

Université de Rouen Normandie
UFR Sciences et techniques



Stage effectué à l' U. R. Argiles, Géochimie et Environnements
sédimentaires (AGEs) à l'Université de Liège

Rapport en vue de l'obtention du grade de la 1ère année de
Master Gestion de l'Environnement, Gestion Durable des
Hydrogéosystèmes

Enregistrements des changements environnementaux dans les sédiments lacustres de Patagonie

au cours des derniers millénaires

PAR : **Jeanne Auboiron**

Sous la direction de DR. NATHALIE FAGEL, Géologue, Professeur

MEMBRES DU JURY:

Responsable Universitaire : Dr. Abderrahim JARDANI, (Hydrogéophysicien,
Professeur)

Tuteur Universitaire : Dr. Maxime DEBRET, (Sédimentologue, Professeur)

Date de soutenance : 8 juillet 2020

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de mon stage, par cette période aussi imprévue qu'elle a été.

Tout d'abord, je tiens à remercier et à exprimer ma gratitude à ma superviseuse de stage, la directrice de l'unité de recherche Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires (AGEs) du Département de Géologie de l'Université de Liège, le Professeur Nathalie Fagel pour m'avoir fait confiance malgré la distance et pour avoir été patiente lors des rendez-vous hebdomadaires en visio-conférence sur un skype un peu taquin. Je la remercie également de m'avoir donné la chance de travailler dans un domaine que j'affecte particulièrement, l'environnement et le paléoclimat et de m'avoir fait voyager en Patagonie tout en restant confinée chez nous. En plus de m'avoir guidé dans mon travail, je lui témoigne ma reconnaissance pour les bons conseils et pour l'expérience enrichissante que ce stage qui m'a permis de vivre.

J'adresse mes remerciements à mon professeur, Mme Sophie Le Bot de l'Université Rouen qui offre à ses étudiants la possibilité de poursuivre leurs objectifs. Je tiens également à citer, mon professeur Maxime Debret pour son écoute et ses conseils qui m'ont permis de cibler mes attentes depuis le début de mon parcours. Je tiens à remercier mon professeur Nicolas Massei de l'Université de Rouen pour avoir pris le temps de m'expliquer le fonctionnement du site Climate Explorer.

Je remercie également Mme Anne-Laure Villeminot et toute l'équipe de l'administration de l'Université de Liège pour leur travail, dans le but que je commence mon stage sans encombre.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont conseillé et relu lors de la rédaction de ce rapport de stage : mon père qui me suit depuis toujours dans mes études, mes amis Romain Gilbert et Béni Bazin pour leurs aides dans le langage R et Maxime Démarest pour m'avoir supporté durant ce confinement.

Je remercie finalement les membres du jury de ce travail de fin d'études (Nathalie Fagel, Maxime Debret, Sophie Le Bot et Abderrahim Jardani) de m'avoir fait l'honneur de donner un peu de leurs temps, pour leurs intérêts et leurs regards critiques sur la reconstruction paléoenvironnementale et paléoclimatique à partir de sédiments lacustres et des données météorologiques de Patagonie.

Structure d'accueil

Le stage a été effectué à l'unité de recherche Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires (AGEs) du Département de Géologie de l'Université de Liège en Belgique, dirigée par le Dr. Nathalie Fagel. Cette unité de recherche est issue du Laboratoire de Géologie des Argiles et Sédimentologie des silicoclastiques dont le créateur n'est qu'autre que le professeur émérite Jacques Thorez.

Ce laboratoire étudie actuellement les sédiments continentaux et marins récents (Quaternaire, < 1 Ma) dans le but de reconstituer l'évolution des environnements et du climat. Leur étude permet d'appréhender les changements climatiques à travers les sédiments tels que des archives sur les changements environnementaux. De plus, le domaine de la minéralogie d'argile est également mise à profit dans la valorisation raisonnée des ressources minérales naturelles. En paléoclimatologie, l'utilisation de la sédimentologie, la minéralogie (principalement sur la fraction argileuse) et géochimie élémentaire et isotopique, permet d'atteindre l'objectif des recherches du laboratoire qui sont axées sur la détermination de l'origine des apports descriptifs et d'identifier les agents de transport et de l'interprétation des fluctuations temporelles de divers traceurs enregistrés dans la sédimentation. L'évolution qualitative et quantitative des signatures minérales y sont étudiées dans le but d'interpréter en termes de variations paléoenvironnementales et/ou paléoclimatiques et ainsi de produire des reconstructions permettant d'affiner et/ou valider les modèles climatiques prédictifs.

L'unité de recherche minéralogie des argiles et paléoclimats constitue un lien direct entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée par le biais de différentes expertises. Ces expertises disponibles sont :

- La **détermination minéralogique** par des fractions des rayons X de la fraction totale et fraction argileuse. Ainsi que la préparation des échantillons et interprétation des spectres ;
- La **granulométrie** par diffraction laser de sédiments meubles max 500 micromètres et la possibilité de décarbonatation préalable. Pour les échantillons contenant des particules supérieures à 500 micromètres, une combinaison possible des méthodes par diffraction laser et par tamisage ;
- L'**induration de sédiments meubles** et préparation de lames minces jusqu'à 140 fois 68 millimètres ;
- Une **campagne de terrain** à la carte ;
- La **préparation d'échantillons** pour analyse chimique en solution.

L'unité de recherche AGEs Argiles, Géochimie et Environnement sédimentaires a démontré ses capacités d'analyse dans le cadre de diverses collaborations internationales avec la France, la Russie, le Chili, le Maroc, le Canada, etc.

Ce stage a été dirigé par Dr. Nathalie Fagel, Géologue et Professeur à l'Université de Liège, experte en sédimentologie, et en géochimie sédimentaire.

Résumé

Ce travail a pour objectif de reconstituer la variabilité climatique et son impact sur l'environnement en Patagonie du nord au cours des derniers millénaires. Celle-ci sera étudiée à partir d'une carotte sédimentaire lacustre localisée au nord du bras est du lac Bertrand (46°55'S 72°50'O) à une profondeur de 21 m. La carotte LBb11A (161 cm) a été prélevée dans un sous-bassin du lac Bertrand en 2011. Elle a été datée grâce à la datation radiocarbone au ^{14}C et au ^{210}Pb , ce qui a permis d'estimer un taux de sédimentation de 2 cm/an. Des analyses géochimiques et sédimentaires ont été réalisées. Les sédiments de ce lac sont composés principalement de silts argileux et de quelques couches de matière organique. La géochimie a montré que les apports du lac sont majoritairement détritiques (> 80%). Quant à l'apport de la matière organique, il provient du bassin versant. Sur base des analyses disponibles, une analyse des corrélations entre les paramètres sédimentologiques et/ou géochimiques ainsi que les données instrumentales a permis d'identifier les traceurs des précipitations. Une analyse multivariée a ensuite permis de reconstituer les précipitations pour la période de temps couverte par la séquence sédimentaire lacustre. Des événements comme le petit âge glaciaire et le réchauffement médiéval ont pu être définis au sein de cette reconstruction. La reconstruction obtenue a été comparée aux informations paléoclimatiques obtenues sur des sédiments lacustres mais également d'autres archives (cernes d'arbres, glacier,...). Globalement la reconstruction sur le lac Bertrand est cohérente par rapport aux connaissances des changements climatiques des derniers 2000 ans. En complément, il serait intéressant d'appliquer la méthodologie sur d'autres séquences lacustres afin d'obtenir une vision plus globale de l'évolution du climat en Patagonie au cours des derniers millénaires.

Mots-Clés : Holocène, Patagonie, Précipitation, Sédiments lacustres, Géochimie

Abstract

The objective of this work is to reconstruct climate variability and its impact on the environment in Northern Patagonia over the last few millennia. The used material is a sediment core retrieved in an eastern arm of Lake Bertrand (46°55'S 72°50'W) at a depth of 21m. The LBb11A core (161 cm) was taken from the main part of Bertrand Lake in 2011. It was dated using radiocarbon dating at ^{14}C and ^{210}Pb , which revealed a sedimentation rate of 2cm/year. Core scanner XRF geochemical and sedimentary analyses X-radiography by SCOPIX were conducted. The sediments of this lake are mainly composed of clayey silts and a few layers of organic matter. The geochemistry showed that the lacustrine inputs are mainly detrital at 82%. The organic matter is mainly of terrestrial origin from the watershed. On the basis of the available analyses, an analysis of the correlations between sedimentological and/or geochemical parameters and instrumental data allowed the identification of precipitation tracers. A multivariate analysis then made it possible to reconstruct the precipitation for the period of time covered by the lake sedimentary sequence. Events such as the Little Ice Age and medieval warming could be defined within this reconstruction. The reconstruction obtained was compared with paleoclimatic information obtained from lake sediments but also from other archives (tree rings, glacier, ...). Overall, the reconstruction on Lake Bertrand is consistent with the knowledge of climate change over the last 2000 years. In addition, it would be interesting to apply the methodology to other lake sequences in order to obtain a more global vision of the evolution of the climate in Patagonia over the last millennia.

Keywords : Holocene, Patagonia, Precipitation, Lake sediment, geochemistry

Table des matières

Introduction	1
1 Cadre de l'étude	2
1.1 Localisation du site d'étude	2
1.2 Contexte géographique et géologique	3
1.3 Contexte climatique de la région des lacs	4
2 Matériel et méthodes	6
2.1 Carottage et analyse sédimentaire	6
2.2 Datation radiométrique	6
2.2.1 Datation ^{14}C et ^{210}Pb	7
2.2.2 Calibration du modèle d'âge	7
2.3 Analyse géochimique	8
2.3.1 Fluorescence des rayons X	8
2.3.2 Silice biogène	8
2.4 Données instrumentales	9
2.4.1 Stations météorologiques	9
2.4.2 Données CRU TS V.3	9
2.5 Exigences statistiques	10
2.5.1 Analyse des Composantes Principales	10
2.5.2 Régression linéaire multiple	11
3 Résultats	13
3.1 Description sédimentaire	13
3.2 Datation de la carotte LBb11-A	14
3.3 Évolution géochimique générale	15
3.4 Données météorologiques instrumentales et prévisionnelles	16
4 Interprétations	18
4.1 Corrélation entre données sédimentologiques et géochimiques et données instrumentales	18
4.2 Reconstruction des précipitations	20
5 Discussion sur la reconstruction	22
Conclusions et perspectives	24
Bilan du stage	24
Bibliographie	24
Annexes	i
Annexe : Matériel et méthodes	i
1 Données instrumentales	i
Annexe : Résultats	iii
1 Évolution géochimique	iii
2 Données météorologiques instrumentales et prévisionnelles	iv

Annexe : Interprétations	v
1 Corrélation entre les éléments caractéristiques de la carotte et les données instrumentales	v
2 Corrélation des données instrumentales	v
3 Analyse des composantes principales	v

Introduction

Les variations climatiques de la fin de l'Holocène sont considérées comme des événements clés pour comprendre le comportement climatique actuel. Cependant, contrairement aux enregistrements de l'hémisphère nord, les enregistrements paléoclimatiques précis de l'hémisphère sud sont encore limités [MEYER & WAGNER 2009; SEPÚLVEDA *et al.* 2009], ce qui crée une incertitude pour les reconstructions climatiques, à l'échelle régionale et mondiale [BERTRAND, HUGHEN *et al.* 2014; PETERS *et al.* 2010; ARANEDA, JANA *et al.* 2013].

La région Aysen, au sud du Chili, a été choisie pour cette étude due à son manque d'information sur ses changements environnementaux et climatiques. Néanmoins, plusieurs auteurs [ELBERT *et al.* 2012; ARANEDA, JANA *et al.* 2013; ÁLVAREZ *et al.* 2015; MORENO *et al.* 2009] indiquent que de petits changements ont eu lieu dans la zone centre-sud au cours de cette période. Ces changements pourraient être principalement associées à des changements dans la force et la position des vents d'ouest, où celles-ci influencent les régimes de précipitations. Les études ont souvent été réalisées à partir de la dendrochronologie [VILLALBA 1994; VILLALBA *et al.* 2001], mais également d'archives glaciaire et sédimentaire [LAMY *et al.* 2001; BERTRAND, BOËS *et al.* 2005; VILLA-MARTÍNEZ *et al.* 2012; FAGEL, ALVAREZ *et al.* 2017].

Malgré les récentes études menées pour approfondir la base de données concernant l'Amérique du Sud, de nombreuses questions restent sans réponse. Cette étude a pour but d'apporter des informations supplémentaires sur le changement climatique en Patagonie. C'est à travers la carotte sédimentaire LBb11-A obtenue en milieu lacustre à l'est du glacier nord de Patagonie que sera déterminé l'érosion des berges du lac Bertrand. Cette information pourra être mise en relation avec les données météorologiques afin de voir s'il y a une corrélation directe ou non. Une étude en amont a été réalisée par SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT *et al.* 2012, sur une carotte sédimentaire provenant du lac principal.

L'objectif est de déterminer des enregistrements des changements environnementaux à l'aide de données géochimiques (XRF), sédimentaires (description et radiographie X par SCOPIX) et un âge modèle sur base de ^{14}C . De plus, la détermination d'une forte variabilité de la silice biogène ou du rapport Si/Al correspond à des variations de la productivité ou des conditions d'érosion du bassin versant ce qui pourrait être en lien avec la température et/ou la précipitation. De surcroît, il serait intéressant de faire un traitement des données pour tester les corrélations entre la météorologie et les données, et ainsi envisager une reconstruction météorologique.

Au travers de cette étude, les résultats participeront à la réalisation d'une base de données supplémentaire concernant le changement climatique de la Patagonie.

Dans le premier chapitre de cette étude, le cadre de l'étude sera présenté avec une description du contexte géographique, géologique et climatique. Une description des matériaux et des méthodes qui ont servi à l'étude pour les analyses géochimiques, sédimentaires et météorologiques, puis statistiques seront résumés. Le troisième chapitre décrit de manière synthétique l'ensemble des résultats. Enfin, une interprétation suivie d'une discussion comparative avec la littérature de ces mêmes résultats seront développées.

1 | Cadre de l'étude

1.1 Localisation du site d'étude

Le lac Bertrand ($46^{\circ}56'S$, $72^{\circ}51'W$) est un lac chilien se situant dans la région d'Aysén. Cette région fait partie du grand territoire sud-américain du cône sud, appelée Patagonie, et qui couvre les régions méridionales du Chili et de l'Argentine (figure 1.1). Ce lac se situe dans un contexte glaciaire à une altitude de 227 m, une superficie de 50 km^2 , et une profondeur maximale de 56 m. En effet, le lac est une ancienne cuvette glaciaire surfondue formée durant les avancées glaciaires du Quaternaire, entouré par la cordillère des Andes [LAUGÉNIE 1982]. Le lac Plomo est un lac pro-glaciaire adjacent au lac Bertrand avec une connexion entre les deux lacs (figure 1.1), limitée par une barrière morainique [FAGEL, BRIX *et al.* 2010].

