoscale precipitation in the alps for the 20th century. *Zürcher Klima-Schriften*.
- [Schmidli and Frei, 2005] Schmidli, J. and Frei, C. (2005). Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology*, 25 :753–771.
- [Smith, 2002] Smith, L. (2002). A tutorial on principal components analysis.
- [Unit, 2009] Unit, C. R. (2009). <http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/datapages/naoi.htm>.
- [University, 2009] University, N. (2009). University of newcastle upon tyle, chapter 6 : Describing random sequences. *Digital Signal Processing*.
- [Widmann and Schär, 1997] Widmann, M. and Schär, C. (1997). A principal and long-term trend analysis of daily precipitation in switzerland. *International Journal of Climatology*, 17 :1333–1356.
- [Wikipédia, 2011] Wikipédia, F. (2011). <http://www.wikipedia.com>.
- [Zoonekynd, 2005] Zoonekynd, V. (2005). http://zoonek2.free.fr/UNIX/48_R/15.html.

10 Annexes

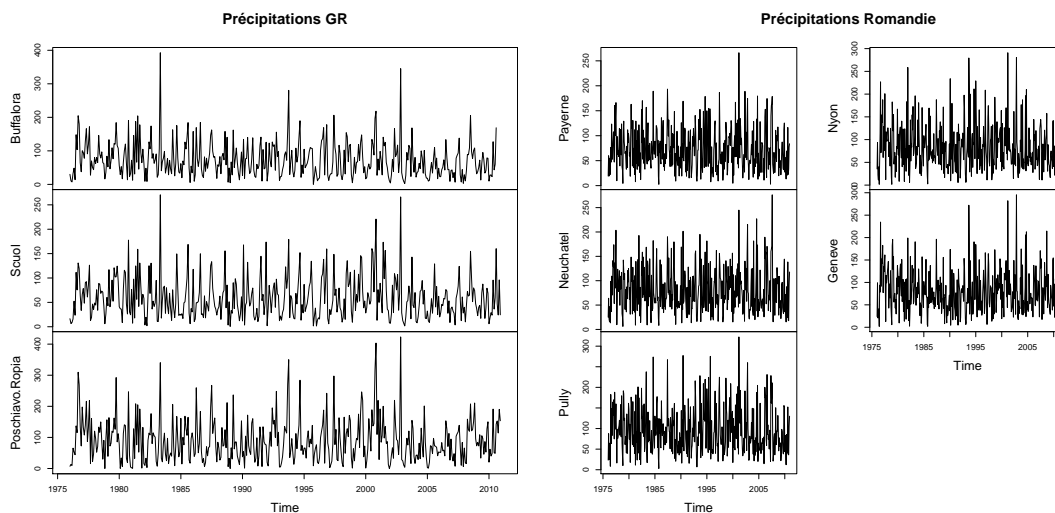
A Annexes de la partie 3 et 4

A.1 Stations utilisées

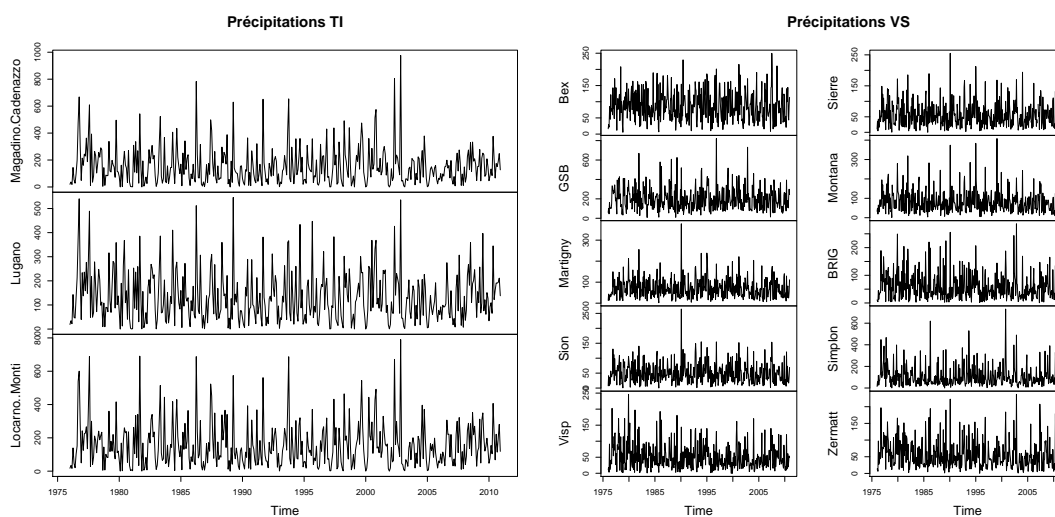
Tableau 5 – Stations utilisées par canton

Zone de la station	Nom de la station	Source
Valais	St-Bernard	CREALP
Valais	Bex	CREALP
Valais	Martigny	CREALP
Valais	Sion	CREALP
Valais	Visp	CREALP
Valais	Sierre	CREALP
Valais	Montana	CREALP
Valais	Brig	CREALP
Valais	Simplon	CREALP
Valais	Zermatt	CliMap MeteoSuisse
Plateau romand	Payerne	CliMap MeteoSuisse
Plateau romand	Neuchatel	CliMap MeteoSuisse
Plateau romand	Pully	CliMap MeteoSuisse
Plateau romand	Nyon	CliMap MeteoSuisse
Plateau romand	Geneve	CliMap MeteoSuisse
Suisse centrale Ouest	St-Gall	CliMap MeteoSuisse
Suisse centrale Ouest	Güttingen	CliMap MeteoSuisse
Suisse centrale Ouest	Schauffausen	CliMap MeteoSuisse
Suisse centrale Ouest	Aadorf	CliMap MeteoSuisse
Suisse centrale Ouest	Zurich Kloten	CliMap MeteoSuisse
Suisse centrale Ouest	Wadenswil	CliMap MeteoSuisse
Suisse centrale Ouest	Zurich Fluten	CliMap MeteoSuisse
Suisse centrale Ouest	Wadenswil	CliMap MeteoSuisse
Tessin	Magadino/Cadenazzo	CliMap MeteoSuisse
Tessin	Lugano	CliMap MeteoSuisse
Tessin	Locarno /Monti	CliMap MeteoSuisse
Engadine	Poschiavo/Ropia	CliMap MeteoSuisse
Engadine	Buffalora	CliMap MeteoSuisse
Engadine	Scuol	CliMap MeteoSuisse

A.2 Hyétogramme des données brutes pour chaque zone de l'ACP

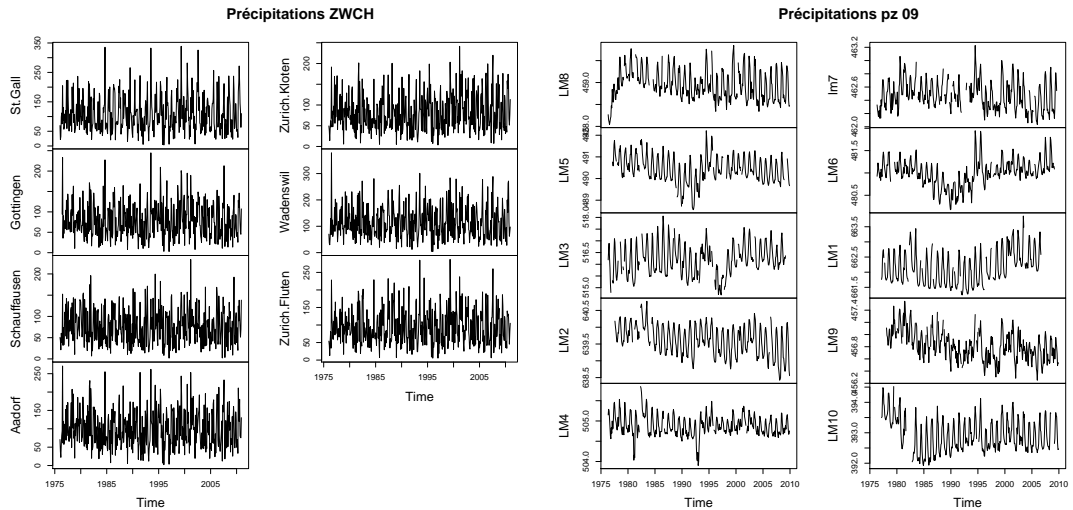


(a) Hyétogramme des données brutes pour l'Engadine (b) Hyétogramme des données brutes pour le Plateau romand