Le lac Bertrand fait partie des lacs oligotrophes de type morainique de la région des lacs chiliens accompagné à l'ouest par les sommets du Cordón Contreras [RODRIGUEZ *et al.* 2008]. Au sud, il épanche ses eaux dans l'Océan Pacifique. Le bassin versant prend place à l'extrémité sud du lac Bertrand, au sud-ouest du lac General Carrera, d'une superficie de $26\,726 \text{ km}^2$. Il a une alimentation pluvio-nivale caractérisée par une période de hautes eaux due aux précipitations en hiver suivie de la fonte des neiges qui entraîne un renforcement du débit au printemps de l'hémisphère sud. Cette alimentation permet des apports en éléments détritiques importants par le bassin versant [MUÑOZ *et al.* 2006].

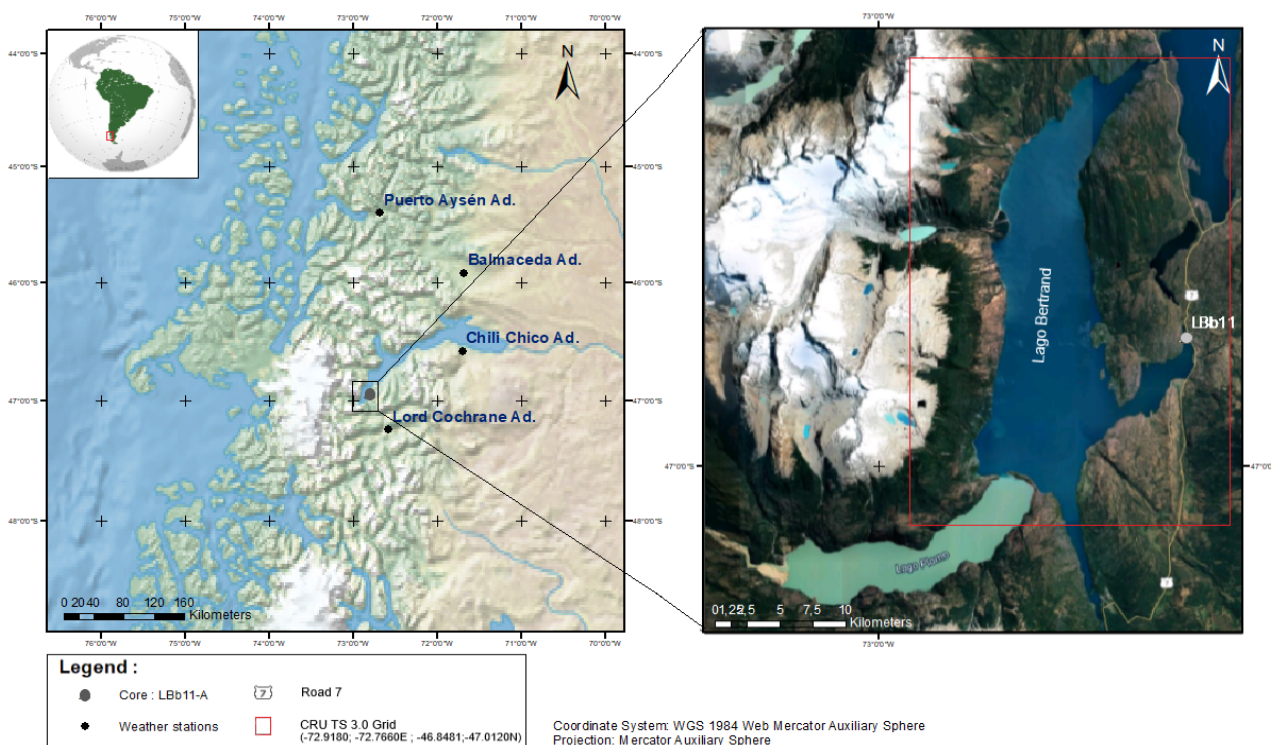


FIGURE 1.1 – Carte de la localisation du site d'étude représentant l'emplacement de la carotte LBb11A ($46^{\circ}55'55,8''S$ et $72^{\circ}47'28,9''O$) prélevée dans le lac Bertrand, les stations météorologiques les plus proches de la zone d'étude, et la grille des données CRU TS 3.0 réalisées autour du site.

Le choix du site pour effectuer le carottage a été effectué dans zone profonde du lac au niveau d'une cuvette repérée par sismique vers 40 m de profondeur. La carotte LBb11A (46°55'55,8"S et 72°47'28,9"O) a été extraite le 26 janvier 2011. Le carottage a été effectué au nord du bras est du lac Bertrand à une profondeur de 21 m, avec des conditions de navigation favorables (figure 1.1) [SACRÉ, FAGEL, LECLERCQ *et al.* 2012].

1.2 Contexte géographique et géologique

Le bassin versant comprend de deux chaînes de montagnes, la cordillère côtière et la cordillère des Andes. Elles sont le résultat d'une subduction se situant principalement sous la plaque sud-américaine. Le soulèvement a eu lieu au Miocène et se traduit par une activité sismique intense et de nombreux charriages vers l'Est (figure 1.2). La cordillère côtière est composée principalement de turbidites métasédimentaires et de roches magmatiques et métamorphiques du Mésozoïque et du Paléozoïque supérieur. La cordillère des Andes se compose de roches batholite patagonien (figure 1.2) à des roches magmatiques calco-alkalines Mésozoïque - Cénozoïque [MAZZONI 2017; GENERAL & ESCOBAR 1982].

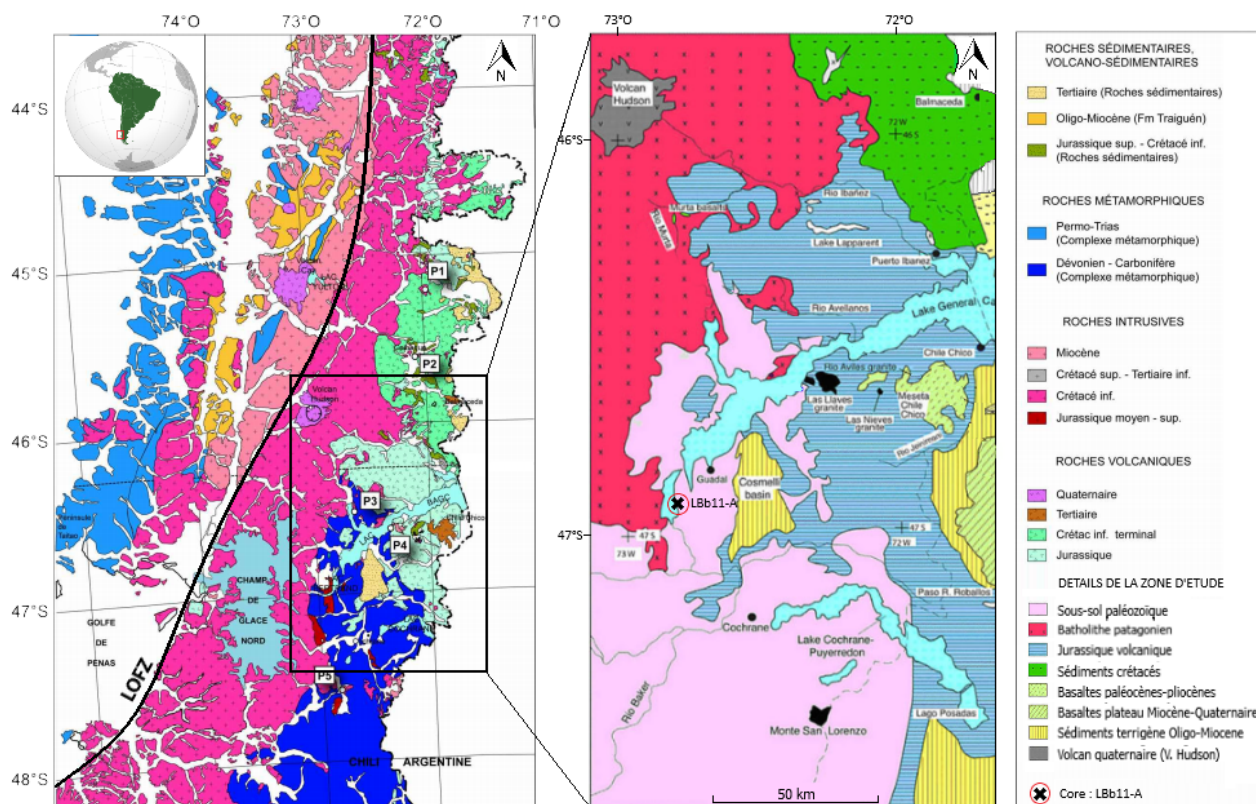


FIGURE 1.2 – Carte géologique (44°S - 48°S) à l'échelle régionale des Andes chiliennes du Sud. À gauche, une carte plus générale de la géologie avec l'emplacement de la calotte glaciaire (Hielo Patagónico Norte). À droite, la géologie du bassin versant du lac General Carrera et le lac Bertrand modifié à partir de GUILLAUME 2008; LAGABRIELLE *et al.* 2004; DE LA CRUZ & SUÁREZ 2006.

Le bassin versant du lac General Carrera alimente majoritairement le lac Bertrand. Il est caractérisé en amont par des roches volcaniques âgées du Jurassique et finit au nord-est du lac Bertrand par un complexe métamorphique du Dévonien-Carbonifère des Andes Orientales. Le nord et l'est du lac est composé d'un sol paléozoïque (figure 1.2). En revanche, au sud-ouest, le lac Bertrand est composé par des roches intrusives de type batholite patagonien âgées du Jurassique moyen supérieur. Au niveau de l'emplacement de la carotte LBb11A, il a été retrouvé des dépôts glaciaires et des porphyres rhyolitiques silicifiés. De plus, autour du lac, des dépôts Holocènes sont définis par des graviers avec des bancs d'arènes et de limons ainsi que des moraines actuelles à

l'ouest du lac et une moraine juvenes entre le lac Bertrand et le lac Plomo [GUILLAUME 2008 ; LAGABRIELLE *et al.* 2004 ; DE LA CRUZ & SUÁREZ 2006].

Les dernières périodes de glaciation ont produit des archipels du littoral (un ensemble d'île) ainsi que des fjords, attestant d'une calotte glaciaire recouvrant l'ensemble de la Patagonie. La Calotte " Hielo Patagónico Norte" ($46^{\circ}30'-47^{\circ}30'S$) se situe à l'ouest de la zone d'étude (figure 1.2), avec une surface de 3900 km^2 aux alentours de 1800 mètres d'altitude. La présence de cette calotte glaciaire engendre un grand taux de ruissellement [FRANCOU & VINCENT 2009 ; VERGARA 1976].

La position du Chili, par rapport à la zone de subduction, est soulignée par le nombre d'événement sismique survenu au cours du dernier millénaire. Le 22 mai 1960, un séisme a eu lieu avec une magnitude de 9,5 sur l'échelle de Richter et représente aujourd'hui un événement historique mondial [CONNES & BLUM 1976]. Ces événements peuvent impacter la sédimentation lacustre par des dépôts instantanés de niveaux grossiers et remaniés.

Au niveau anthropique, la route n°7 ou "Carretera Austral" a été construite à partir de 1986 dans le but de relier la ville de Puerto Montt à Villa O'Higgins. Elle permet d'accéder aux régions d'Aisén et des Lacs. C'est en 1996 que la route atteint le lac Bertrand. Les derniers kilomètres jusqu'à Villa O'Higgins sont achevés en 2000 (figure 1.1).

1.3 Contexte climatique de la région des lacs

Variabilité Climatique actuelle

Le Chili est caractérisé par une variabilité climatique importante. Le Chili peut passer d'un climat désertique au nord dans le désert de l'Atacama à un climat froid de steppe au sud à Punta Arenas. La classification climatique fondée sur les températures et les précipitations est réalisée à partir des travaux de Wladimir Köppen (1900) et montre que le lac Bertrand est soumis à un climat tempéré chaud, sans saison sèche avec un été court et froid (Cfc) (figure 1.3) [PEEL *et al.* 2007]. Ce climat est associé au climat océanique qui se définit par des hivers humides et doux, avec des précipitations plus importantes durant cette saison. En revanche, lors de la colonisation des prairies qui a commencée au XX^e siècle, de grands incendies ont été allumés et ont affecté environ 3 millions d'hectares. Les incendies sont généralement volontaires afin de mettre à disposition des terrains dédiés à l'élevage. Cela a provoqué d'intenses processus d'érosion qui ont considérablement modifié le paysage de nombreuses régions [HEPP *et al.* 2014].

La température moyenne annuelle est comprise entre 8 et 16°C à Bahia Murta ($46^{\circ}S$; $73^{\circ}O$) située à environ 50 km au Nord-Est du lac Bertrand, ce qui équivaut à des étés avec des moyennes comprises entre 22 et 25°C, accompagnés de vagues de chaleur atténuées par les vents dominants, et des hivers avec des moyennes de températures positives, rarement négatives liées à l'influence thermique de l'océan [HEPP *et al.* 2014 ; LOPEZ *et al.* 2008]. Quant aux précipitations, elles varient de 50 à 300 mm/mois, avec un maximum en saison froide liée au passage des dépressions qui se déplacent en bordure du front polaire (figure 1.3).

En effet, les circulations atmosphérique et océanique ont un impact au Chili. Le front polaire est le gradient de température représenté par la formation de la limite entre les masses d'eaux subtropicales et polaires. Il conduit à la position de vents d'Ouest, forts et humides, appelés également les "Westerlies" à une latitude moyenne de $30^{\circ}S$ [SCHWERDTFEGER 1976]. Ils en résultent des précipitations importantes [van GEEL, HEUSSER *et al.* 2000].

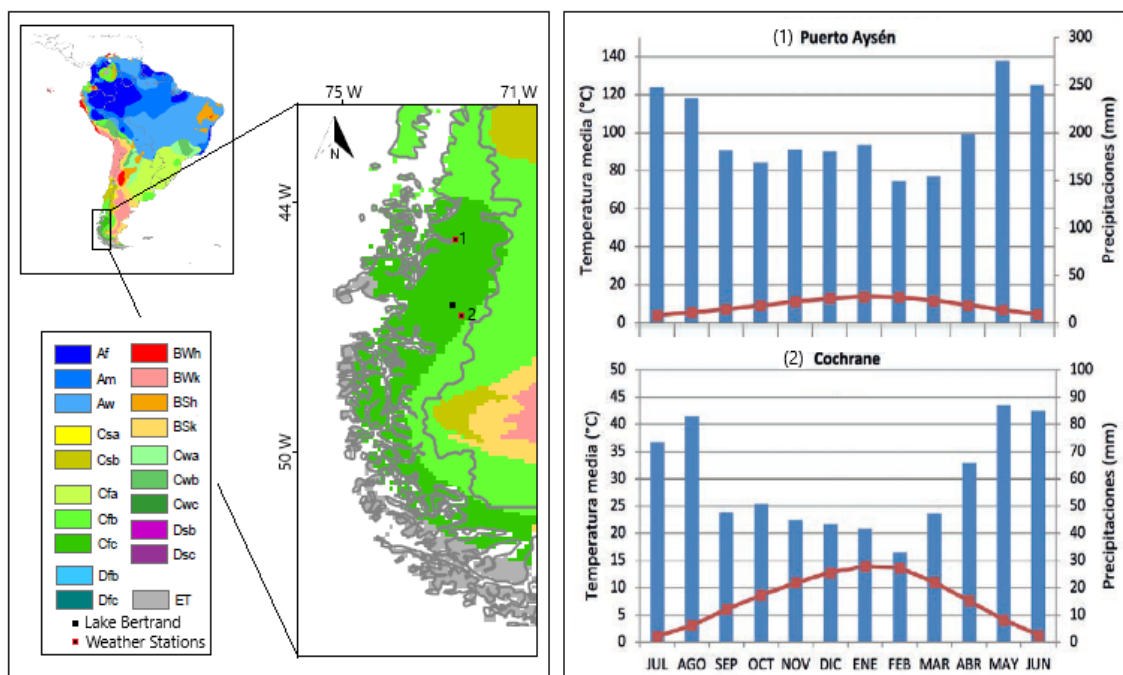


FIGURE 1.3 – Représentation de la variabilité climatique actuelle de la région d'Aysén. À gauche, la classification climatique basée sur les travaux de Wladimir Köppen (1900). À droite, le climatogramme de la localité de Puerto Aysén (45°S ; 72°O) et de Cochrane (46°S 72°O). Les axes des ordonnées de gauche et de droite représentent respectivement les précipitations moyennes mensuelles en mm (bâtonnets) et les températures moyennes mensuelles en °C (courbe noire) (modifié à partir de PEEL *et al.* 2007 ; HEPP *et al.* 2014 ; LOPEZ *et al.* 2008).

De même, les cycles ENSO ou « El Niño-South Oscillation » ont un impact surtout sur les précipitations et les températures annuelles. Lors de la phase El Niño, il est possible de remarquer une période plus sèche due à une perte de précipitations pendant l'été (décembre, janvier et février dans l'hémisphère sud). De se fait, l'apport détritique du bassin versant autour d'un lac est amplement réduit [FAGEL, BOËS *et al.* 2008].

Variabilité climatique au cours de l'Holocène

La variabilité climatique au cours de l'Holocène comprend le petit âge glaciaire ou "Little Ice Age" (LIA) et la période chaude médiévale ou "Medieval Warm Period" (MWP) bien connue dans les archives historiques de l'hémisphère nord. En revanche, les informations concernant l'hémisphère sud sont moindres. Des études ont été menés sur des archives glaciaires, sédimentaires lacustres, dendrochronologiques, et autres qui ont données un préambule de la variabilité climatique de l'hémisphère sud [WILLIAMS & WIGLEY 1983 ; SCHWERDTFEGER 1976 ; MOY *et al.* 2009].

Le petit âge glaciaire est défini entre le XV^e et la fin du XIX^e siècle, caractérisé par un climat froid et humide entre le XIII^e et le XVI^e siècle dans l'hémisphère sud puis sec entre le XVII^e siècle et la fin du XIX^e siècle, ainsi que l'avancée majeure de glaciers [WOLIN & DUTHIE 1999 ; BERTRAND, BOËS *et al.* 2005 ; ARANEDA, TORREJÓN *et al.* 2007 ; BERTRAND, CHARLET *et al.* 2008 ; MEYER & WAGNER 2009 ; URRUTIA *et al.* 2010 ; ARANEDA, JANA *et al.* 2013]. La séparation entre LIA et MWP est définie par un climat plus froid et plus humide entre 1270 et 1660 AD [VILLALBA 1994 ; WOLIN & DUTHIE 1999 ; VILLALBA *et al.* 2001 ; BERTRAND, BOËS *et al.* 2005 ; VIMEUX *et al.* 2009 ; ELBERT *et al.* 2012 ; ÁLVAREZ *et al.* 2015].

La période chaude médiévale précède directement LIA, située entre le IX^e et XIV^e siècle. Elle est marquée par une période chaude entre le IX^e et XII^e siècle [WOLIN & DUTHIE 1999 ; BERTRAND, BOËS *et al.* 2005]. Le réchauffement médiéval est peu marqué dans l'hémisphère sud [XAVIER 2005].

2 | Matériel et méthodes

2.1 Carottage et analyse sédimentaire

La carotte LBb11A a été prélevée dans une zone avec une bathymétrie suffisamment plane, dans le but de maximiser l'homogénéité des sédiments déposés. Effectivement, lorsqu'on prélève près des rives, le risque de perturbation par des effets gravitaires est plus élevé. Le carotte mesurant 161cm de long avec un diamètre de 6 cm a été envoyé à la plateforme d'analyse de carottes sédimentaires à l'UMR CNRS EPOC (5805) au laboratoire EPOC afin d'y apporter une analyse sédimentaire complémentaire à la caractérisation physique, en haute résolution et non destructrice, d'enregistrements sédimentaires.

Dans un premier temps, la carotte est séparée en deux tronçons pour effectuer les analyses, une de 118 cm et une autre de 45 cm. Les $\frac{1}{2}$ sections sont ensuite photographiées après lissage sur le banc photographique qui est équipé d'un appareil Leica Digilux2. L'appareil possède une résolution des images de 100 pixels/cm, relié à un logiciel de pilotage informatique d'un système de banc coulissant offrant la réalisation de photos de grande qualité des enregistrements sédimentaires.

Postérieurement, les $\frac{1}{2}$ sections sont analysées par un système d'imagerie aux rayons X (SCOPIX). L'image SCOPIX est un système de radioscopie RX exploitée pour l'étude des archives sédimentaires. Elles sont obtenues grâce à un système de détection par amplificateur de brillance ainsi que d'une caméra numérique CCD Hamamatsu C4742-95 [LOFI & WEBER 2001]. Les rayons X sont émis à travers un tube (160 KV, 100W, de référence X Neptune-Oxford) supportant une source d'électricité de haut voltage, permettant d'obtenir différentes atténuations qui proviennent généralement de la densité du sédiment. Une faible densité du sédiment correspond à une faible absorption et inversement. De cette manière, lorsque l'image est claire, elle correspond à des sédiments d'une densité plus importante. Ainsi, on obtient une image de la carotte altérant des niveaux gris qui caractérise son comportement sédimentaire à différentes profondeurs. Pour l'étude, les paramètres de réglage de l'instrument étaient de 63 kV et de 10 mA. La possibilité qu'offre la méthode de radioscopie RX est qu'elle accède aux variations de composition, de densité, et de structure, qui peuvent être indiscernables à l'oeil [LAMOUREUX & BOLLMANN 2004].

En amont, une coupe stratigraphique sédimentaire sera réalisée permettant une représentation schématique verticale des différentes caractéristiques de la carotte LBb11A. Cela comprendra sa lithologie, et son log sédimentaires regroupant toutes les indications concernant le milieu de dépôt de la couche considérée.

2.2 Datation radiométrique

Lors d'une étude sur les enregistrements climatiques, la temporalité de nos données est un premier pas pour pouvoir identifier une période historiquement connue. Il existe de nombreuses techniques pour dater une carotte sédimentaire lacustre telle que la téphrochronologie, le comptage des varves, la thermoluminescence ou même les radionucléides pour le récent. La datation de la carotte LBb11A a été réalisée grâce à la méthode radiométrique. Inventée durant le XX^e siècle, cette méthode est basée sur le principe de la désintégration d'isotopes radioactifs d'origine naturelle et/ou anthropique. La période de désintégration radioactive ou période de demi-vie est la

durée qu'il faut à un corps pour se désintégrer de moitié. Par exemple, le carbone-14 (^{14}C) a une demi-vie de 5730 ans et le plomb-210 (^{210}Pb) a une demi-vie de 22 ans [WALKER 2005; COWAN *et al.* 1991].

2.2.1 Datation ^{14}C et ^{210}Pb

La datation par le Carbone 14, qui est un isotope radioactif du carbone noté ^{14}C , est basée sur la mesure de l'activité radiologique du ^{14}C contenu dans de la matière organique dont on souhaite connaître l'âge absolu, à savoir le temps écoulé depuis sa mort jusqu'à environ 50 000 ans correspondant à 10 fois la période de demi-vie [HUGHEN *et al.* 2006]. La période du ^{14}C calculée par Willard Libby est de 5568 ± 30 ans [LIBBY 1951].

Le rapport des isotopes $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans les organismes vivants équivaut à celui de l'atmosphère due aux organismes vivants qui échangent du CO_2 avec l'environnement. Lors de la mort des organismes, il n'y a plus d'échange avec l'environnement ce qui entraîne une diminution de la quantité relative de ^{14}C par désintégration. La quantité de carbone comprise dans un échantillon de matière organique permet de définir l'instant où l'équilibre entre la biosphère et l'atmosphère est rompu c'est-à-dire lors de la mort de l'organisme. De ce fait, la mesure du rapport $^{14}\text{C}/\text{C}_{\text{total}}$ permet une déduction de l'âge est possible. L'âge ^{14}C mesuré doit être calibre pour tenir compte des variations de production de ^{14}C dans la haute atmosphère. Ces variations sont liées à l'activité solaire et à son interaction avec le rayonnement cosmique ou vent solaire [van GEEL, BUURMAN *et al.* 2003]. Les courbes de calibration donnent la relation entre âges non calibrés et âges réels.

La notion d'effet réservoir permet de prendre en compte lorsque la décroissance radioactive se poursuit. C'est le cas quand le ^{14}C est séquestré et isolé des échanges avec l'atmosphère. Ce facteur peut altérer l'âge discernable du sédiment [DEEVEY JR *et al.* 1954; WALKER 2005]. Pour la Patagonie chilienne, des recherches récentes ont permis d'estimer l'effet réservoir à partir d'une jonction entre la correction à appliquer lors de la datation et le rapport azote/carbone des sédiments lacustres [BERTRAND, ARANEDA *et al.* 2012]. Afin de réduire les incertitudes, les datations ^{14}C sont combinées à d'autres méthodes de datation de l'isotope ^{210}Pb pour consolider le modèle d'âge de la partie récente de la carotte [WALKER 2005].

La datation au ^{210}Pb habituellement utilisé pour les sédiments lacustres son l'âge est inférieur à 120 ans (période de $\frac{1}{2}$ vie estimée à 22 ans). Le ^{210}Pb provient de la désintégration du l'uranium-238 (^{238}U), il va hâtivement s'évader de l'atmosphère à travers les précipitations puis finir piégé dans les sédiments lacustres. Le taux de sédimentation est calculé par rapport à la décroissance radioactive du ^{210}Pb présent en excès dans le sédiment par rapport à la composante détritique du ^{210}Pb qui est issu de la désintégration de ^{238}U contenu dans le sédiment. Le ^{210}Pb correspond aux apports atmosphériques. [ROTH *et al.* 1985]. La bioturbation ou des événements instantanés (turbidités, séismes, niveau de cendres volcaniques) sont susceptibles de perturber le taux de sédimentation. Il faut en tenir compte lors de l'élaboration des modèles d'âges.

2.2.2 Calibration du modèle d'âge

La méthode radiométrique permet d'obtenir des dates sur des éléments de matière organique pour le ^{14}C et à partir des mesures d'activité du ^{210}Pb mais uniquement sur quelques niveaux. Une interpolation est nécessaire dans le but d'obtenir l'âge des sédiments entre les niveaux datés.

Le modèle d'âge est basé à partir d'une modélisation "classique" de la profondeur d'âge des dépôts de sédiments datés. Les âges ^{14}C obtenus sont calibrés pour ensuite effectuer une régression entre les niveaux datés. L'interpolation est réalisée selon plusieurs modèles de régression (linéaire, polynomiale, de type "spline" ou "cubic") et le modèle le plus cohérent est choisi par rapport aux changements de taux de sédimentation calculé et les discontinuités lithologiques observées dans la carotte de sédiment.

Le modèle clam est un code R pour la modélisation classique (non bayésienne) de la profondeur d'âge. Il permet de produire des modèles profondeur/âge pour les carottes. L'interpolation choisie est la moyenne lissée, avec un lissage par défaut à 0,3, ainsi qu'un intervalle de confiance à 0,95. La courbe d'étalonnage du ^{14}C est réalisée en fonction de l'hémisphère sud ("SHCAL13.14C"). Les calibrations de l'hémisphère sud sont considérées en raison d'un flux plus élevé de CO_2 dans l'air marin provenant de la plus grande étendue des océans, avec des perturbations temporelles résultant de la force variable du vent dans l'océan austral [RODGERS *et al.* 2011; HOGG *et al.* 2013]. Les âges ont été calculés tous les 5 mm, de 0 à 161 cm. L'échelle de calendrier utilisée est le "before christus/ ano domino" (cal BC/AD), qui a une résolution de 1 an avec un ajustement à 6,7. Cela fait une carotte avec 2000 ans d'histoire à raconter. L'âge réservoir déduit du rapport C/N est de 535 ans, cela correspond à l'effet « réservoir fluvial ou lacustre » où chaque bassin hydrographique possède une dynamique du carbone qui lui est propre avec des possibilités d'enrichissement en carbone ancien issu des phénomènes pédogénétiques ou de la dissolution des roches. Les taux sédimentaires sont vérifiés par une régression linéaire simple. Les données ^{210}Pb de la carotte du lac Bertrand permettent de déduire un taux de sédimentation pour la partie récente de la carotte de 0,2 cm/an, ce qui donne un siècle en 20 cm.

2.3 Analyse géochimique

2.3.1 Fluorescence des rayons X

L'analyse des composants géochimiques de la carotte LBb11A a été réalisée tous les 0,5 cm à l'aide d'un XRF core scanner équipé à l'UMR EPOC. L'appareil effectue une analyse automatisée par fluorescence X de la composition chimique des éléments mineurs et majeurs (Al à U) des dépôts sédimentaires à haute résolution. La surface du sédiment a été recouverte avec un film ultralène de 4 mm d'épaisseur pour éviter toute contamination de l'instrument et éviter le dessèchement de l'échantillon. La méthode est non destructive, le sédiment peut être utilisé pour des analyses ultérieures. Les résultats restent semi-quantitatifs, tout en offrant des enregistrements fiables de la variabilité relative de la composition élémentaire [LAMOUREUX & BOLLMANN 2004].

Ainsi, l'évolution de la composition chimique des archives sédimentaires permet d'étudier la variabilité climatique et hydrologique à échelle locale, régionale et globale, mais aussi l'information sur la différence des mécanismes érosifs et des mécanismes de transports responsables de la formation sédimentaire.