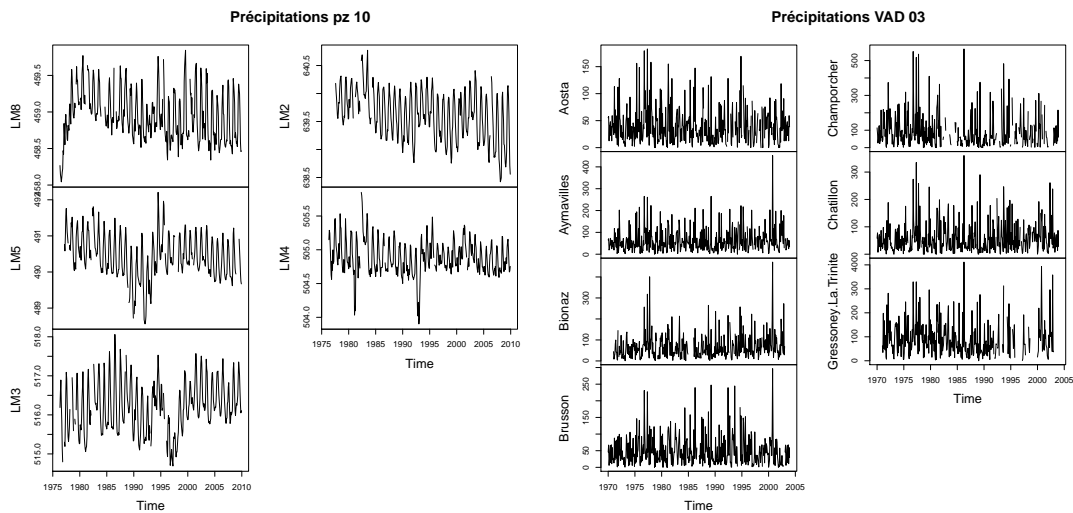
(c) Hyétogramme des données brutes pour le Tessin (d) Hyétogramme des données brutes pour le Valais

FIGURE 32 – Hyétogrammes des données brutes des zones pour l'ACP



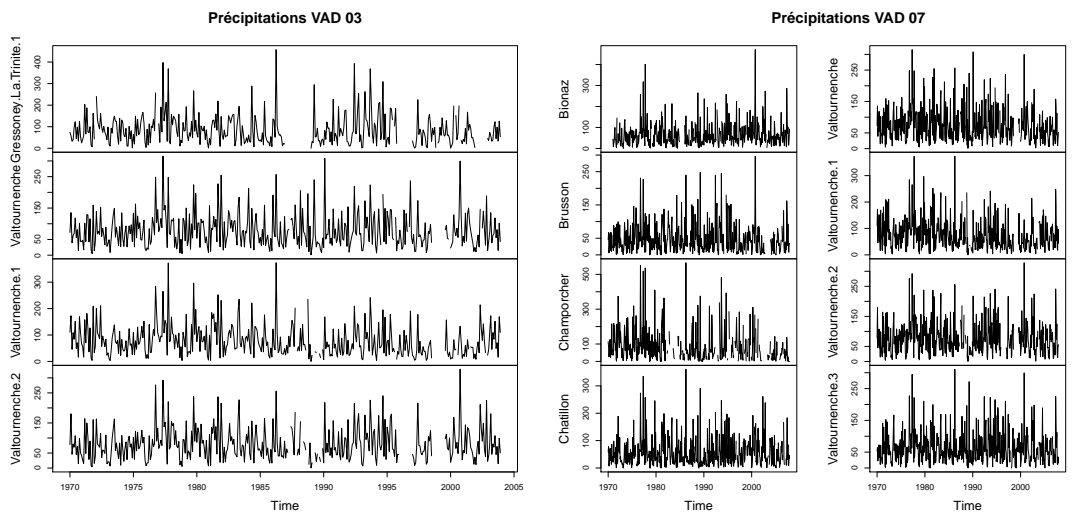
(a) Hyetogramme des données brutes pour le Suisse centrale ouest

(b) Hyetogramme des données brutes pour les piézomètres



(c) Hyetogramme des données brutes pour les piézomètres

(d) Hyetogramme des données brutes pour l



(e) Hyetogramme des données brutes pour l

(f) Hyetogramme des données brutes pour l

FIGURE 33 – Hyetogrammes des données brutes des zones pour l'ACP

A.3 Abréviations des stations suisses

ENG	ENG	BOT	Boltigen	KAL	Kalchrain	PUY	Pully
BAS	Basel	BOZ	Bochuz, Orbe	KAS	Kandersteg	REG	Bad Ragaz
BER	Bern	BRI	Brig	KIE	Kiental	RAG	Reigoldswil
CHA	Chamont	BRL	La Br_vine	KLA	Klosters / Aeuja	ROB	Poschhio / Robbia
GEN	Geneve	BRP	Brusio-Piazzo	KUE	Koenacht, ZH	ROM	Romont
LUG	Lugano	BSP	Bourg-St-Pierre	LAC	Lachen	SAG	Sattel-Aegeri
SIL	Segli, Maria	BUC	Buch, SH	LAG	Langnau i.E.	SAM	Samedan
DAV	Davos	BUE	Buelach	LEU	Leukerbad	SAP	Safien-Platz
SIO	Sion	BZN	Bezrau	LFB	Laufenburg	SAR	Sargans
ZUR	Zurich	CDF	La Chaux-de-Fonds	LOH	Longirod	SAX	Salez / Saxerriet
ALS	Altstätten	CEO	Cevio	LSN	Lausanne	SBE	S. Bernardino
ALT	Altdorf	CGI	Nyon / Changins	LUN	Lungern	SBO	Stabio
EIN	Einsiedeln	CHU	Chur	LUZ	Luzero	SCE	Schwarzenegg
LOH	Lohn	CLA	Montroux-Clarens	MAG	Magadino / Cadenazzo	SCH	Schleiheim
MUR	Muri	COS	Cossonay	MAR	Les Marécottes	SDO	Spögen-Dorf
NEU	Neuchatel	COU	Couvet	MAS	Marsens	SED	Sedrun
SCU	Scuol	DEL	Delemont	MBA	Marbach	SEM	Semsales
AAF	Aadorf	DIE	Diessenhofen	MDO	Moudon-Origine	SHA	Schaffhausen
AAR	Aarau-Unterefelden	DIS	Disentis / Sedrun	MER	Meiringen	SIH	Sihlugg
ABE	Aarberg	EBK	Ebnat-Kappel	MES	Mesocco	SIM	Simplon-Dorf
ABO	Adelboden	ECH	Echallens	MEV	Mervelier	SNG	Seengen
AES	Aesch, LU	EKO	Eschlikon	MGI	Morgins	SNS	Stans
AFT	Andelfingen	ELM	Elm	MHA	Merishausen	SOG	Soglio
AFT	Affeltrangen	ENT	Entlebuch	MMO	Mormont	SON	Sonogno
AIE	Affoltern im Emmental	EPT	Eptingen	MOB	Montagnier, Bagnes	SPA	Sempach
AIR	Airolo	FLU	Flaehli, LU	MOH	Moehlin	SPZ	St. Peterzell
ANT	Andermatt	FLW	Flawil	MOU	Moutier	SRN	Sarnen
APP	Appenzell	GAD	Gadmen	MSG	Mosogno	STG	St. Gallen
ARB	Arbon	GES	Gersau	MTE	Mottec	STP	St. Kalp
ARI	Arisdorf	GIN	Groeningen	MUB	Muehleberg	SUA	Schaan / Untere Au
ARO	Arosa	GLA	Glarus	MUE	Mörlen	SUG	Sulgen
AUB	L' Auberson	GOS	G. schenen	MUT	Murten	SUS	Susch
AVE	Avenches	GRA	Fribourg / Postieux	MVE	Montana	SVG	Savognin
BAM	Bauma	GRC	Graechen	NIE	Niedermuorn	SWA	Schw. galp
BAU	Baulmes	GRH	Grimmel Hospiz	OBD	Obstaliden	SZB	Schwarzenburg
BEA	Beatenberg	GSS	Gsteig, Gstaad	OBI	Oberiberg	TAF	Tafers
BEH	Passo del Bernina	GTT	Guttannen	OLI	Olivone	TEU	Teufen
BEX	Bex	GWA	Grindelwald	ORS	Orsières	THU	Thun
BEY	Beilelay	HAI	Saien-Neutenen	OTE	Oetfingen	TIC	Triefencastel
BIL	Biel/Bienne	HLL	Hallau	OTL	Locarno / Monti	TRO	Trogen
BIN	Birm	HTW	Herbetswil	PAV	Payenne-Ville	TST	Tschierschen
BIZ	Bischofszell	ILH	Illhart	PAY	Payenne	UBB	Unterb_berg
BKI	Brienz-Kienholz	ILZ	Ilanz	PDM	Les Ponts-de-Martel	UNK	Unterkulm
BMU	Beromuenster	INT	Interlaken	PFA	Pfaffikon	URB	Urnerboden
BNE	Les Brenets	JAU	Jaun	PIG	Pigniu	URN	Urn_sch
		JUS	Jussy	POT	Ponte Tresa	UST	Uster