2.3.2 Silice biogène

L'extraction de la silice biogène est utilisée dans cette étude dans le but d'estimer la productivité primaire du lac [CONLEY & SCHELSKE 2001]. Cette manipulation a été réalisée par Joël Otten à l'Unité Hydrogéologie et Géologie de l'environnement à l'Université de Liège. Elle consiste à prélever des sédiments à l'aide de solution alcaline à chaud (NaOH ou Na_2CO_3). Au cours de ce traitement, une hypothèse forte est imposée, l'aluminium mesuré provient en réalité de la dissolution des silicates. Afin de réduire les erreurs de sur-interprétation, le rapport Si/Al est mesuré à partir d'échantillons de sols prélevés dans le bassin versant [COLMAN *et al.* 1995]. Après le séchage des échantillons, l'élimination de la matière organique et la dissolution des carbonates à l'aide de HCL, les échantillons sont passés au spectromètre d'absorption atomique pour doser l'aluminium et la silice. La silice terrigène permet de corriger la teneur en silice mesurée et par le rapport Si/Al mesuré selon l'équation :

$$SiO_2^{bio} = SiO_2^{mesurée} - \left(\frac{SiO_2}{Al_2O_3}\right) \times Al_2O_3$$

d'après COLMAN *et al.* 1995.

2.4 Données instrumentales

2.4.1 Stations météorologiques

L'obtention des données instrumentales des températures et des précipitations a été faite sur le site internet 'Dirección meteorológica Chile' (DMC) <http://www.meteochile.cl/>. Pour permettre l'étude des précipitations et des températures à proximité de la zone de prélèvement de la carotte LBB11, la modélisation a été réalisée sur plusieurs stations de la région (figure 1.1). Les météorologues chiliens disposent d'informations historiques, dont la plupart depuis 1950. Ce sont les stations de Puerto Aysén, Balmaceda, Chile Chico et Cochrane qui ont été sélectionnées (figure 1.1, annexes 5.2 et 5.3).

La station de Puerto Aysén est située près de la ville de Puerto Aysén (aérodrome). Elle est située à une altitude de 11 m au-dessus du niveau moyen de la mer ($-45,39944^{\circ}$ S et $-72,67722^{\circ}$ O) dans le fjord d'Aysén. Cette station représente adéquatement la zone humide d'Aysén.

La station de Balmaceda est située dans la ville du même nom (aéroport Balmaceda) et est gérée par le DMC. L'ensemble des informations a été utilisé à partir de 1960. Le lieu correspond aux coordonnées $-45,91278^{\circ}$ S et $-71,69417^{\circ}$ O, avec une élévation de 517 m. La station de Balmaceda est située dans la zone dite des steppes de la région d'Aysén située dans un climat de steppe froide.

La station de Chile Chico est située sur les rives du lac General Carrera, très près de la frontière argentine. Les coordonnées géographiques sont $-46,58083^{\circ}$ S et $-71,69472^{\circ}$ O, et une altitude de 306 m. La ville de Chile Chico est située dans la zone dite de microclimat, qui correspond à de petites enclaves qui présentent des conditions très tempérées, associées à la proximité de grands plans d'eau.

La station de Cochrane est située dans la ville du même nom, à une latitude de $-47,24389^{\circ}$ S et de longitude $-72,59306^{\circ}$ O, et une altitude de 204 m. La ville de Cochrane est située dans la partie sud de la région d'Aysén. Bien qu'elle soit considérée comme zone intermédiaire, elle présente des conditions de pluviométrie plus faible. Elle a un climat tempéré humide intermédiaire et les caractéristiques des sols sont différentes de ceux de la zone intermédiaire du centre et du nord.

Pour le traitement des données de chaque station météorologique, températures et précipitations, une moyenne mensuelle, saisonnière hivernale (Juin-Juillet-Août ou JJA) et estivale (Décembre-Janvier-Février ou DJF) et annuelle a été réalisée dans le but d'observer les tendances temporelles mais aussi d'une station à une autre.

2.4.2 Données CRU TS V.3

Les jeux de données du CRU TS (CRU TS = Climatic Research Unit Timeseries) sont composés de séries chronologiques mensuelles de températures maximales et minimales en degrés Celsius, de précipitations, et de couverture nuageuse pour la période de janvier 1901 à décembre 2018 soit un total de 1416 mois, la variable des précipitations est en millimètres par mois (CRU TS3.0 est la version utilisée dans ce rapport). Les données sont récupérées sur le site <https://climexp.knmi.nl/>. L'ensemble de données est quadrillé à une résolution de $0,5 \times 0,5$ degrés, basés sur plus de 4000 enregistrements de stations météorologiques. Dans ce rapport, une étude de tendances est réalisée afin d'observer si les corrélations sont physiquement cohérentes avec d'autres variables provenant de séries de données indépendantes.

Pour cela, un quadrillage de latitude $-46,8481^{\circ}$ N à $-47,0120^{\circ}$ N et de longitude $-72,9180^{\circ}$ E et $-72,7660^{\circ}$ E est réalisé afin d'extraire les valeurs de précipitations et de températures moyennes sur cette zone (figure 1.1).

2.5 Exigences statistiques

2.5.1 Analyse des Composantes Principales

L'analyse des composantes principales (ACP) permet d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des données initiales à partir d'un nombre important de variables quantitatives de n dimensions, dans un espace de dimension réduite en déformant le moins possible la réalité. Plusieurs ACP ont été effectuées sur les résultats géochimiques, sédimentaires, instrumentales et entre eux.

Dans un premier temps, il faut évaluer les ressemblances et différences entre individus (observations). Il y a une ressemblance pour les valeurs proches de l'ensemble n , puis une typologie des objets est réalisée. Ensuite, un bilan des liaisons entre variables est obtenu pour une typologie des variables. L'ensemble des variables est résumé par un petit nombre de variables synthétiques appelées composantes principales. Enfin, l'obtention de la relation entre observations et variables. La transformation des données consiste en une normalisation. Pour que toutes les variables aient la même gamme de variabilité et la même influence dans le calcul des distances entre individus, chaque valeur numérique est centrée par l'écart-type de la variable. L'obtention de l'ACP consiste à transposer un nuage de points situés dans l'espace initial des descripteurs dans un espace réduit où les ressemblances entre objets (distances euclidiennes) sont représentées sur un petit nombre d'axes hiérarchisés où chaque axe est indépendant, la variance est maximale sur le premier axe et diminue selon la hiérarchie des axes [DING *et al.* 2006].

Le schéma de dualité obtenu permet l'utilisation de la projection des variables pour expliquer la projection des individus et inversement (figure 2.1).

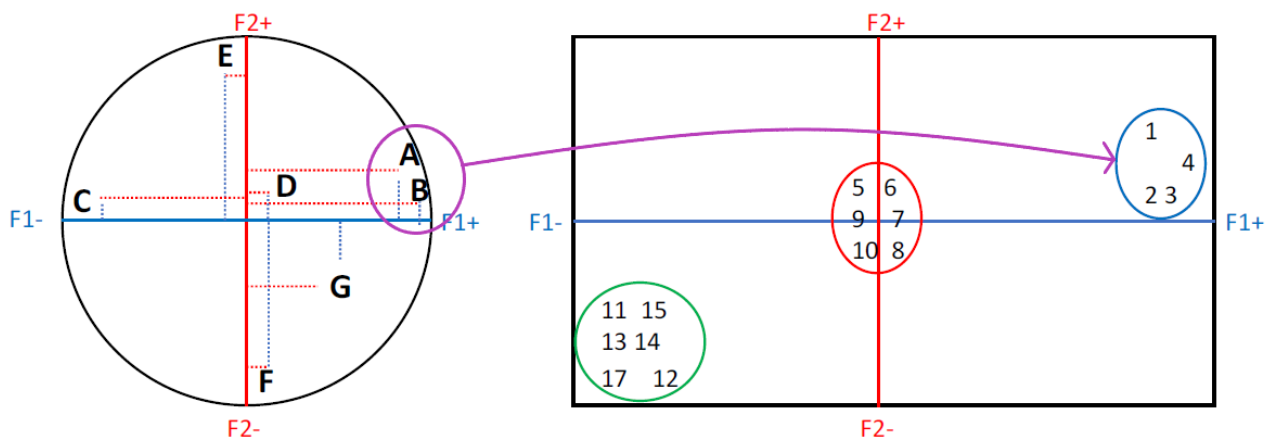


FIGURE 2.1 – Représentation d'un schéma de dualité. À gauche, le cercle des corrélations. À droite, le plan factoriel (repris de Mr Fournier, Méthodologie interprétative d'une ACP, page 2, Université de Rouen, 2019).

De nouveaux individus peuvent être ajoutés dans l'analyse. Par opposition, les individus qui ne sont pas supplémentaires sont dits actifs. Par exemple, lorsqu'une matrice de corrélation comporte deux individus tel que les éléments sédimentaires et géochimiques. De même, les variables supplémentaires peuvent être ajoutées, où certaines variables sont des variables explicatives (composition de la carotte LBb11A) et d'autres des variables à expliquer (données instrumentales). Celles-ci sont introduites à la fin de l'analyse afin de la positionner sur le plan principal.

Les méthodes utilisées pour limiter le nombre de facteurs résultant de l'analyse est la contribution supplémentaire notable à la variance totale du nuage de points observé ($> 65\%$ de l'inertie totale) et la représentation de l'inflexion qui traduit le critère du coude de Catell [SARBU & POP 2005].

L'intérêt de la représentation graphique de l'ACP dans cette étude est le cercle des corrélations. Il représente les corrélations des variables avec les axes principaux. Plus les variables sont proches d'un axe, plus elles y contribuent et plus elles sont proches de la circonférence, mieux elles sont expliquées par le plan factoriel. La coordonnée de la variable sur l'axe représente sa corrélation avec celui-ci. La corrélation de Pearson entre 2 variables correspond à la valeur de leur angle trigonométrique [VIANA *et al.* 2006].

2.5.2 Régression linéaire multiple

Modèle de régression linéaire multiple

Le modèle de régression linéaire multiple part du même principe que le concept de régression linéaire simple. La variable X a été utilisée pour modéliser la variable de réponse Y . Dans la régression linéaire simple, il n'y a qu'un seul facteur qui influence la réponse. Tant dis que pour la régression linéaire multiple il y a plusieurs facteurs. Les modèles de régression multiple décrivent donc comment une variable de réponse unique Y dépend linéairement d'un certain nombre de variables prédictives. Cette méthode convient aux modèles pour lesquels le nombre de paramètres inconnus est important [MOURGUIART *et al.* 1992; ÇELIKTAŞ *et al.* 2013; ANNAN & HARGREAVES 2013].

Un modèle de régression linéaire multiple avec une réponse y sur une période connue et n variables prédictives x_1, x_2, \dots, x_n sur la même période que y , peut être rédigé comme tel :

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n + \epsilon \quad (2.1)$$

où ϵ est les termes résiduels du modèle et l'hypothèse de distribution que nous plaçons sur les résidus et $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ sont les coefficients de régression du modèle qui sont les seuls inconnues.

Dans cette étude, le modèle sera composé de trois variables prédictives et une variable de réponse. Les observations sont des points dans l'espace et la surface est "ajustée" pour se rapprocher au mieux des observations. Dans la pratique, les variables prédictives sont souvent elles-mêmes corrélées. La multicollinéarité fait référence à une situation dans laquelle deux variables explicatives ou plus dans un modèle de régression multiple sont fortement linéairement liées. Si un régresseur était une combinaison linéaire des autres régresseurs, alors la matrice x auraient des colonnes linéairement dépendantes.

L'estimation des paramètres ou coefficients de régression du modèle sont obtenus par calcul de la régression linéaire multiple tout en ajustant les données et calculant les estimations paramétriques. Les coefficients de régression proviennent du lien entre la variable prédictive et la réponse. L'augmentation de la valeur du prédicteur va définir la valeur du coefficient par la variation moyenne de la réponse. La matrice de corrélation correspond à X pour les n prédicteurs du modèle. Celles-ci ne peuvent pas faire la distinction entre les estimations sensibles et non sensibles, de se fait elles sont normalisées.

Les valeurs obtenues de p-value et les coefficients dans l'analyse de régression permettent de déterminer si les relations dans le modèle sont statistiquement significatives ainsi que la nature de ces relations. Les coefficients décrivent la relation mathématique entre chaque variable indépendante et la variable dépendante. Le statisticien Ronald Fisher a introduit les termes de significativité, d'hypothèse nulle. Dans cette approche, la p-value est utilisée pour quantifier la significativité statistique d'un résultat contre l'hypothèse nulle à l'aide des seuils suivants :

- $p \leq 0,01$: très forte significativité ;
- $0,01 < p \leq 0,05$: forte significativité ;
- $0,05 < p \leq 0,1$: faible significativité ;
- $p > 0,1$: pas de significativité.

Les valeurs faibles de p-value pour les coefficients indiquent si ces relations sont statistiquement significatives

et qu'elles doivent être conservée dans le modèle.

Calibration et Validation

Avant toute tentative de reconstruction, afin de pouvoir adapter le modèle et optimiser ses performances en simulant un phénomène réel, les paramètres doivent être estimés en calibrant, paramétrant et optimisant le modèle. Dans un premier temps, il faut procéder à la calibration par optimisation des performances du modèle. Elle est réalisée en comparant les données observées et simulées. La première estimation de la valeur du paramètre est exécutée dans le modèle, obtenant ainsi des valeurs de données simulées qui sont comparées visuellement avec les observations correspondantes. La simulation est répétée jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit obtenue. La procédure d'essai et d'erreur présente l'avantage de permettre un contrôle total par l'utilisateur du processus, de sorte que l'utilisateur gagne en confiance avec le modèle et renforce sa perception des forces et des faiblesses du modèle [FINSINGER & WAGNER-CREMER 2009].

Il faut toujours garder à l'esprit que l'étalonnage oriente le modèle par rapport aux conditions sélectionnées, qui sont celles qui ressemblent aux données observées. Lorsqu'il est appliqué à des situations dites "hors échantillon", le modèle peut fournir des performances moins satisfaisantes par rapport à ce qui ressort de l'étalonnage. Il s'agit d'un problème pratique important, qui peut avoir un impact négatif sur la fiabilité de la conception technique. Par conséquent, il est recommandé de tester le modèle pour vérifier ses performances dans des applications réelles, après l'étalonnage et avant de l'utiliser dans la pratique. Cette procédure de test est appelée validation. Le terme validation est bien connu en modélisation environnementale et est couramment utilisé pour désigner une procédure visant à analyser les performances des modèles de simulation et/ou de prévision [BRATH *et al.* 2006]. Les données observées sont divisées en deux groupes : un groupe est utilisé pour l'étalonnage et l'autre groupe est utilisé pour tester le modèle en émulant une application du monde réel, à savoir en effectuant une application hors échantillon. Ensuite, la procédure est répétée 100 fois et permet d'obtenir un coefficient de corrélation de la validation du modèle.

Reconstruction

Après avoir ajusté le modèle de régression, il faut remplacer les coefficients de corrélations α_n obtenus dans l'équation suivante afin de procéder à la reconstruction :

$$\hat{y} = \alpha_0 + \alpha_1 \hat{x}_1 + \alpha_2 \hat{x}_2 + \dots \alpha_n \hat{x}_n \quad (2.2)$$

où \hat{y} est la réponse sur toute la longueur de la carotte (variable inconnue), \hat{x}_n sont les prédicteurs connus sur toute la longueur de la carotte.