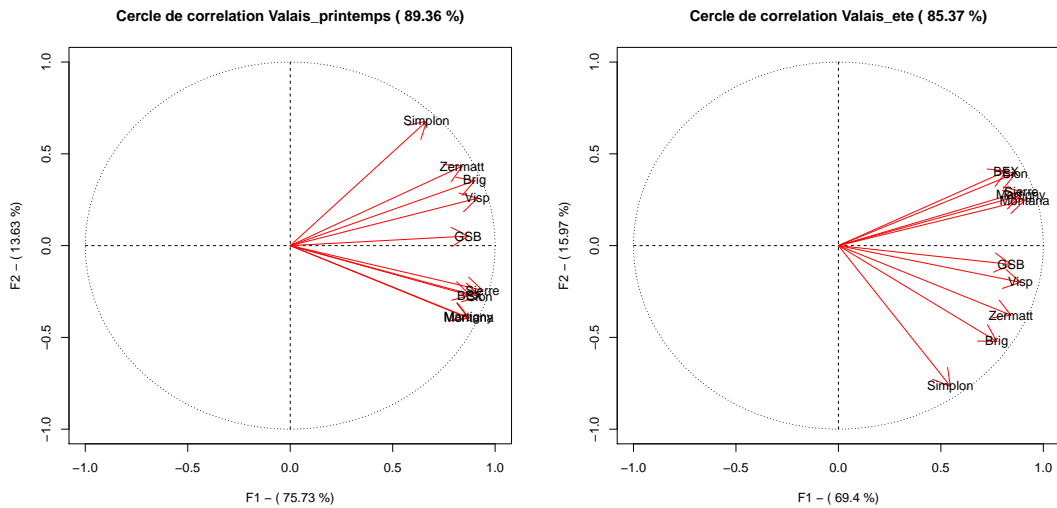
VAR
VEV
VLS
VSP
VSI
VVI
WBR
WCH
WDO
WIN
WIS
WIV
ZER
ZWE

Valleyres-sous-Francaes
Vevey
Vals
Visp_1
Visp_2
Vallorbe-Ville
Will bei Rafz
Wilchingen
Wahlendorf
Winterthur-Seen
Wimmis
Witzwil
Zermatt
Zweisimmen

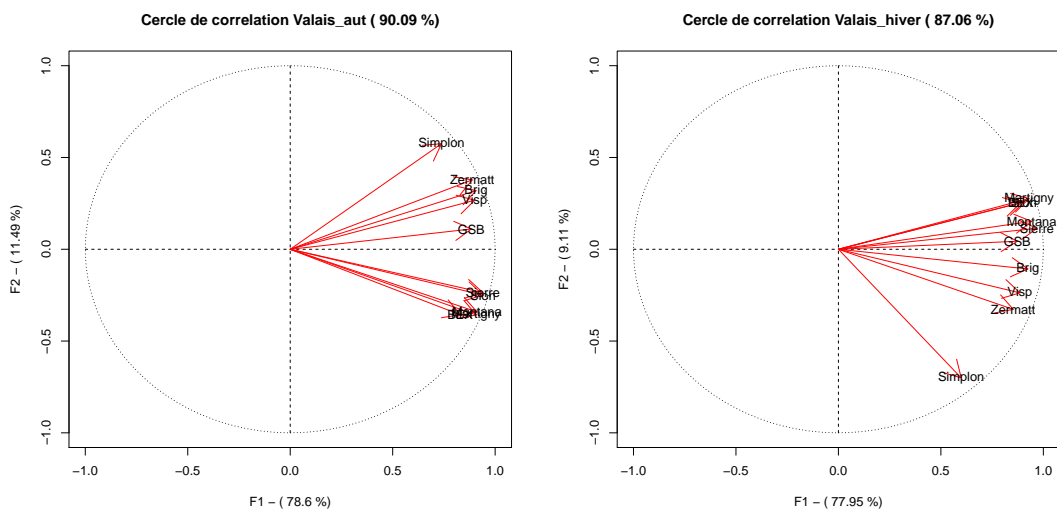
A.4 Stationnarité des données

Les graphes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip

A.5 Corrélations des zones par saison

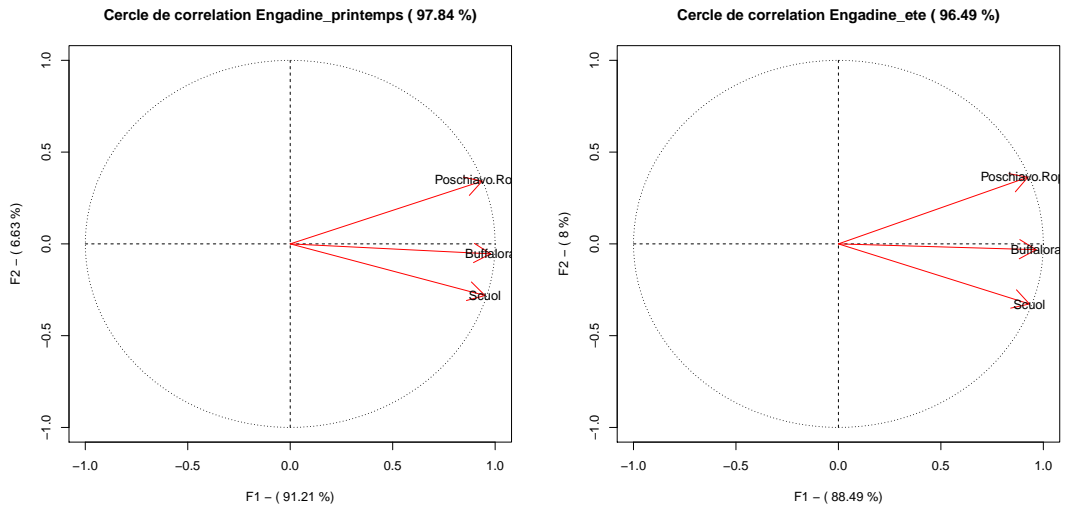


(a) Cercle de corrélation pour les stations valaisannes au printemps (b) Cercle de corrélation pour les stations valaisannes en été

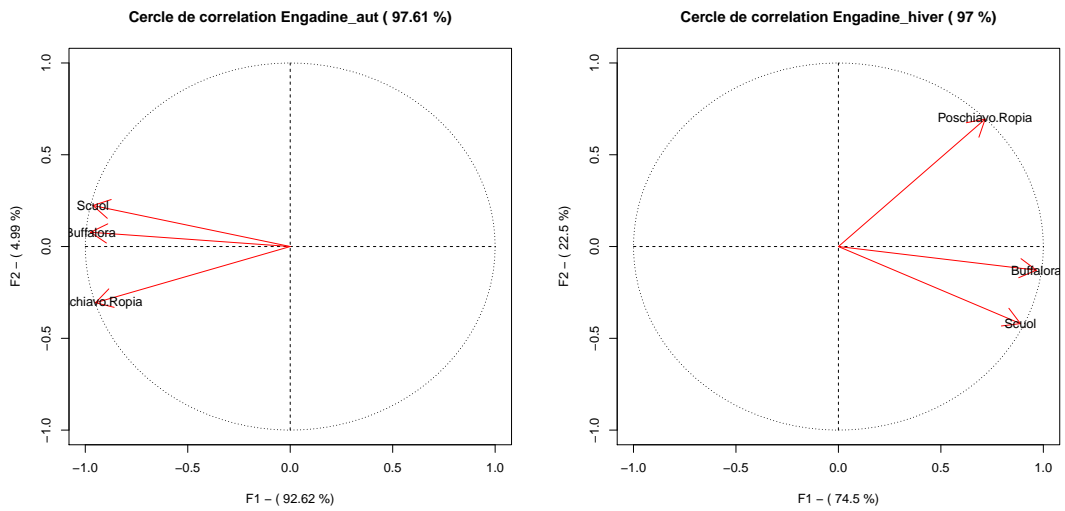


(c) Cercle de corrélation pour les stations valaisannes en automne (d) Cercle de corrélation pour les stations valaisannes en hiver

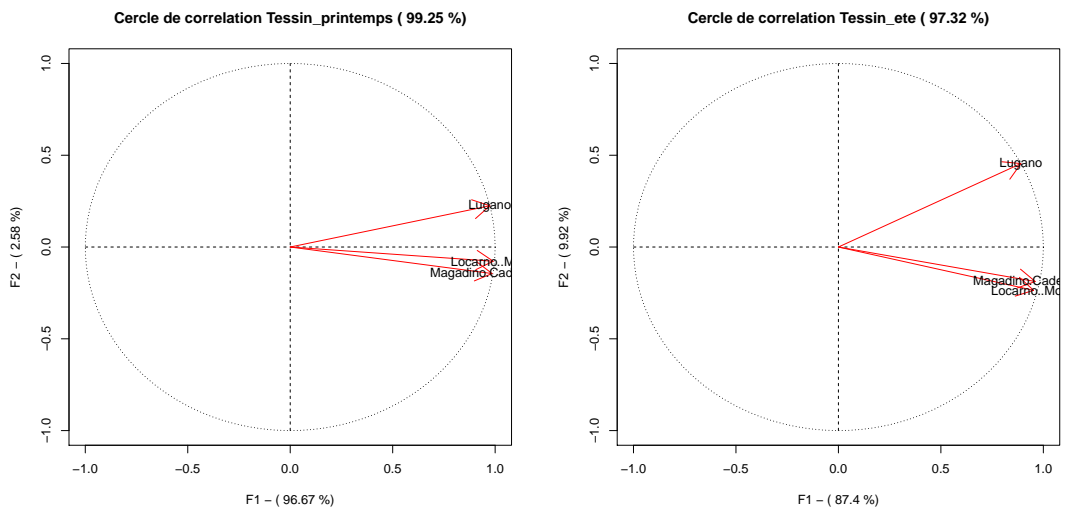
FIGURE 34 – Corrélations des zones choisies



(a) Cercle de corrélation pour les stations grisonnes au printemps (b) Cercle de corrélation pour les stations grisonnes en été

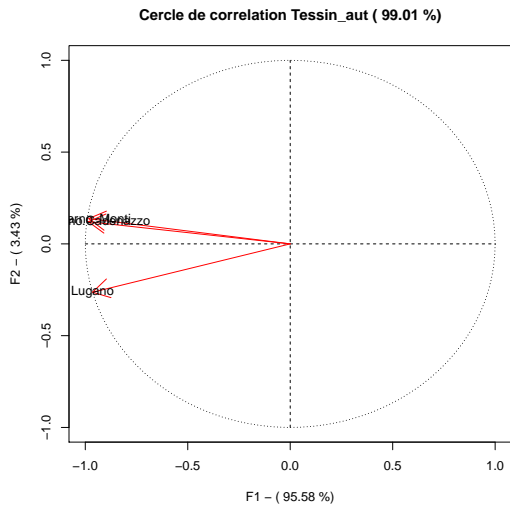


(c) Cercle de corrélation pour les stations grisonnes en automne (d) Cercle de corrélation pour les stations grisonnes en hiver

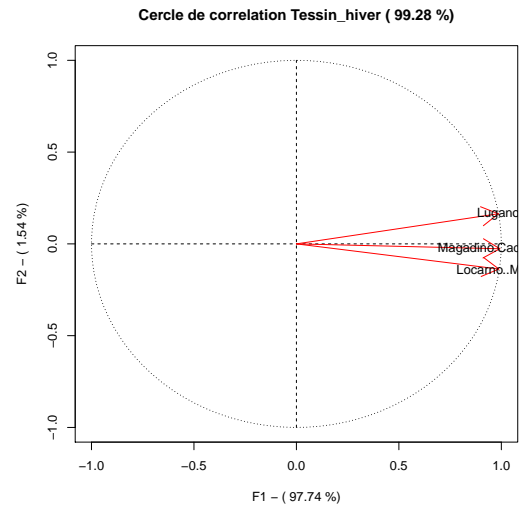


(e) Cercle de corrélation pour les stations tessinoises au printemps (f) Cercle de corrélation pour les stations tessinoises en été

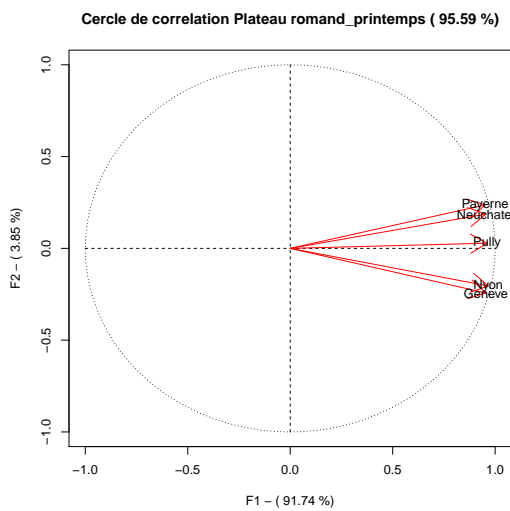
FIGURE 35 – Corrélations des zones choisies



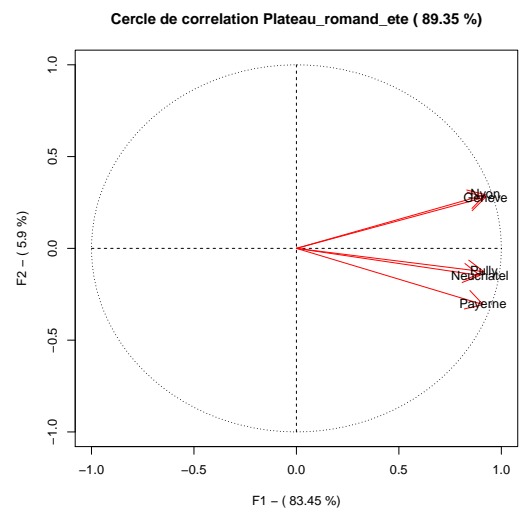
(a) Cercle de corrélation pour les stations tessinoises en automne



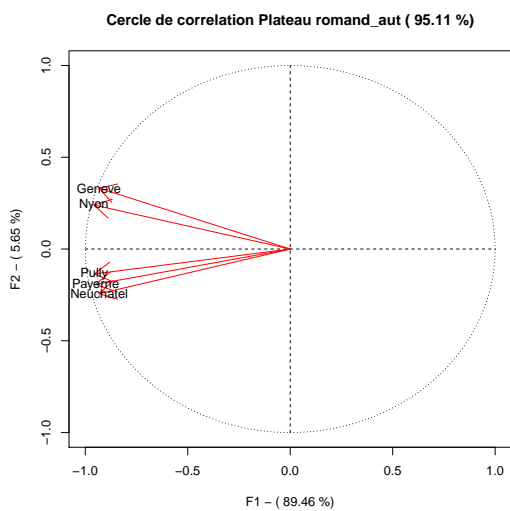
(b) Cercle de corrélation pour les stations tessinoises en hiver



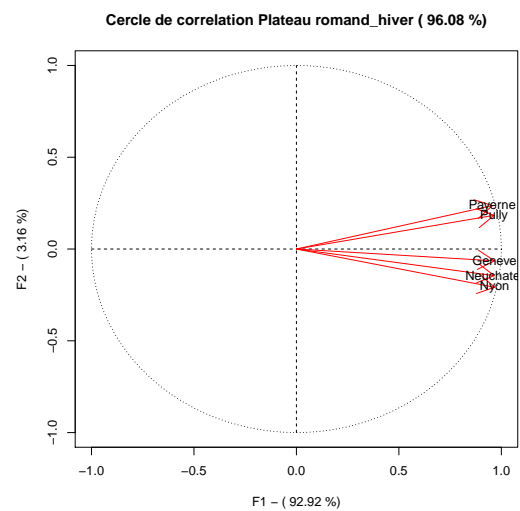
(c) Cercle de corrélation pour les stations romandes au printemps