De cette manière, la matrice \hat{y} obtenue représente la reconstruction sur toute la longueur de la carotte à travers les prédicteurs et les coefficients de corrélations de la régression linéaire multiple obtenue précédemment. L'analyse graphique de la corrélation permet de s'assurer que les estimations sont non biaisées. La sortie statistique devra être ensuite interprétée.

3 | Résultats

3.1 Description sédimentaire

La carotte LBb11-A a été photographiée, analysée au SCOPIX, décrite sous forme d'une colonne sédimentaire et de sa lithologie (figure 3.1). La description sédimentaire a pu être réalisée à l'aide de la photographie et d'une pré-analyse effectuée par Vincent Sacré [SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT *et al.* 2012].

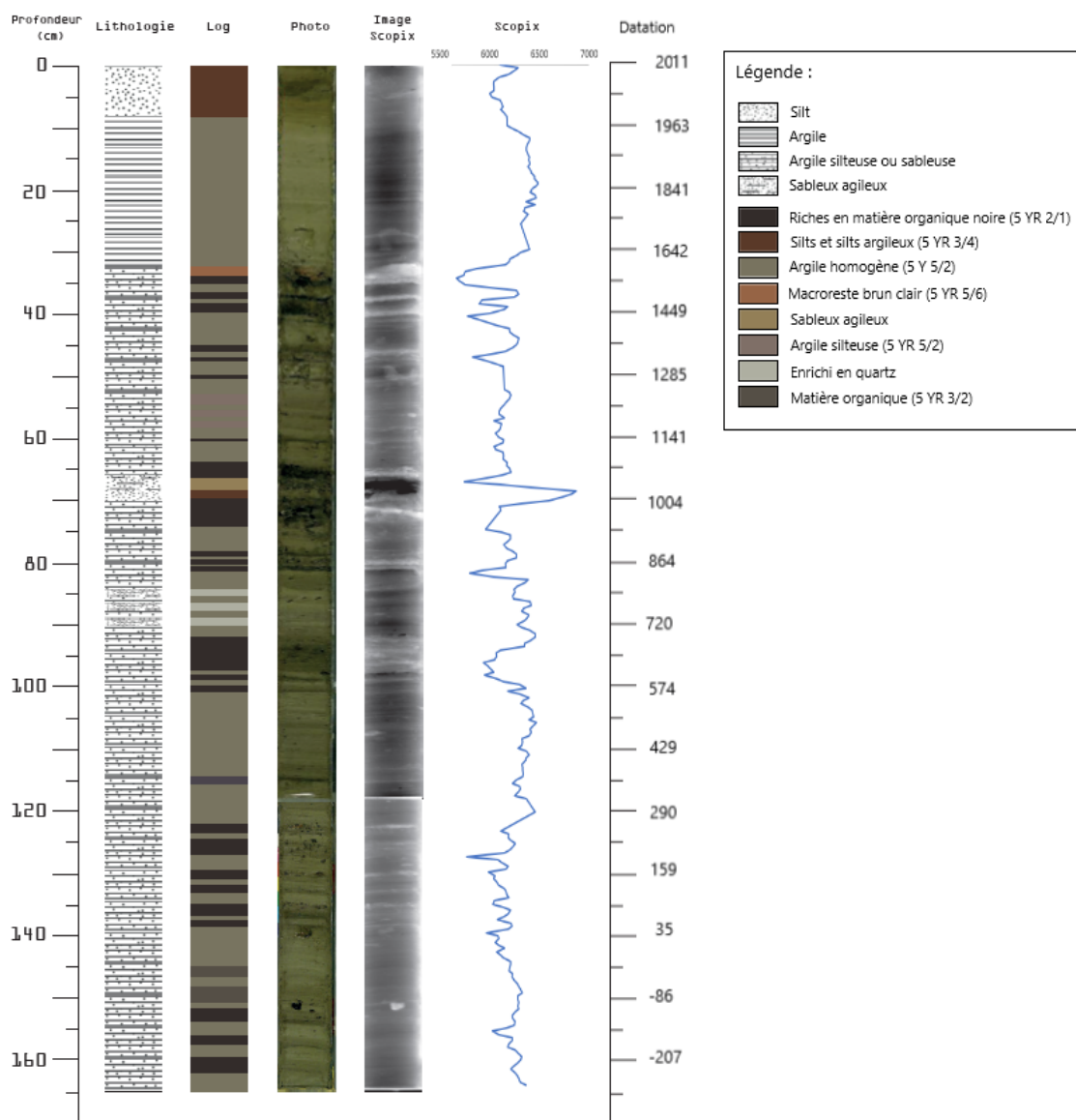


FIGURE 3.1 – Représentation de l'analyse sédimentaire pour la carotte LBb11A. De gauche à droite, la lithologie, le log sédimentaire, la photographie, l'image SCOPIX, et la courbe des valeurs scopix moyennes

La colonne sédimentaire est réalisée d’après le code Munsell (figure 3.1). La carotte est caractérisée par un premier faciès de silts brun foncé (0-7cm), avec quelques morceaux de charbon. La présence de charbon peut s’expliquer par un apport du nord qui est beaucoup plus important lors de fort vent dû à des formations de vagues hautes. De cette manière, l’orientation des vents est en accord avec des apports de la matière organique du nord du bassin versant. De plus, la matière organique d’un lac peut être autochtone ou allochtone. La matière organique autochtone est produite par les organismes aquatiques. La matière organique allochtone est amenée au lac par le bassin versant. Sa quantité reflète les précipitations. Sachant que la valeur moyenne du rapport C/N est de 16,6 ce qui évoque une matière organique majoritairement allochtone [SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT *et al.* 2012].

Ensuite, une alternance entre l’argile brune homogène et des niveaux riches en matière organique noire est observable. Entre 32 et 34 cm, il y a des macro-restes brun clair suivi de matière organique alternant avec l’argile homogène. Entre 53 et 60 cm, il y a une alternance d’argile silteuse et d’argile homogène qu’il est possible de retrouver de 145 à 151. Un niveaux de sable foncé grossier vers 65,5–67,5 cm, suivi de silts argileux, situé entre deux niveaux riches en matière organique. De 84 à 90 cm est observé une alternance d’argile homogène et est suivi de niveaux riche en quartz est perceptible dans la couche de la susceptibilité magnétique [SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT *et al.* 2012].

Les informations SCOPIX montrent une alternance de niveau de gris. Les valeurs hautes du SCOPIX correspondent au fort niveau de gris, et inversement. Cette différence traduit des variations dans l’abondance relative entre la matière organique et les argiles. L’observation précédente permet de dire que lors de niveau SCOPIX plus faible, la carotte possède un faciès plutôt organique et par opposition, un faciès détritique (figure 3.1).

3.2 Datation de la carotte LBb11-A

La datation a été réalisée sur des échantillons de matière organique et de sédiments grossiers, respectivement entre 32,5-34,5 cm, 72-73 cm, 122-123 cm, et 149-150cm (Table 3.1). Ces analyses ont été réalisées par le laboratoire EPOC pour le ^{210}Pb et le ^{137}Cs , et à Gliwice en Pologne (European Center GADAM, SIT, Pologne) pour le ^{14}C . Les échantillons ont, dans un premier temps, été datés en *Before Present* (BP), puis calibrés à l’aide du logiciel OxCal avec un intervalle de confiance à 0,95, tout en prenant en compte l’âge réservoir de 535 ans qui est calculé sur le rapport C/N du lac Bertrand pour la matière organique dans ce lac et la contamination possible due aux sédiments argileux [BRONK RAMSEY 2013]. La datation ^{210}Pb sur les 10 premiers centimètres de sédiments a permis d’avoir une précision plus importante avec une datation effectuée tous les centimètres allant de 2011 à 1963 avec un taux de sédimentation de 2 cm/an (Table 3.1).

Laboratory Code	Material	Core depth (cm)	^{14}C yr BP $\pm l\sigma$	Calibrated age cal. yr BP	Reservoir age
GdA-3158	Wood	32.5-34.5	300 \pm 25	1507 (1649) 1792	none
GdA-3159	Wood	72-73	1070 \pm 25	981 (1055) 1129	none
GdA-3160	Wood	122-123	1780 \pm 25	240 (303) 366	none
GdA-3161	Bulk sediment	149-150	2595 \pm 25	-804 (-676) -548	535

TABLE 3.1 – Datation radiocarbone de la carotte LBb11A

Les données de la datation au ^{14}C sont très linéaires avec un faible taux de sédimentation pour la période récente. Or, la période récente s’accumule plus rapidement et c’est pour cette raison que l’ajout de la datation au ^{210}Pb est nécessaire. Les résultats de la datation au ^{14}C et de celle effectuée au ^{210}Pb permet de réaliser un modèle d’âge par interpolation de type "smooth spline" (figure 3.2). En fonction des âges modèles, c’est l’interpolation

la plus favorable. Le modèle d'âge montre une rupture de pente à l'intersection des deux méthodes de datation soit au dixième centimètre. Les autres méthodes d'interpolation des dates infligent une rupture beaucoup plus abrupte et engendrent une différence importante des dates connues.

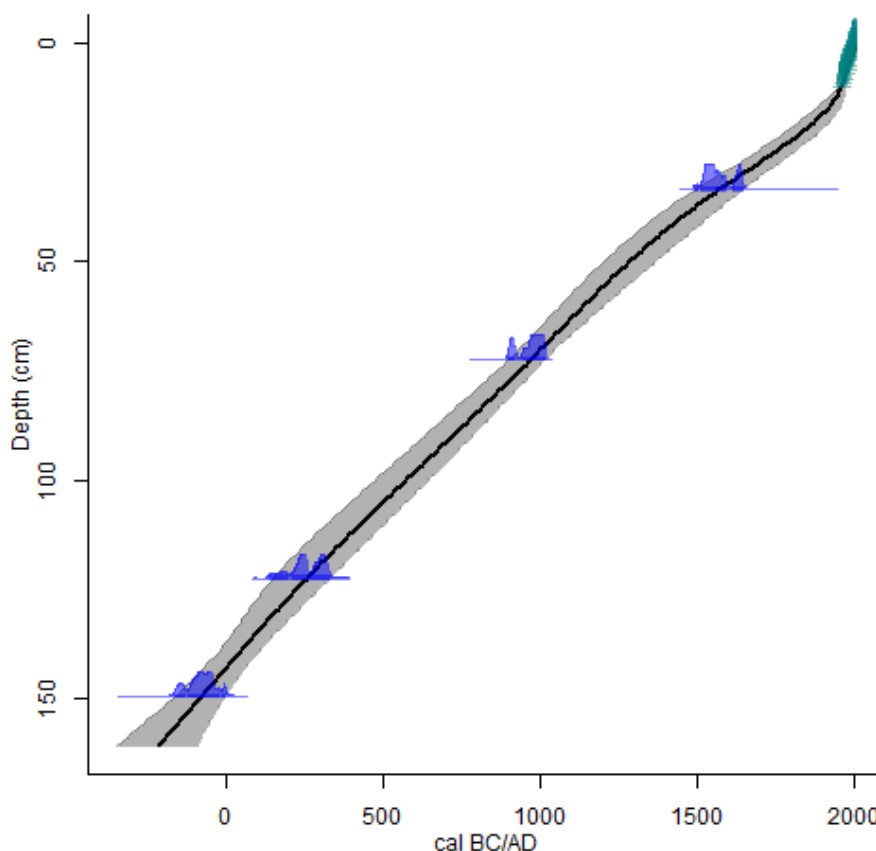


FIGURE 3.2 – Modèle d'âge pour la carotte LBb11A par la méthode d'interpolation spline lissé

3.3 Évolution géochimique générale

L'analyse des éléments géochimiques de la carotte montre une tendance similaire des éléments tels que l'aluminium (Al), la silice (Si), le potassium (K), le calcium (Ca), le titane (Ti), le vanadium (V), le fer (Fe), le rubidium (Rb) et le strontium (Sr), dont leurs interprétations environnementales sont reliées principalement aux niveaux à tendance détritique (figure 3.3, annexe 5.4). Le magnésium (Mn) et le zirconium (Zr) représentent aussi les éléments détritiques, néanmoins les tendances ne sont que faiblement corrélées aux éléments précédents. En revanche, le brome (Br) est utilisé pour observer l'impact biologique ou organique d'un lac [CROUDACE & ROTHWELL 2015].

La silice biogène (SiO_2) corrigée par le rapport Si/Al d'échantillons de sols prélevés dans le bassin versant du lac présente des valeurs négatives suggérant une correction trop importante. Elle a été calculée tous les deux centimètres (figure 3.3, annexe 5.4). Les résultats montrent des valeurs faibles en silice biogène avec une moyenne de 7,2%. L'absence de tendance entre le Br et la silice biogène suggère que le Br refléterait plutôt les variations d'apports de matière organique du bassin versant avec une abondance de diatomées allant de 3 à 4 %. L'essentiel de la silice vient des éléments détritiques et comme il n'y a pas une forte productivité le Br provient principalement du bassin versant lors de vent fort.

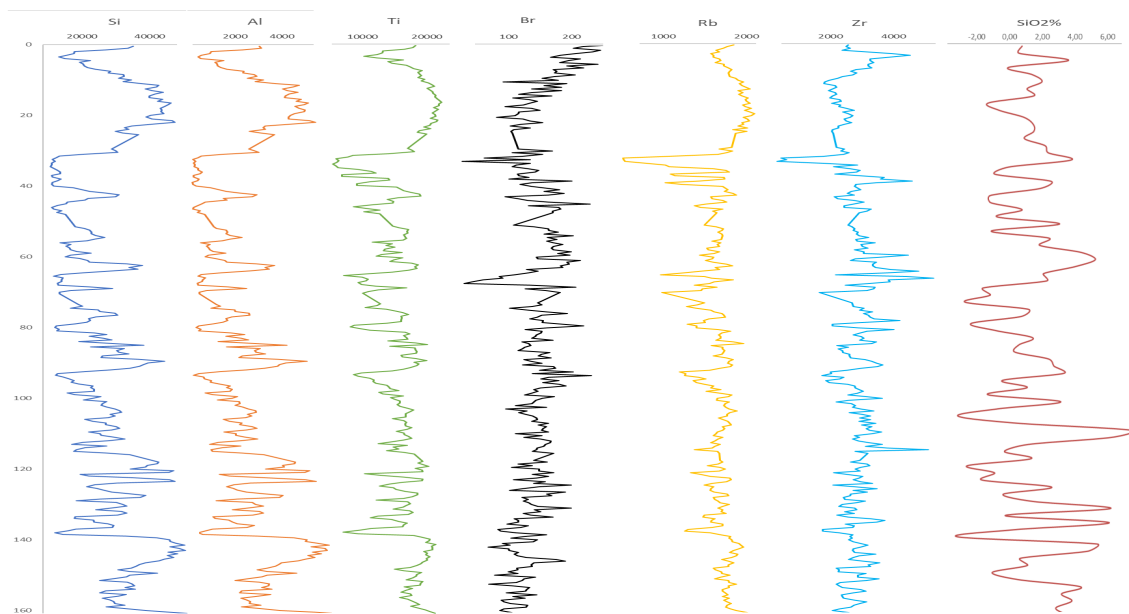


FIGURE 3.3 – Représentation de certains éléments géochimiques obtenus lors de l’analyse XRF

3.4 Données météorologiques instrumentales et prévisionnelles

La classification de Koppen a permis de voir où les stations météorologiques sélectionnées sont positionnées. Parmi elles, deux stations figurent dans la même classification CFC que le lac Bertrand où se situe la carotte. Ce sont les stations Puerto Aysén et Cochrane. Ces 2 stations qui ont été sélectionnées montrent une tendance similaire aux données CRU TS (figures 3.4 et 3.5, annexes 5.5 et 5.6).

La température moyenne à Puerto Aysén est la plus élevée des quatre stations analysées. Elle varie de près de 14°C en janvier jusqu’à 4,1 °C en juillet. La température annuelle moyenne est de 8,9°C. La température minimale annuelle moyenne est de 5,9°C et a une plage de 4,9°C à 6,8°C dans la série d’années analysées. La température maximale moyenne en janvier est de 18°C, avec une plage de 14,3°C à 22,9°C, soit une différence de plus de 8°C. Pour le mois de juillet, le maximum moyen atteint 6,9°C, mais avec une fourchette plus étroite entre les années, de 4,7°C à 9,7°C (figure 3.4).

Pour les précipitations, la ville de Puerto Aysén est située dans la zone humide. La moyenne des précipitations annuelles atteint 2 634 mm dans la période analysée. Il convient de noter que cette station a présenté une période prolongée sans enregistrement, de sorte que les séries de données sont plus courtes que dans d’autres cas. Une répartition assez uniforme de la pluie est observée à travers les saisons entre 20 et 30 % des précipitations annuelles. Puerto Aysén est caractéristique d’un climat tempéré pluvieux (figure 3.5).

La température moyenne annuelle de Cochrane est de 7,8°C, soit un peu moins de celle de Puerto Aysén, avec une variation de 6,8° et 8,9°C. La température annuelle minimale moyenne à Cochrane atteint 3,2°C par an. En janvier, elle atteint 7,9°C et en juillet -1,7°C. La température annuelle maximale moyenne atteint 13,2°C, avec une plage de 11,9°C à 15°C. Au mois de janvier, elle atteint 20,1 °C et jusqu’à 24,7 °C lors des années chaudes. En juillet, elle atteint 4,6 °C en moyenne (figure 3.4).

La pluviométrie annuelle moyenne à Cochrane atteint 702 mm, avec une forte dispersion, d’un minimum de 331 mm à un maximum enregistré de 1 187 mm par an. Le mois le moins pluvieux est février, avec 33 mm en moyenne, tandis que pendant les mois les plus pluvieux, entre mai et août, la pluviométrie est comprise entre 73 et 87 mm. Il est également apprécié que, pour tous les mois, il y a eu des années où la pluviométrie est pratiquement nulle (figure 3.5). En effet, la station de Puerto Aysén est plus humide et la station de Cochrane est plus sèche.



FIGURE 3.4 – Représentation des températures pour les stations météorologiques Puerto Aysén et de Cochrane, et des données CRU TS

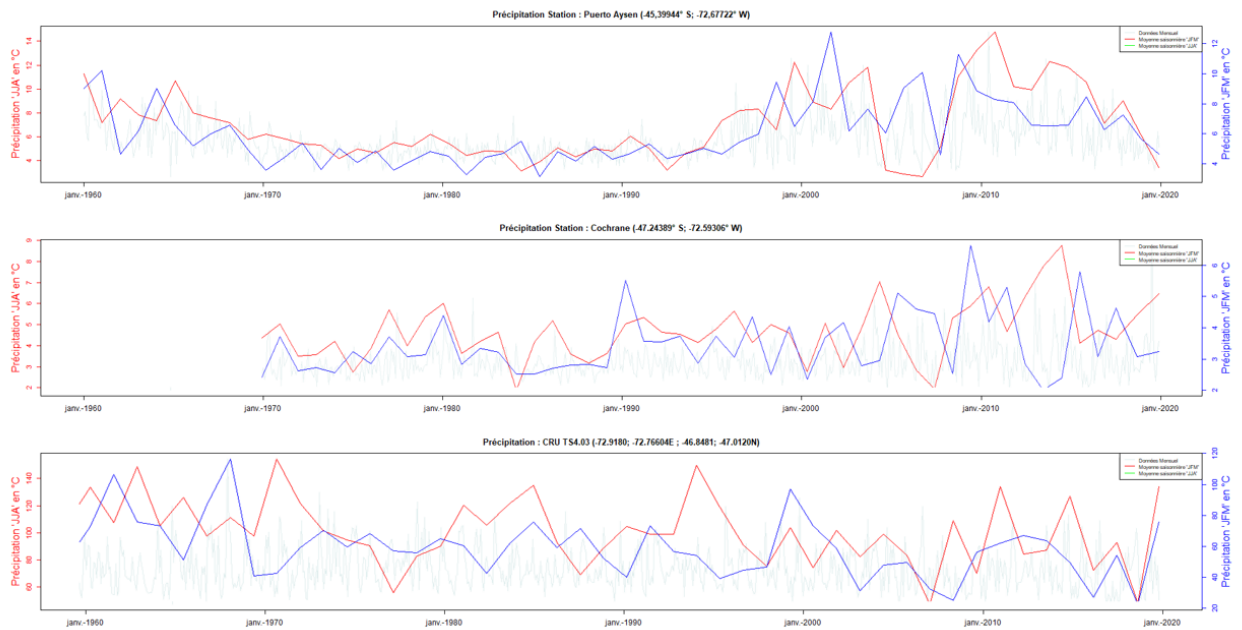


FIGURE 3.5 – Représentation des précipitations pour les stations météorologiques Puerto Aysén et de Cochrane, et des données CRU TS

4|Interprétations

4.1 Corrélation entre données sédimentologiques et géochimiques et données instrumentales

Le but principal de l'étude est de comprendre les variations environnementales et de déterminer si cela est lié à des variations des conditions météorologiques de la zone du lac. La corrélation entre des éléments caractéristiques géochimiques et sédimentaires de la carotte Lb11A et la variabilité instrumentale météorologique de la zone d'étude en prenant la station météorologique Puerto Aysen et Cochrane ainsi que les données CRU TS, va nous permettre de voir l'influence des éléments entre eux (figure 4.1, annexe 5.7).

La plupart des études réalisées à ce jour ont porté sur les enregistrements de matériaux détritiques [CROUDACE & ROTHWELL 2015]. Ces études ont relevé des corrélations positives entre Al, Si, S, K, Ca, Ti, Fe, Rb, Sr et Zr (figure 4.1, annexe 5.7). La fraction détritique de la carotte Lb11A représente une part très importante du sédiment à plus de 82%. Les résultats géochimiques n'ont montré aucune tendance entre la silice biogène et le Br Néanmoins, la corrélation entre la silice biogène et le Br est représentée à 84%. De plus, la silice biogène évoluerait en fonction de la température (91%) et des précipitations (70%), mais aussi du vent (80%). Concernant les données SCOPIX, il existe une corrélation forte entre les éléments détritiques et la précipitation à 85%.

	Al	Si	Br	Rb	Sr	Zr	SiO2	T_PA	P_PA	V_PA	T_C	P_C	V_C	T_CRU	P_CRU	SCOPIX	Si/Al	Ti/Al
Al	1	1,00	0,74	0,91	0,38	0,96	0,25	0,50	0,98	0,02	0,63	0,52	0,78	0,52	0,95	0,95	0,91	0,85
Si	1,00	1	0,75	0,90	0,36	0,96	0,27	0,49	0,99	0,04	0,65	0,50	0,80	0,50	0,94	0,94	0,91	0,88
Br	0,74	0,75	1	0,38	0,35	0,53	0,84	0,21	0,85	0,69	0,99	0,20	1,00	0,20	0,48	0,53	0,46	0,46
Rb	0,91	0,90	0,38	1	0,73	0,99	0,18	0,82	0,81	0,41	0,25	0,83	0,45	0,83	0,99	0,91	0,87	0,84
Sr	0,38	0,36	0,35	0,73	1	0,61	0,80	0,99	0,20	0,92	0,48	0,99	0,28	0,99	0,66	0,91	0,87	0,84
Zr	0,96	0,96	0,53	0,99	0,61	1	0,02	0,72	0,90	0,25	0,40	0,73	0,59	0,73	1,00	0,90	0,91	0,94
SiO2	0,25	0,27	0,84	0,18	0,80	0,02	1	0,71	0,42	0,97	0,91	0,70	0,80	0,70	0,07	0,09	0,17	0,12
T_PA	0,50	0,49	0,21	0,82	0,99	0,72	0,71	1	0,34	0,86	0,35	1,00	0,14	1,00	0,75	0,21	0,25	0,41
P_PA	0,98	0,99	0,85	0,81	0,20	0,90	0,42	0,34	1	0,20	0,76	0,35	0,88	0,35	0,87	0,73	0,52	0,56
V_PA	0,02	0,04	0,69	0,41	0,92	0,25	0,97	0,86	0,20	1	0,79	0,85	0,64	0,85	0,30	0,09	0,54	0,73
T_C	0,63	0,65	0,99	0,25	0,48	0,40	0,91	0,35	0,76	0,79	1	0,34	0,98	0,34	0,35	0,34	0,29	0,33
P_C	0,52	0,50	0,20	0,83	0,99	0,73	0,70	1,00	0,35	0,85	0,34	1	0,13	1,00	0,76	0,85	0,60	0,83
V_C	0,78	0,80	1,00	0,45	0,28	0,59	0,80	0,14	0,88	0,64	0,98	0,13	1	0,13	0,54	0,71	0,96	0,50
T_CRU	0,52	0,50	0,20	0,83	0,99	0,73	0,70	1,00	0,35	0,85	0,34	1,00	0,13	1	0,76	0,34	0,29	0,33
P_CRU	0,95	0,94	0,48	0,99	0,66	1,00	0,07	0,75	0,87	0,30	0,35	0,76	0,54	0,76	1	0,95	0,89	0,88
SCOPIX	0,95	0,94	0,53	0,91	0,91	0,90	0,09	0,21	0,73	0,09	0,34	0,85	0,71	0,34	0,95	1	0,83	0,74
Si/Al	0,91	0,91	0,46	0,87	0,87	0,91	0,17	0,25	0,52	0,54	0,29	0,60	0,96	0,29	0,89	0,83	1	0,93
Br/Al	0,85	0,88	0,46	0,84	0,84	0,94	0,12	0,41	0,56	0,73	0,33	0,83	0,50	0,33	0,88	0,74	0,93	1

FIGURE 4.1 – Tableau de corrélation entre l'aluminium (Al), la silice (Si), le soufre (S), le potassium (K), le calcium (Ca), le titane (Ti), le vanadium (V), le magnésium (Mn), le fer (Fe), le brome (Br), le rubidium (Rb), le strontium (Sr) et le zirconium (Zr), la silice biogène (SiO₂), la température (T), les précipitations (P), le vent (V) pour les stations météorologiques de Puerto Aysen (PA) et de Cochrane (C) ainsi que pour les données CRU TS (CRU) et enfin les données SCOPIX, et les rapports Si/Al et Br/Al

Une étude complémentaire par des analyses à composante principale (ACP) a été réalisée (figure 4.2). Pour déterminer les différents groupes d'éléments, les ACP ont permis, dans un premier temps, de mettre en évidence les éléments détritiques des éléments organiques. Cela a permis de comprendre que malgré la corrélation entre la silice biogène et le Br, la silice biogène n'était pas significative dû à la faible productivité du lac. D'après l'ACP, la silice est contrôlée par l'apport détritique et non par les variations de productivité du lac donc il y aurait plus de silice détritique que de silice biogénique. Les précipitations inversement corrélées au Br suggèrent le rôle des fortes précipitations dans l'érosion du bassin versant et l'apport de la matière organique allochtone. Un niveau d'eau du lac plus élevé peut induire davantage d'érosion du bassin adjacent. Le Br est donc associé à la matière organique du lac Bertrand représentant une part de 10,8% en moyenne, sachant qu'il y a 7,2% de silice biogène au sein de la carotte LBb11A avec un rapport C/N entre 17 et 20 qui confirme que l'apport provient du bassin versant dans le lac Bertrand (annexe 5.10).

Le Zr pourrait refléter les apports grossiers. Il est assez fréquent que le Mn ne soit pas significatif. La matière organique peut être légèrement réductrice avec une éventuelle présence de micropyrrites. Cet environnement réducteur peut engendrer des sulfures de fer (FeS) et dont le S pourrait être à la fois dans la fraction détritique et à la fois dans la fraction organique ce qui pourrait se traduire par un comportement bivalent. Le Sr peut substituer le Ca dans les fractions détritiques (ne s'incorpore pas dans l'opale) et fraction grossière associées au Zr, Br et à la MO. Le Rb est un élément qui est dans les feldspaths, mais il peut substituer le K donc c'est souvent aussi un élément détritique souvent présent dans les fractions plus fines. Les derniers éléments géochimiques confirment leurs caractéristiques détritiques. Grâce à la production des analyses en composantes principales, il est possible de confirmer que le lac Bertrand est principalement détritique.

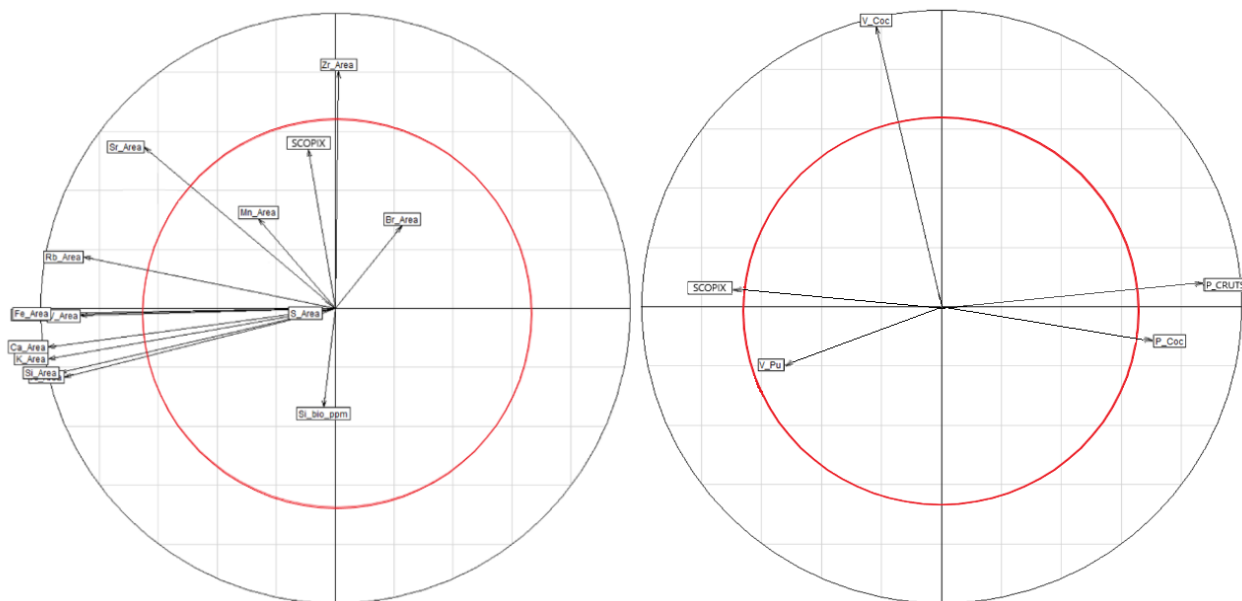


FIGURE 4.2 – Représentation ACP (à gauche) des éléments de la carotte(à droite) avec la météo.