(d) Cercle de corrélation pour les stations romandes en été

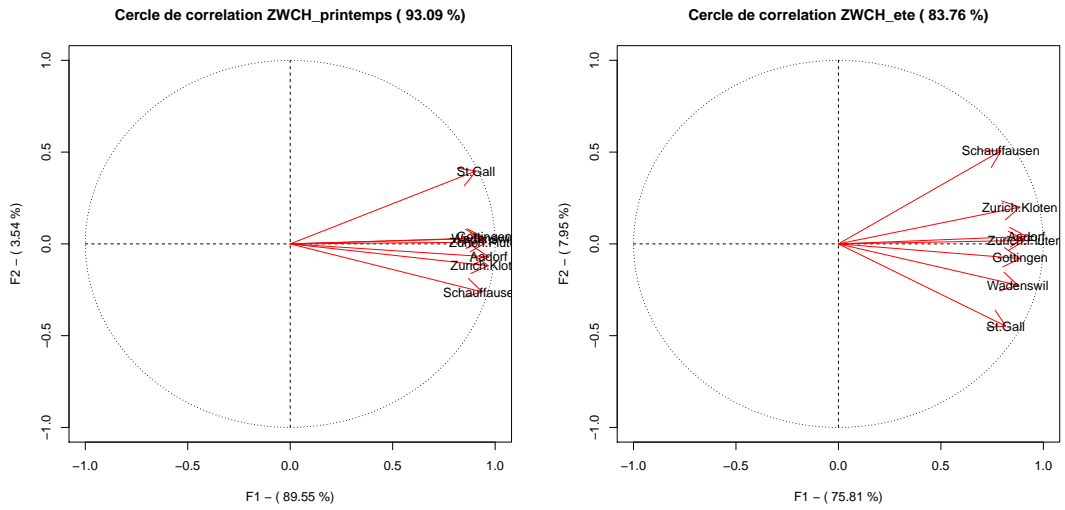


(e) Cercle de corrélation pour les stations romandes en automne

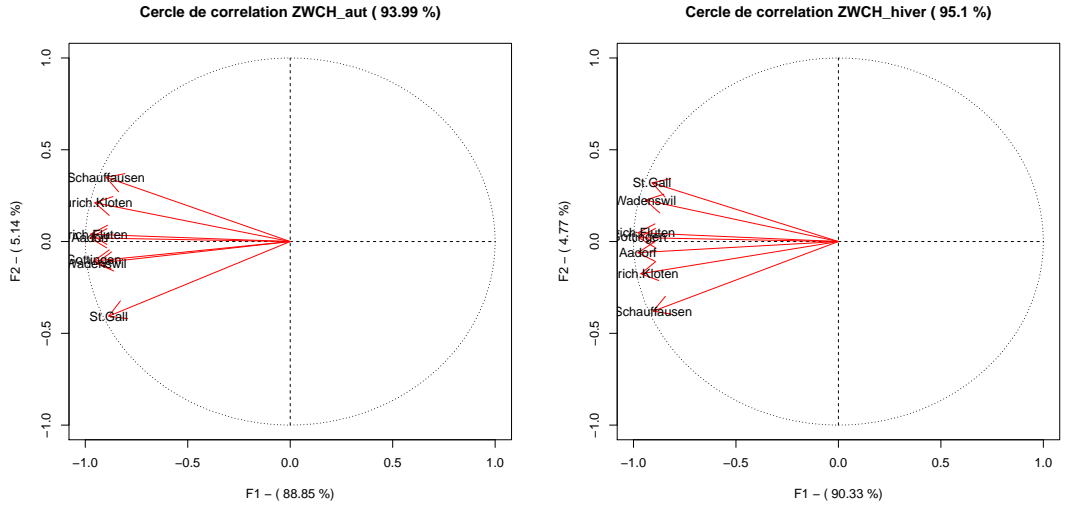


(f) Cercle de corrélation pour les stations romandes en hiver

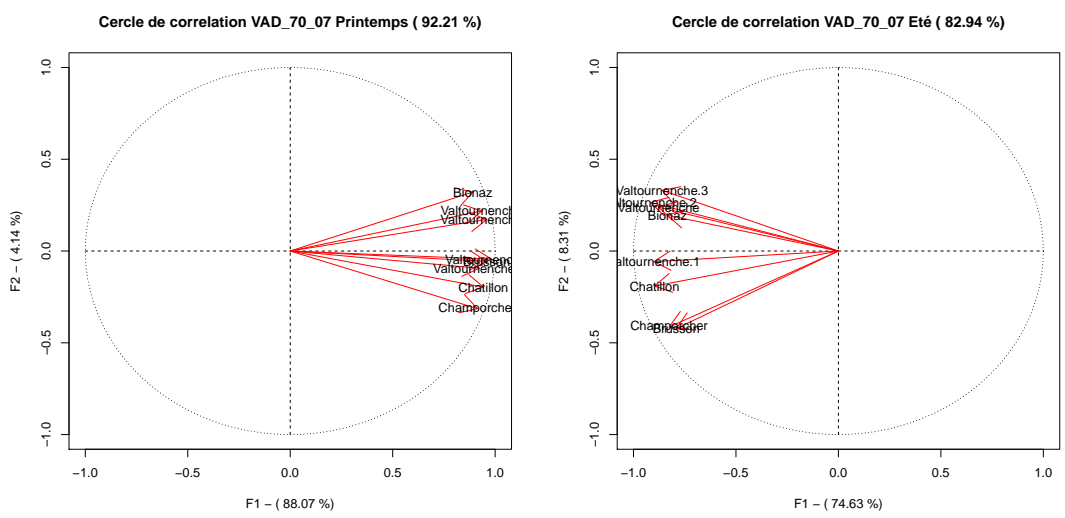
FIGURE 36 – Corrélations des zones choisies



(a) Cercle de corrélation pour les stations ZWCH au printemps (b) Cercle de corrélation pour les stations ZWCH en été

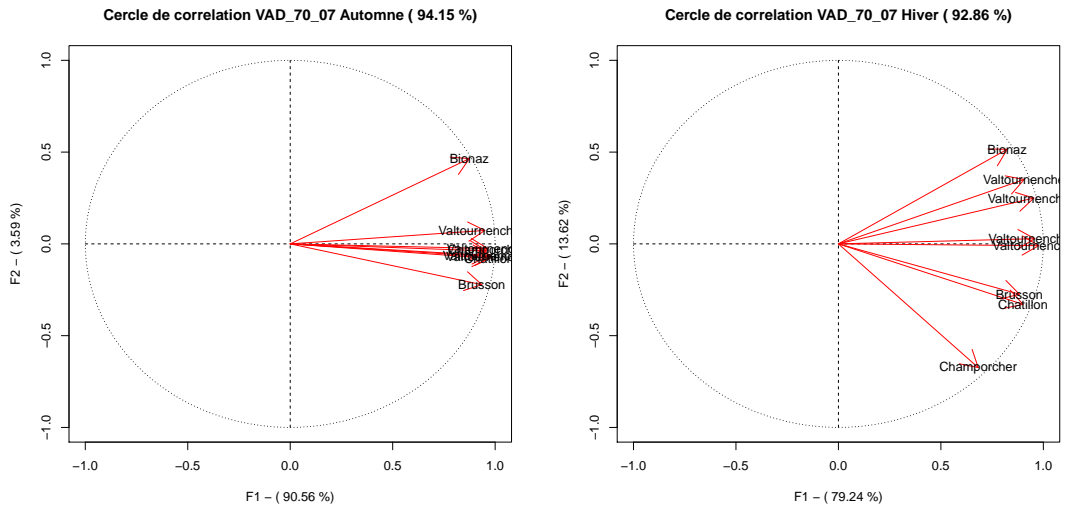


(c) Cercle de corrélation pour les stations ZWCH en automne (d) Cercle de corrélation pour les stations ZWCH en hiver

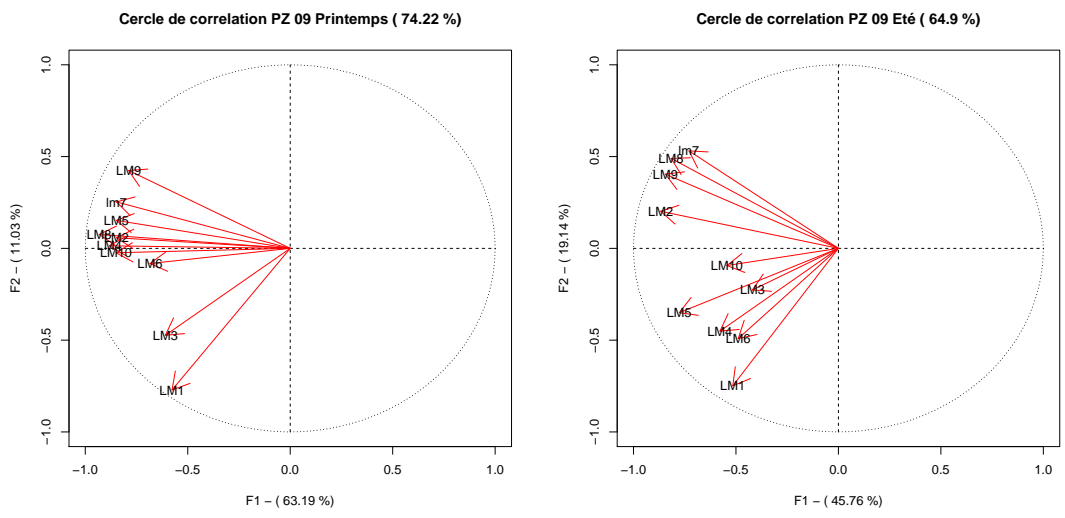


(e) Cercle de corrélation pour les stations Val d'Aoste au printemps (f) Cercle de corrélation pour les stations Val d'Aoste en été

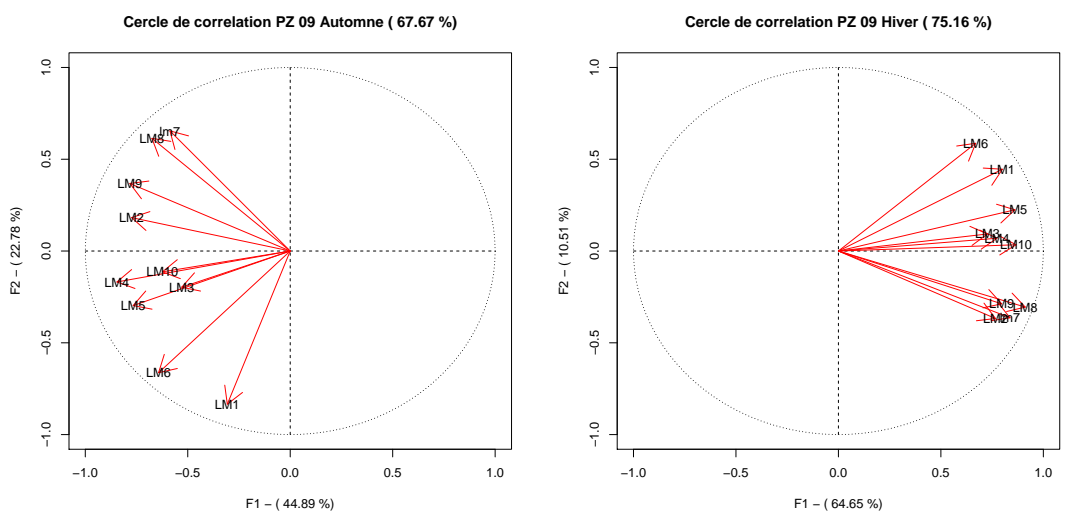
FIGURE 37 – Corrélations des zones choisies



(a) Cercle de corrélation pour les stations Val d'Aoste en automne (b) Cercle de corrélation pour les stations Val d'Aoste en hiver