Les stations météorologiques corrént assez bien avec les données CRU TS correspondant à notre grille pour le lac Bertrand. Par exemple, les corrélations avec les données CRU TS, pour les températures (annexe 5.8), il y a une corrélation positive avec les températures de Puerto Aysen à 100%, et pour les précipitations (annexe 5.9), les corrélations sont à 87% avec Puerto Aysen et à 76% avec Cochrane (figure 4.1). Ces dernières relations mises en avant vont permettre d'utiliser les données CRU TS puisque les données des stations météorologiques ne couvrent qu'une période d'une quarantaine d'années alors que les données CRU TS couvrent une période de 117 ans (de 1901 à 2018AD). Il est normal que certaines corrélations météorologiques ne soient pas des plus optimales puisque les stations possèdent une distance non négligeable entre elles et le lac. De plus, les données

CRU TS restent des données recomposées grâce aux différentes données des stations météorologiques à travers le monde.

De meilleures corrélations ont été obtenues lors de la suppression des 20 dernières années (annexe 5.8). La période récente pourrait avoir été perturbée par la construction de la route australe à partir de 1996, ce qui a engendré un taux de ruissellement plus élevé. Celui-ci vient perturber les informations climatiques de la carotte : les 20 dernières années sont à proscrire dans l'étude du changement climatique. La description sédimentaire montre un apport massif de matière organique (MO) dans les premiers centimètres qui pourrait provenir d'un apport du bassin versant dû au ruissellement lors de précipitations.

En complément, la corrélation des données SCOPIX avec les données météorologiques suggère que des valeurs élevées de SCOPIX (niveau clair) correspondent à de faibles précipitations. Néanmoins, le vent n'est pas caractéristique de l'évolution géochimique et sédimentaire du lac. Cela peut être lié à la configuration du site (lac fermé à son extrémité nord). Les résultats permettent de déduire que les précipitations représentent le paramètre météorologique le plus important. En clair, une reconstruction des précipitations est envisageable à l'aide de la composition géochimique et sédimentaire de la carotte. Les éléments détritiques sont plus présents que les éléments organiques. Les paramètres permettant la réalisation de la reconstruction seront les éléments détritiques et les valeurs hautes de SCOPIX.

4.2 Reconstruction des précipitations

La régression linéaire multiple a permis de produire une reconstruction des précipitations à l'aide des paramètres SCOPIX et des rapports Si/Al et Ti/Al qui sont utilisés comme proxy/traceur des précipitations avec une intensité de l'altération (JULLIEN *et al.* 2007 ; ITAMBI *et al.* 2010 ; TISSERAND *et al.* 2009). La reconstruction des précipitations a été réalisée sur la période des données CRU TS connues c'est-à-dire de 1901 à 2018. L'intervalle a été réduit de 1901 à 1996 pour réduire l'effet anthropique dû à la construction de la route. Cela donne une équation de la régression linéaire multiple avec une corrélation des coefficients à 89% sur tout l'intervalle (figure 4.3) :

$$Précipitations_{CRUTS} = \alpha_0 + \alpha_1 SCOPIX + \alpha_2 Si/Al + \alpha_3 Ti/Al + \epsilon \quad (4.1)$$

$$Précipitations_{reconstruite} = 8260.51 + -0.97\hat{SCOPIX} + -90.22\hat{Si/Al} + -490.34\hat{Ti/Al} \quad (4.2)$$

Avant de procéder à la reconstruction sur l'ensemble de la carotte, la calibration/validation est une étape primordiale. La reconstruction répétée à 100 reprises donne une corrélation de 94% (figure 4.3).

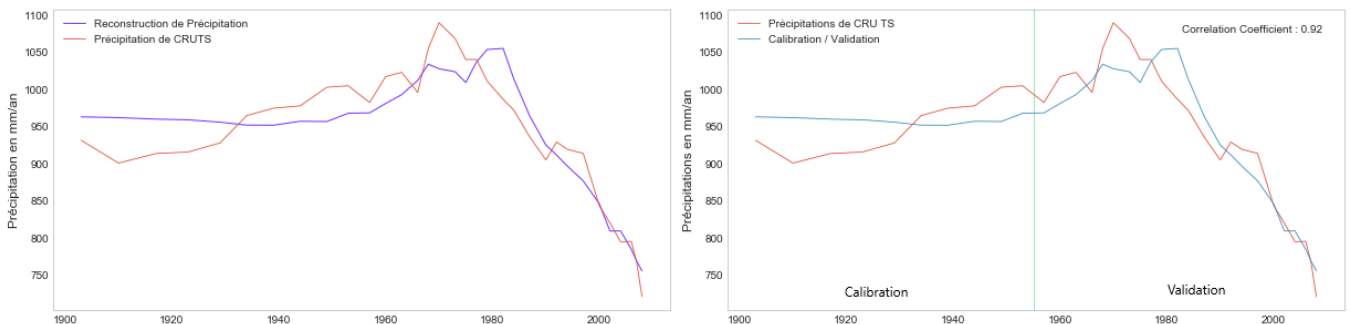


FIGURE 4.3 – Représentation de la reconstruction sur la période connue des précipitations à partir des données CRU TS et des données SCOPIX et géochimique (à gauche) , et de la Calibration et de la Validation pour la reconstruction sur la période connue des précipitations à partir des données CRU TS (à droite).

La reconstruction des précipitations obtenue sur l'ensemble de la carotte a permis de mettre en évidence sept périodes intéressantes sur base des gammes de valeurs des précipitations (figure 4.4). D'après la classification

de Koppen, un climat humide est défini par des précipitations supérieures à 80 mm/mois, soit 960 mm/an et inversement.

De se fait, l'intervalle de -213 à 250AD est un climat humide et chaud avec des précipitations variant entre 1057 à 1385 mm/an qui se traduit par des sédiments plus grossiers et par un apport de matière organique allochtone dans le lac. De 250 à 581AD, les précipitations décroît jusque 842 mm/an avec un apport de matériel détritique majoritaire. De plus, le niveau de lac étant bas, l'érosion devait être plus élevée. Cette période est suivie d'un climat humide jusqu'en 935AD avec des précipitations moyennes de 1010 mm/an, riche en quartz et en matière organique. Sachant que la matière organique provient en majorité du bassin versant, les vents pouvaient être relativement forts. Au alentour de 1025AD, le climat était sec avec apport riche en matière organique et un minimum de précipitation à 642 mm/an.

De 1065 à 1248AD, le climat doux est souligné par une couche de sable. Celle-ci pourrait correspondre à une déstabilisation du bassin versant et un remaniement dû à un mouvement tectonique, de fortes précipitations, une éruption volcanique ou un tremblement de terre. La présence de niveaux de cendres volcaniques est une possibilité. Le réchauffement médiéval pourrait correspondre à la période de 1248 à 1513AD, répondant à un climat sec avec un minimum des précipitations à 638 mm/an.

De 1513 à 1982AD, le climat est dans un premier temps très humide avec un maximum de 1277 mm/an, suivi d'un réchauffement progressif du climat à partir de 1581AD qui souligne une période plutôt sèche. De plus, l'apport qui est principalement autochtone se traduit par une productivité croissante. Cet épisode pourrait correspondre au petit âge glaciaire.

L'intervalle de 2011 à 1982AD est un climat sec avec des précipitations allant de 1042 à 754 mm/an, correspondant à un climat océanique avec un été chaud (Cfb) selon Koppen. Cela pourrait être la réponse du réchauffement climatique global.

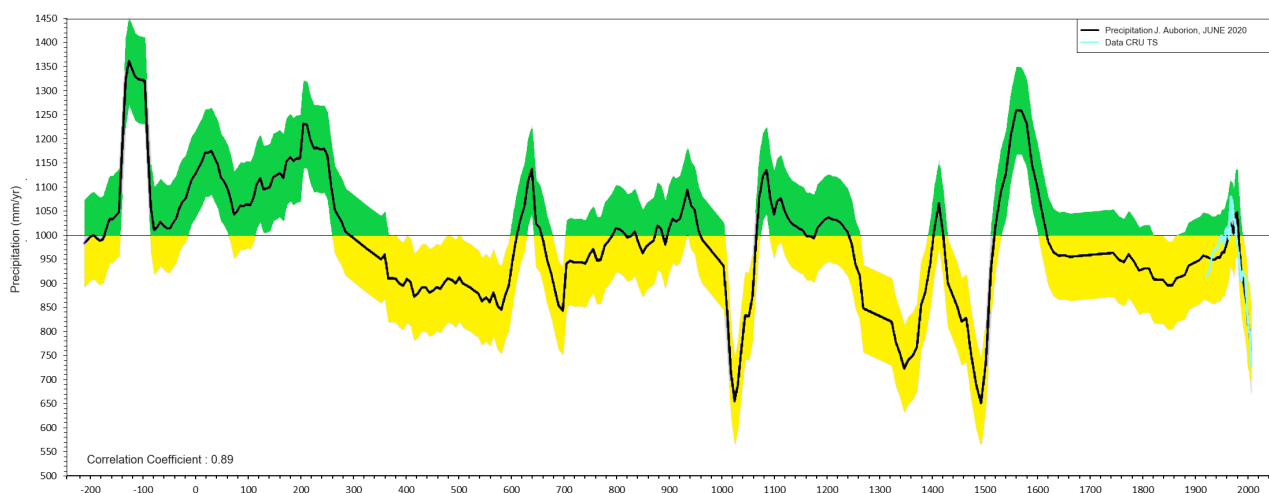


FIGURE 4.4 – Reconstruction des précipitations sur toute la période couverte par la carotte LBb11A à travers les données de précipitations CRU TS et des données SCOPIX et géochimiques par régression linéaire multiple. Le trait plein en noir correspond aux précipitations en mm/an. Le trait plein en bleu correspond aux précipitations des données CRU TS pour le quadrillage de latitude -46,8481°N à -47,0120°N et de longitude -72,9180°E à -72,7660°E. La bande de couleur jaune et verte traduit un climat sec ou humide, respectivement en prenant en compte un intervalle de confiance à 0.95

5 | Discussion sur la reconstruction

Des recherches ont été réalisées ces dernières années pour tenter de reconstruire le climat passé de l'Amérique du Sud. Globalement, la reconstitution obtenue sur les données du lac Bertrand s'accorde avec les données de la littérature, avec un léger décalage qui peut dépendre de la localisation des différentes recherches et/ou de la datation effectuée (figure 5.1).

La période de -213 à 250AD montre de nombreux changements majoritairement en humidité due à l'impact des Westerlies [LAMY *et al.* 2001]. Les lacs les plus proches du site étudié tels que le Lac Cisnes et le lac Augusta montrant également un climat humide pendant cet intervalle de temps [N. GLASSER & JANSSON 2008 ; SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT *et al.* 2012 ; VILLA-MARTI'NEZ *et al.* 2012, ÁLVAREZ *et al.* 2015]. Trois lacs plus hauts en longitude comme le lac Thompson indiquent une période plus sèche à partir de l'an 0 [MARKGRAF *et al.* 2007 ; MORENO *et al.* 2009 ; SACRÉ, FAGEL, LECLERCQ *et al.* 2012]. D'après SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT *et al.* 2012, la silice biogène répond à la variation d'humidité, l'augmentation de la silice serait à mettre en relation avec une chute du niveau du lac et une érosion mécanique accrue.

Pendant la période 250 à 581AD, la reconstruction suggère un climat relativement sec (avec un minimum de précipitation de 842 mm/an), en accord avec les observations de MARKGRAF *et al.* 2007, SACRÉ, FAGEL, LECLERCQ *et al.* 2012 et ÁLVAREZ *et al.* 2015 dans les lacs Pollux, Thompson et Cisnes, malgré une augmentation d'humidité vers 650AD. De plus, le lac Cisnes aurait présenté une évaporation intense durant cette période.

Après cette période, le climat plutôt doux caractérisé par une alternance des périodes humides et sèches entre 700 et 935AD est en accord avec les observations dans les lacs du massif central (eg. lac de paladru) [HORMES *et al.* 2001 ; MAGNY 2004 ; BROCHIER *et al.* 2007]. Les études de l'évolution de la calotte glaciaire située à 46°S-51°O, suggèrent que le climat est humide tel que la fin de cette période [N. F. GLASSER *et al.* 2004].

De 935 à 1040AD, le climat sec observé dans cette étude n'est pas corroboré par d'autres études. De même, concernant la présence de la couche de sable observée entre 65,5 et 67,5 cm correspondants à 1065 de 1248AD. Actuellement aucune information n'était trouvée à ce sujet. Les résultats de MOERNAUT *et al.* 2007 sur l'étude des tremblements de terre à partir du lac Puyehue (40°S-72°O) ne permettent pas de valider l'hypothèse d'un tremblement de terre. Néanmoins, il reste la possibilité d'une déstabilisation du bassin versant et un remaniement dû à un mouvement tectonique ou l'hypothèse de l'influence volcanique. Après cet événement, un climat humide est observé comme pour le lac Cisnes [ÁLVAREZ *et al.* 2015].

Il s'en suit, de 1250 à 1550AD, un climat sec, qui pourrait correspondre au réchauffement médiéval comme MOY *et al.* 2009 ont pu l'observer. Néanmoins, il existe différentes définitions du réchauffement médiéval qui se caractérise comme un événement chaud, parfois interprété comme humide ou sec. De nombreuses recherches ont cependant trouvé des correspondances plus humides [JENNY *et al.* 2002, VILLALBA *et al.* 2001, SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT *et al.* 2012 ; ÁLVAREZ *et al.* 2015]. En revanche, de 1550 à 1650AD, la reconstruction basée sur le lac Bertrand suggère un climat plus humide qui correspond au début du petit âge glaciaire, observé également dans de nombreux lacs du nord au sud, tel que le lac Acuelo, Puyehue, ou encore dans le lac Plomo qui se situe au

sud du lac Bertrand [VIMEUX *et al.* 2009, JENNY *et al.* 2002, BERTRAND, BOËS *et al.* 2005, VILLALBA 1994, SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT *et al.* 2012, ELBERT *et al.* 2012, ÁLVAREZ *et al.* 2015, MOY *et al.* 2009].