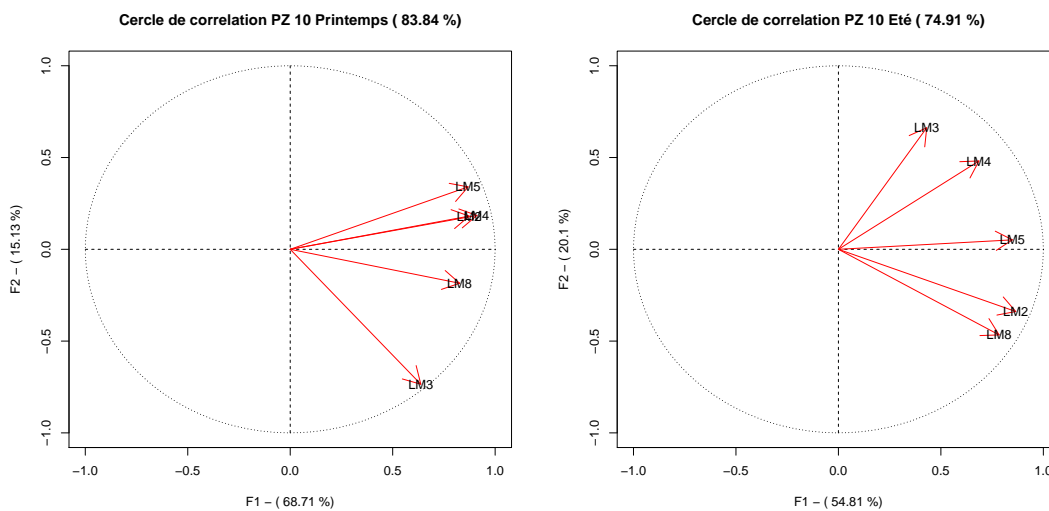


(c) Cercle de corrélation pour les piézomères au printemps (d) Cercle de corrélation pour les piézomères en été

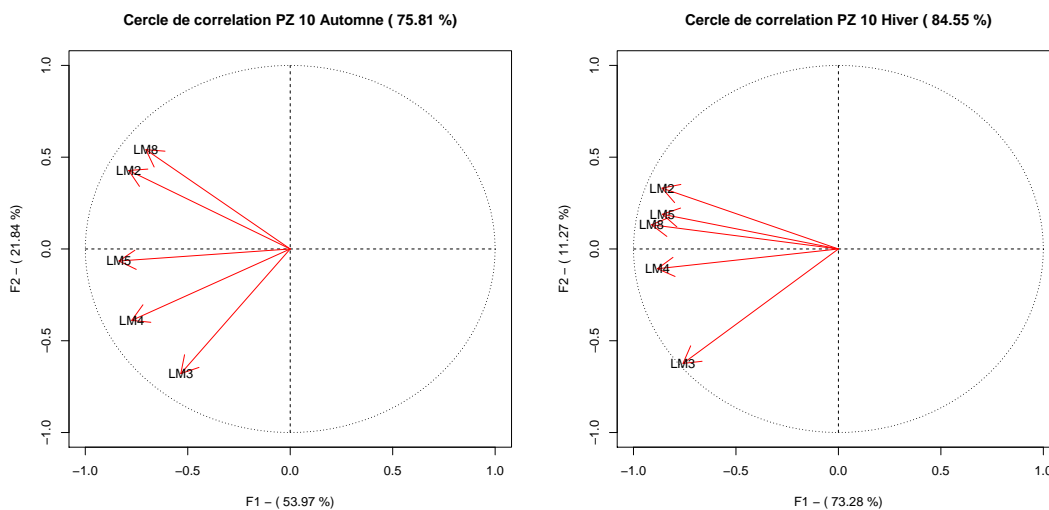


(e) Cercle de corrélation pour les piézomères en automne (f) Cercle de corrélation pour les piézomères en hiver

FIGURE 38 – Corrélations des zones choisies



(a) Cercle de corrélation pour les piézomètres valaisans au printemps
 (b) Cercle de corrélation pour les piézomètres valaisans en été



(c) Cercle de corrélation pour les piézomètres valaisans en automne
 (d) Cercle de corrélation pour les piézomètres valaisans en hiver

FIGURE 39 – Corrélations des zones choisies

A.6 Tendances saisonnières des piézomètres

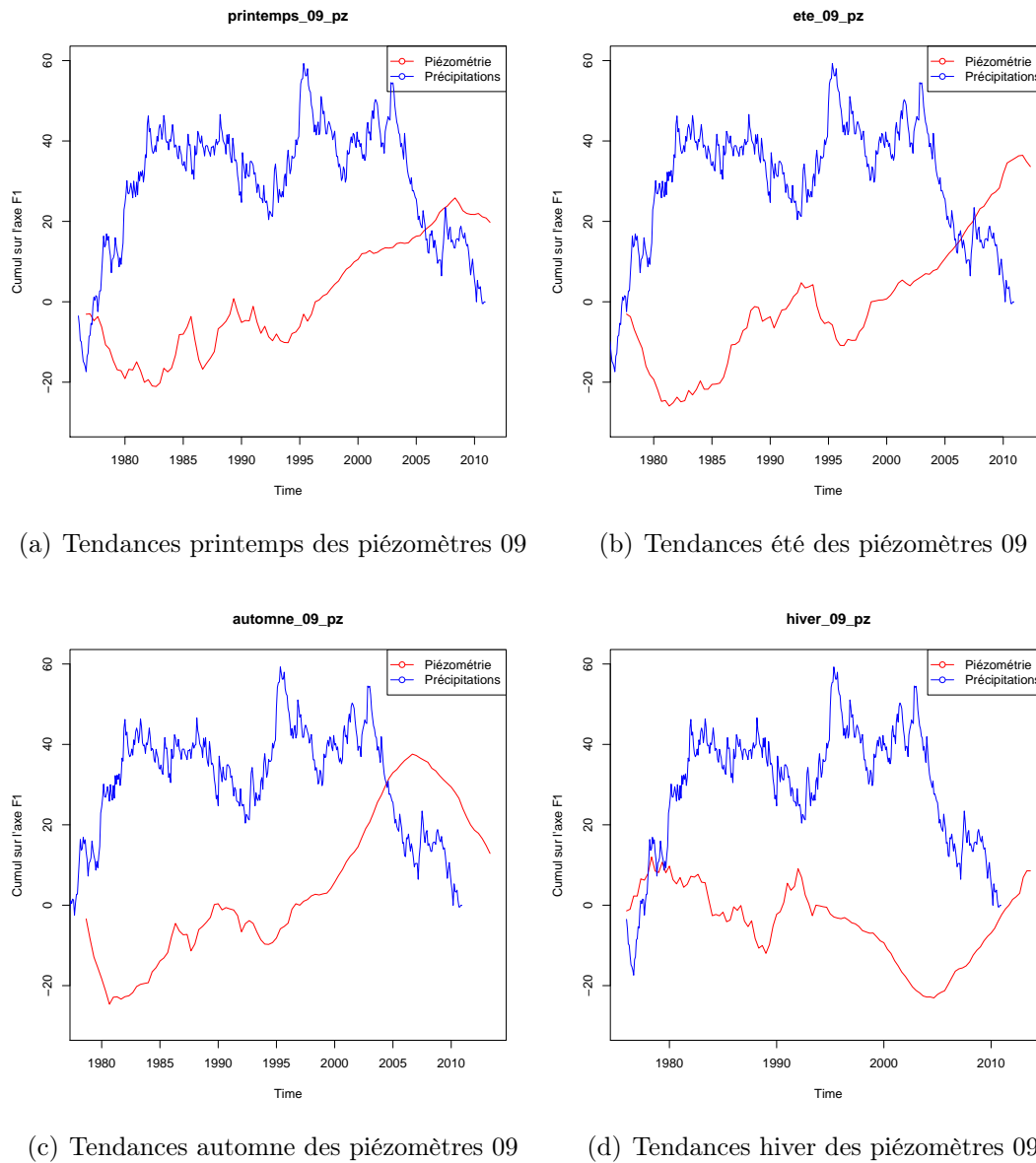


FIGURE 40 – Tendances saisonnières des piézomètres jusqu'en 2009

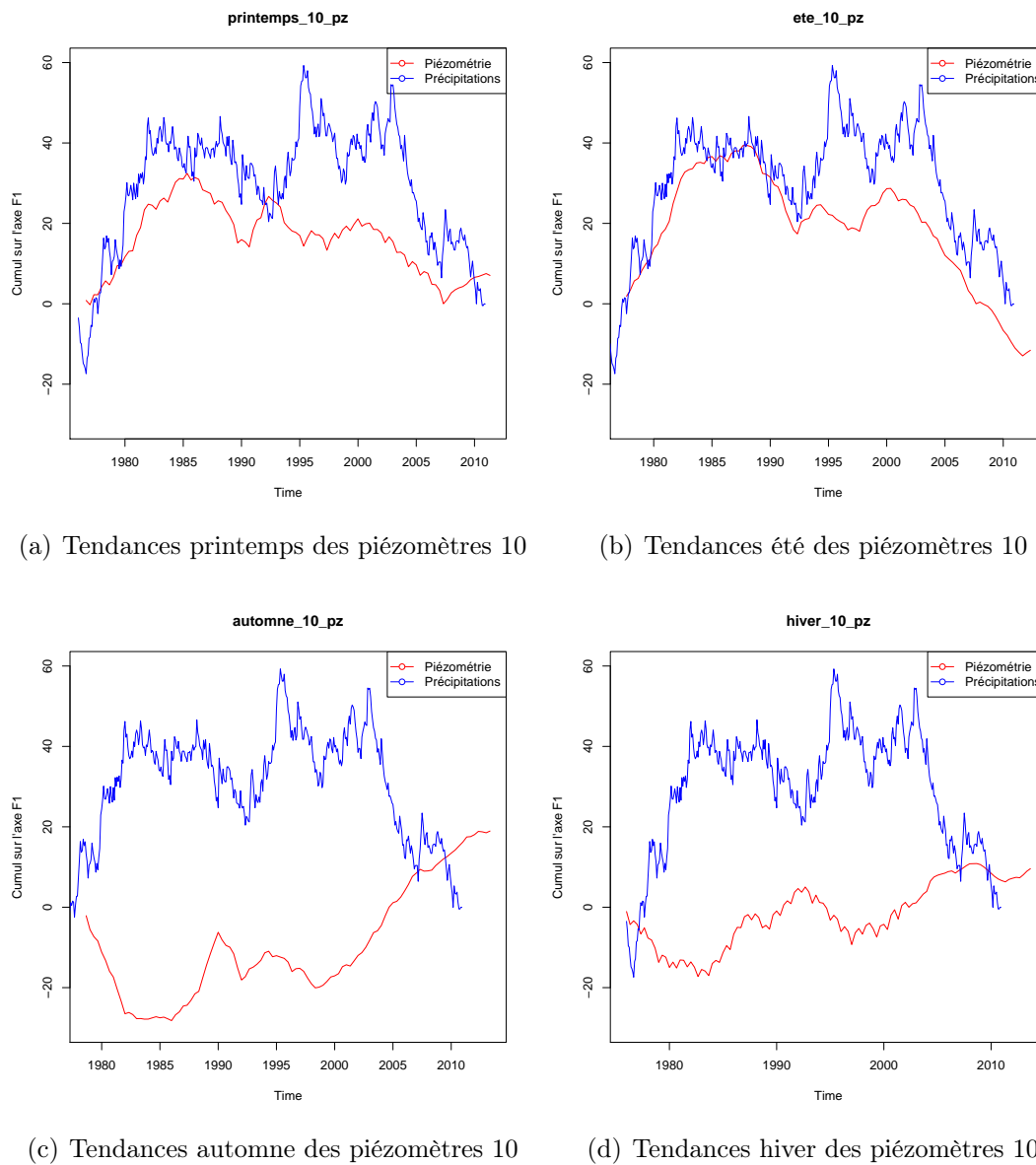
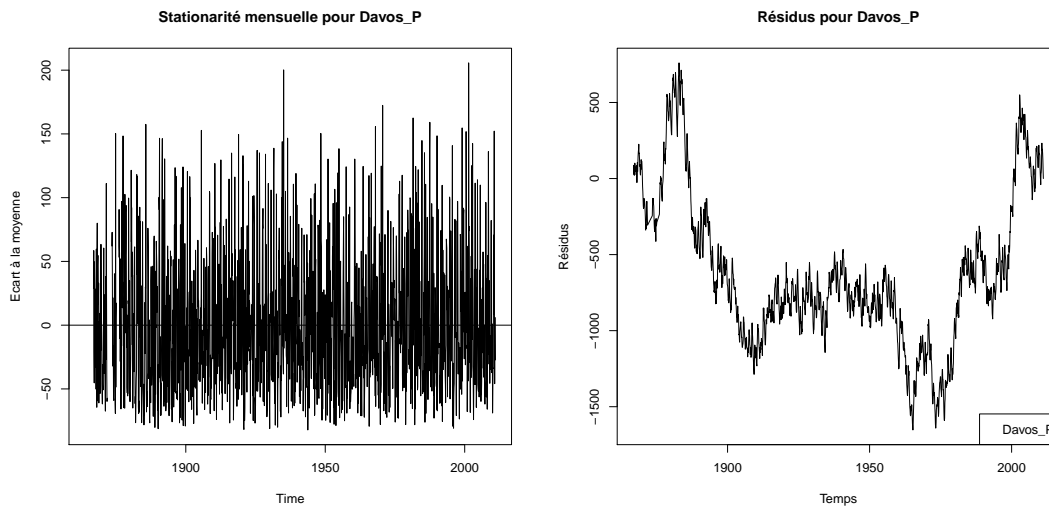


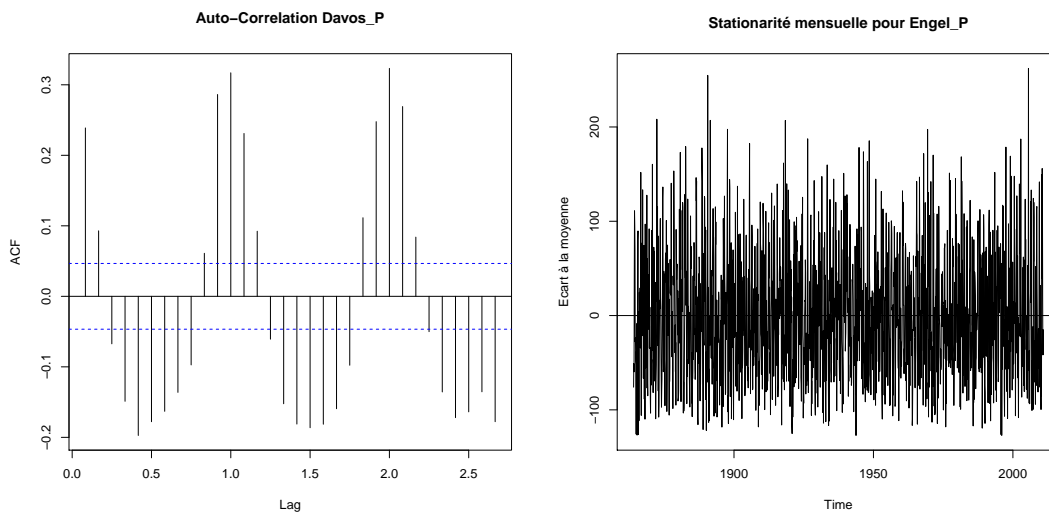
FIGURE 41 – Tendances saisonnières des piézomètres jusqu'en 2010

B Annexes de la partie 5

B.1 Stationnarité des précipitations



(a) Test de stationnarité pour le poste de Davos (b) Distribution des résidus pour le poste de Davos



(c) Variation du coefficient de corrélation pour Davos (d) Test de stationnarité pour le poste de Engelberg

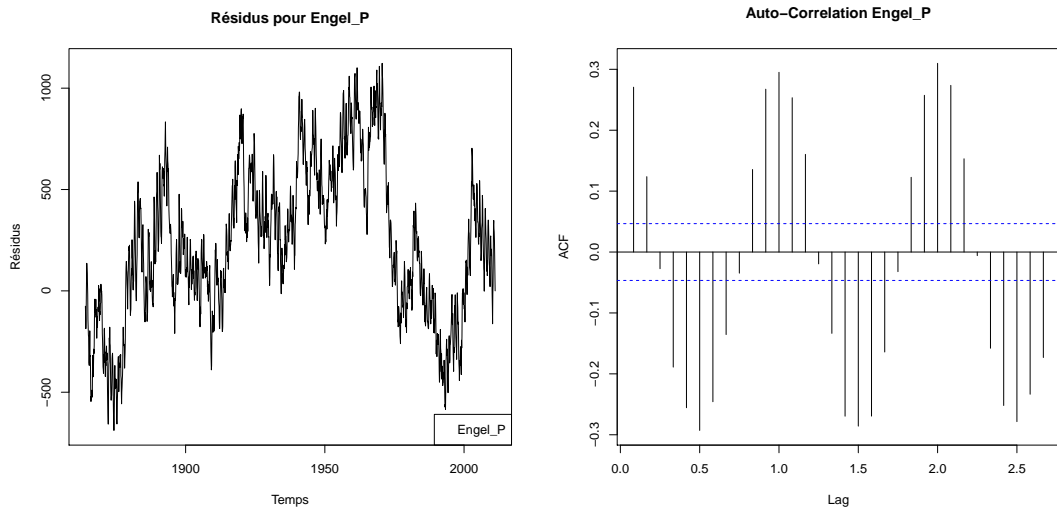
FIGURE 42 – Stationnarité, résidus et autocorrélation des quatre stations

B.2 Stationnarité des températures

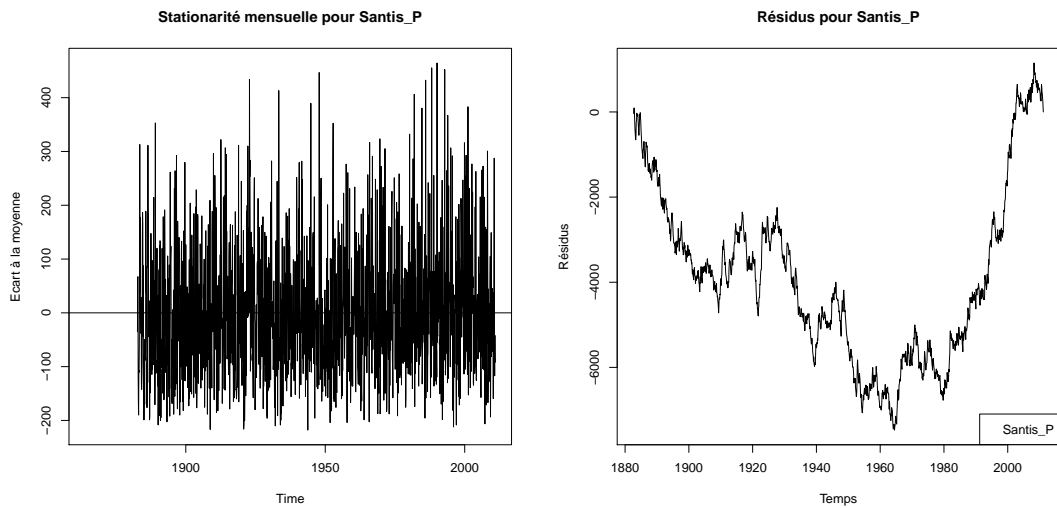
Les graphes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip

B.3 Distribution des précipitations extrêmes

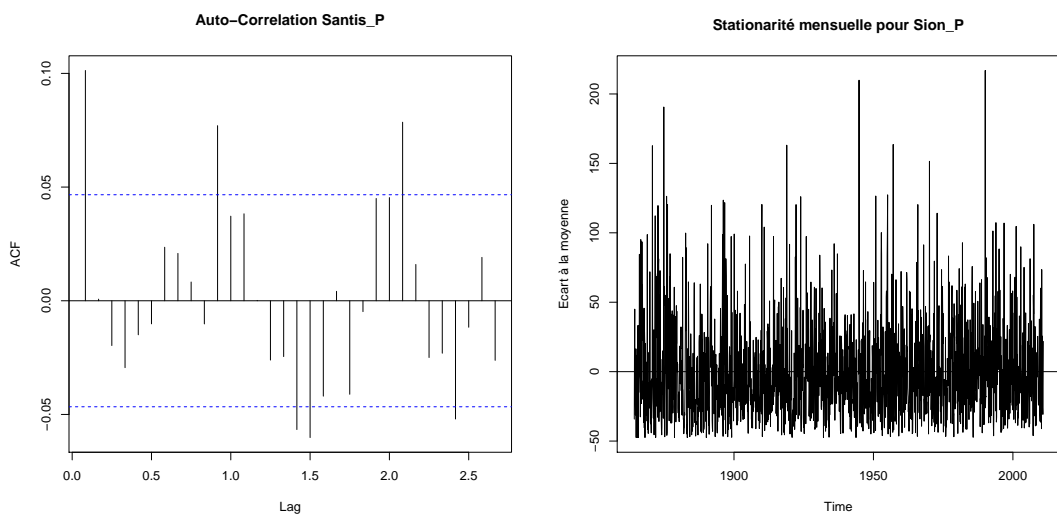
Les graphes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip



(a) Distribution des résidus pour le poste de Engelberg (b) Variation du coefficient de corrélation pour Engelberg

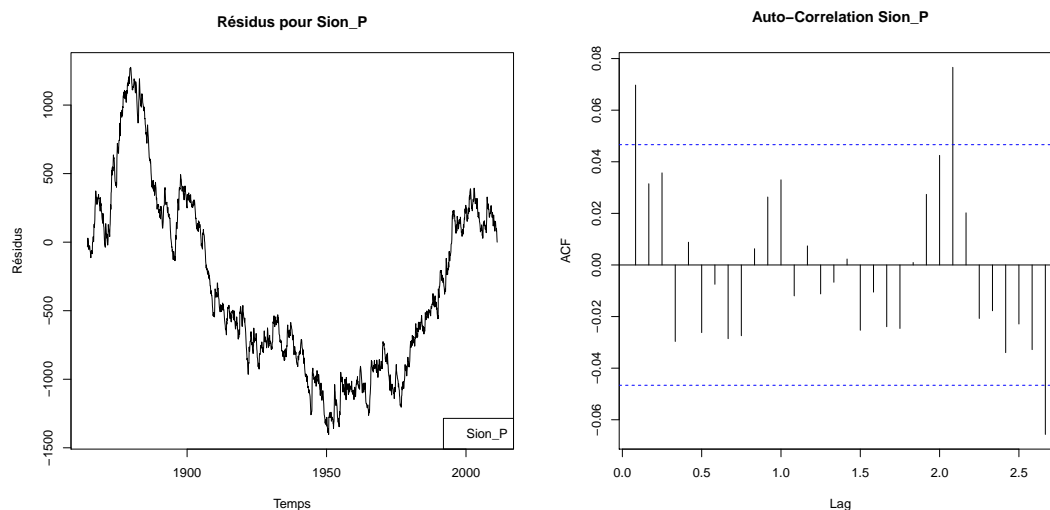


(c) Test de stationnarité pour le poste de Sântis (d) Distribution des résidus pour le poste de Sântis



(e) Variation du coefficient de corrélation pour Sântis (f) Test de stationnarité pour le poste de Sion Sântis

FIGURE 43 – Stationnarité, résidus et autocorrélation des quatre stations



(a) Distribution des résidus pour le poste de Sion
(b) Variation du coefficient de corrélation pour le poste de Sion

FIGURE 44 – Stationnarité, résidus et autocorrélation des quatre stations

B.4 Relation précipitations/retrait glaciers

Les graphes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip

B.5 Corrélation des précipitations et des glaciers avec un décalage temporel

Les graphes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip

B.6 Corrélation des précipitations et des glaciers selon le test de Mann-Kendall

Tableau 6 – Corrélation entre les précipitations à Davos et les valeurs des glaciers alentours

Nom du glacier	Synchronisation	Décalage de 1 an	Décalage de 2 ans	Décalage de 3 ans
Verstancлагletscher	0.036	0.19	0.029	-0.034
Vadret Calderas	0.013	0.05	0.101	-0.15
Vadret da Porchabella	0.07	0.14	-0.069	0.074
Scalettagletscher	0.202	0.036	0.19	-0.04

Tableau 7 – Corrélation entre les précipitations à Engelberg et les valeurs des glaciers alentours

Nom du glacier	Synchronisation	Décalage de 1 an	Décalage de 2 ans	Décalage de 3 ans
Griessenfirn	0.14	0.004	-0.016	-0.21
Firnalpeligletscher	0.103	-0.16	-0.0079	-0.038

Tableau 8 – Corrélation entre les précipitations à Säntis et les valeurs des glaciers alentours

Nom du glacier	Synchronisation	Décalage de 1 an	Décalage de 2 ans	Décalage de 3 ans
Hintersulzfirn	-0.04	-0.064	-0.064	0.013
Plattalvagletscher	0.003	-0.30	-0.015	-0.14
Glaernischfirn	0.002	-0.04	0.15	-0.122
Limmernfirn	0.04	-0.17	-0.0030	-0.077

Tableau 9 – Corrélation entre les précipitations à Sion et les valeurs des glaciers alentours

Nom du glacier	Synchronisation	1 an	2 ans	3 ans
Glacier du Mont Miné	-0.036	0.059	-0.057	-0.053
Glacier d' Otemma	-0.11	-0.037	-0.058	-0.18
Glacier de Moiry	0.063	0.112	0.064	0.013
Glacier de Tsijiore Nouve	0.02	0.00727	-0.0075	0.004
Bas Glacier d' Arolla	0.076	0.05	0.024	0.054
Glacier de Ferpêcle	-0.02	0.07	0.023	0.0029

Tableau 10 – Corrélation entre les piézomètres et les glaciers les valaisans avec décalage

Nom du glacier	Synchronisation	1 an	2 ans	3 ans
Glacier du Mont Miné	0.41	0.37	0.39	0.35
Otemma	0.25	0.10	0.09	0.058
Glacier de Moiry	0.45	0.53	0.56	0.47
Glacier de Tsijiore Nouve	0.56	0.64	0.64	0.57
Bas Glacier d' Arolla	0.52	0.61	0.64	0.60
Glacier de Ferpêcle	0.46	0.54	0.51	0.47

B.7 Piézomètres valaisans versus retrait du glacier, sans décalage

Les graphes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip

B.8 Stationnarité du retrait des glaciers

Les graphes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip

C Annexes de la partie 6

C.1 Stationnarité des précipitations

Les graphes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip

C.2 Graphe de niveau retour des stations suisses

Les graphes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip

C.3 Graphe de niveau retour des quatre stations

Les graphes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip

C.4 Codes R

Les codes se trouvent sur le CD en fin de rapport ou sur www.dedix.net/lilo/pdmcd.zip