Le petit âge glaciaire intervient de 1650 à 1850AD comme un réchauffement progressif du climat, de nombreuses études ont été menées en Amérique du Sud afin d'identifier la présence du LIA dans différentes archives paléoclimatiques. Cette période apparaît majoritairement comme un climat sec et froid qui a pu être observé dans toutes les archives de 33°S à 47°S [[LAMY *et al.* 2001], [JENNY *et al.* 2002], [TORRES *et al.* 2008], [URRUTIA *et al.* 2010], [BERTRAND, BOËS *et al.* 2005], [MASIOKAS *et al.* 2010], [ARANEDA, TORREJÓN *et al.* 2007], [VILLALBA *et al.* 2001], [de OCA *et al.* 2018], [SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT *et al.* 2012], [ARANEDA, JANA *et al.* 2013], (17) ELBERT *et al.* 2012].

Enfin, de 1990 à 2011AD, une période sèche observée pourrait répondre au réchauffement actuel ou à la modification anthropique de l'environnement par l'ajout de la route.

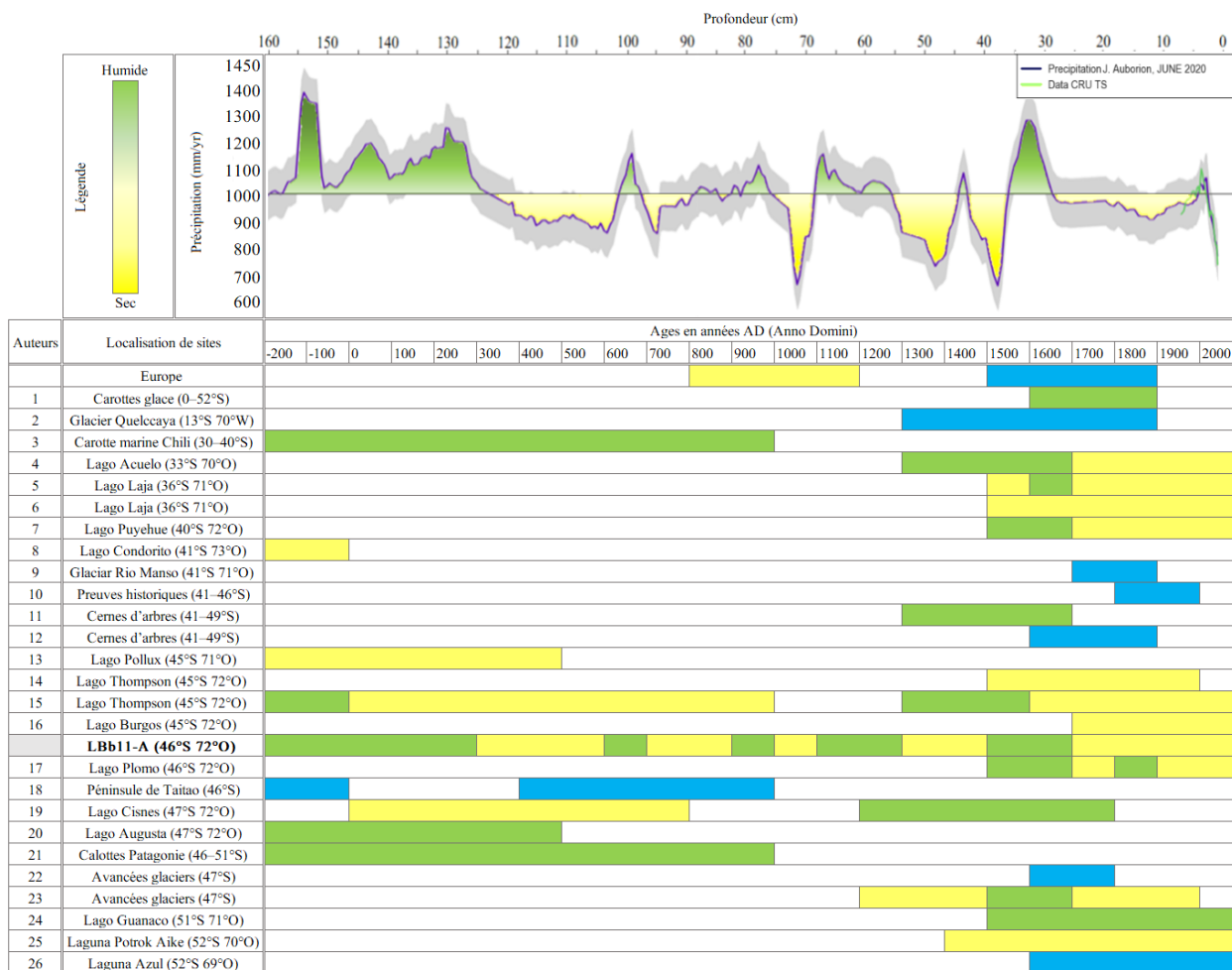


FIGURE 5.1 – Reconstruction des précipitations de cette étude où la couleur jaune et verte traduit un climat sec ou humide en prenant en compte un intervalle de confiance à 0.95. Ci-dessous, une synthèse des changements climatique décrit dans la littérature pour les derniers millénaires pour l'Amérique du Sud : (1) [VIMEUX *et al.* 2009], (2) [THOMPSON *et al.* 2003], (3) [LAMY *et al.* 2001], (4) [JENNY *et al.* 2002], (5) [TORRES *et al.* 2008], (6) [URRUTIA *et al.* 2010], (7) [BERTRAND, BOËS *et al.* 2005], (8) [MORENO *et al.* 2009], (9) [MASIOKAS *et al.* 2010], (10) [ARANEDA, TORREJÓN *et al.* 2007], (11) [VILLALBA 1994], (12) [VILLALBA *et al.* 2001], (13) [MARKGRAF *et al.* 2007], (14) [de OCA *et al.* 2018], (15) [SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT *et al.* 2012], (16) [ARANEDA, JANA *et al.* 2013], (17) ELBERT *et al.* 2012, (18) [SIANI *et al.* 2010], (19) ÁLVAREZ *et al.* 2015, (20) [VILLA-MARTI ´NEZ *et al.* 2012], (21) [N. F. GLASSER *et al.* 2004], (22) [HARRISON *et al.* 2007], (23) , (24) [MOY *et al.* 2009], (25) [HABERZETTL *et al.* 2006], (26) [MAYR *et al.* 2005]

Conclusions et perspectives

L'objectif de cette étude est de comprendre la variabilité sédimentologique et géochimique du lac observée dans la carotte LBb11A sur un intervalle d'environ 2000 ans. La corrélation entre les traceurs sédimentologiques et géochimiques puis leurs corrélations avec les données instrumentales disponibles a permis de déduire les paramètres météorologiques contrôlant les conditions sédimentaires. Ainsi la réalisation d'une régression linéaire multiple a permis de proposer une reconstruction paléoclimatique des précipitations. La reconstruction globale, avec les données de la littérature, confirme l'intérêt de l'approche. En perspective, il serait intéressant de réaliser une approche similaire sur d'autres lacs en Patagonie afin d'obtenir des reconstructions à l'échelle régionale.

Bilan du stage

À l'heure du bilan, mon stage a été une expérience enrichissante et a été un parfait mélange entre la mise en pratique des savoirs acquis lors de ma formation et mon intérêt pour la reconstruction paléoclimatique à travers la sédimentation en milieu lacustre. Travailler sur le climat de la Patagonie m'a permis de découvrir une nouvelle zone de recherche.

Lors de nos rendez-vous hebdomadaires, ma maître de stage a su prendre le temps de m'expliquer le contexte de mon stage et de mes résultats quand parfois je ne les comprenais pas et être attentive à mes propositions de reconstruction. Elle a été présente pour répondre à mes questions et m'a permis de prendre des initiatives et de proposer mes idées. Grâce à ce stage, j'ai développé mes capacités en analyse sédimentaire et géochimique à travers les analyses statistiques. J'ai d'ailleurs eu la chance de pouvoir commencer la rédaction d'un article scientifique.

Je dois avouer que je ne m'attendais pas à m'épanouir autant dans ce stage qui m'a réellement conquis. Celui-ci m'a réconforté dans mon choix professionnel de réaliser un doctorat après mon master.

References

1. ÁLVAREZ, D. *et al.* Late Holocene climate variability on the eastern flank of the Patagonian Andes (Chile) : A ^{18}O record from mollusks in Lago Cisnes (47°S). *The Holocene* **25**, 1220-1230. ISSN : 0959-6836, 1477-0911. <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0959683615580859> (2020) (août 2015).
2. ANNAN, J. & HARGREAVES, J. C. A new global reconstruction of temperature changes at the Last Glacial Maximum. *Climate of the Past* **9** (2013).
3. ARANEDA, A., JANA, P. *et al.* Changes in sub-fossil chironomid assemblages in two Northern Patagonian lake systems associated with the occurrence of historical fires. *Journal of Paleolimnology* **50**, 41-56. ISSN : 0921-2728, 1573-0417. <http://link.springer.com/10.1007/s10933-013-9703-0> (2020) (juin 2013).
4. ARANEDA, A., TORREJÓN, F. *et al.* Historical records of San Rafael glacier advances (North Patagonian Icefield) : another clue to 'Little Ice Age' timing in southern Chile? *The Holocene* **17**, 987-998. ISSN : 0959-6836, 1477-0911. <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0959683607082414> (2020) (nov. 2007).
5. BERTRAND, S., ARANEDA, A. *et al.* Using the N/C ratio to correct bulk radiocarbon ages from lake sediments : Insights from Chilean Patagonia. *Quaternary Geochronology* **12**, 23-29. ISSN : 18711014. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1871101412001112> (2020) (oct. 2012).
6. BERTRAND, S., BOËS, X. *et al.* Temporal evolution of sediment supply in Lago Puyehue (Southern Chile) during the last 600 yr and its climatic significance. *Quaternary Research* **64**, 163-175. ISSN : 0033-5894, 1096-0287. https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0033589400027162/type/journal_article (2020) (sept. 2005).
7. BERTRAND, S., CHARLET, F., CHARLIER, B., RENSON, V. & FAGEL, N. Climate variability of southern Chile since the Last Glacial Maximum : a continuous sedimentological record from Lago Puyehue (40°S). *Journal of Paleolimnology* **39**, 179-195. ISSN : 0921-2728, 1573-0417. <http://link.springer.com/10.1007/s10933-007-9117-y> (2020) (fév. 2008).
8. BERTRAND, S., HUGHEN, K., SEPÚLVEDA, J. & PANTOJA, S. Late Holocene covariability of the southern westerlies and sea surface temperature in northern Chilean Patagonia. *Quaternary Science Reviews* **105**, 195-208. ISSN : 02773791. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0277379114003692> (2020) (déc. 2014).
9. BRATH, A., MONTANARI, A. & MORETTI, G. Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty). *Journal of Hydrology* **324**, 141-153 (2006).
10. BROCHIER, J.-L., BOREL, J.-L. & DRUART, J.-C. Les variations paléoenvironnementales de 1000 avant à 1000 après JC et la question des «optima» climatiques de l'Antiquité tardive et du Moyen Âge sur le piémont des Alpes du nord à Colletière, lac de Paladru, France. *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire* **18**, 253-270 (2007).
11. BRONK RAMSEY, C. *OxCal v4. 2.3. Electronic document* 2013.
12. ÇELIKTAŞ, M. *et al.* Prediction of the quadruple hamstring autograft thickness in ACL reconstruction using anthropometric measures. *Acta orthopaedica et traumatologica turcica* **47**, 14-18 (2013).
13. COLMAN, S. M. *et al.* Continental climate response to orbital forcing from biogenic silica records in Lake Baikal. *Nature* **378**, 769-771 (1995).
14. CONLEY, D. & SCHELSKE, C. *Biogenic silica In : Smol JP, Birks HJB and Last WM (eds) Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3 : Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators* 2001.
15. CONNES, J. & BLUM, P. Résué.—Le séisme du Chili du 22 mai 1960 a été enregistré par trois inclinomètres à marées de l'Institut de Physique (1976).
16. COWAN, J. J., THIELEMANN, F.-K. & TRURAN, J. W. Radioactive dating of the elements. *Annual review of astronomy and astrophysics* **29**, 447-497 (1991).

17. *Micro-XRF Studies of Sediment Cores : Applications of a non-destructive tool for the environmental sciences* (éd. CROUDACE, I. W. & ROTHWELL, R. G.) (Springer Netherlands, Dordrecht, 2015). ISBN : 978-94-017-9848-8 978-94-017-9849-5. <http://link.springer.com/10.1007/978-94-017-9849-5> (2020).
18. DE LA CRUZ, R. & SUÁREZ, M. *Geología del área Puerto Guadal-Puerto Sánchez : Región Aisén del General Carlos Ibáñez del Campo* (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2006).
19. De OCA, F. M. *et al.* Reconstructing recent environmental changes using non-biting midges (Diptera : Chironomidae) in two high mountain lakes from northern Patagonia, Argentina. *Journal of paleolimnology* **59**, 175-187 (2018).
20. DEEVEY JR, E. S., GROSS, M. S., HUTCHINSON, G. E. & KRAYBILL, H. L. The natural C14 contents of materials from hard-water lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **40**, 285 (1954).
21. DING, C., ZHOU, D., HE, X. & ZHA, H. *R 1-PCA : rotational invariant L 1-norm principal component analysis for robust subspace factorization* in *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning* (2006), 281-288.
22. ELBERT, J. *et al.* Quantitative high-resolution winter (JJA) precipitation reconstruction from varved sediments of Lago Plomo 47°S, Patagonian Andes, ad 1530–2002. *The Holocene* **22**, 465-474. ISSN : 0959-6836, 1477-0911. <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0959683611425547> (2020) (avr. 2012).
23. FAGEL, N., ALVAREZ, D. *et al.* Lacustrine record of last millennia eruptions in Northern Chilean Patagonia (45–47°S). *The Holocene* **27**, 1227-1251. ISSN : 0959-6836, 1477-0911. <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0959683616687380> (2020) (août 2017).
24. FAGEL, N., BOËS, X. & LOUTRE, M.-F. Climate oscillations evidenced by spectral analysis of Southern Chilean lacustrine sediments : the assessment of ENSO over the last 600 years. *Journal of Paleolimnology* **39**, 253-266 (2008).
25. FAGEL, N., BRIX, J. *et al.* Un record de 500 ans de changements environnementaux dans le nord de la Patagonie : Lago Plomo et Lago Bertrand (2010).
26. FINSINGER, W. & WAGNER-CREMER, F. Stomatal-based inference models for reconstruction of atmospheric CO2 concentration : a method assessment using a calibration and validation approach. *The Holocene* **19**, 757-764 (2009).
27. FRANCOU, B. & VINCENT, C. Le retrait des glaciers de montagne dans le monde au cours des dernières décennies. *La Météorologie* (2009).
28. GENERAL, D. G. & ESCOBAR, F. *Mapa geológico de Chile, escala 1 : 1.000. 000* (Servicio Nacional de Geología y Minería, 1982).
29. GLASSER, N. F., HARRISON, S., WINCHESTER, V. & ANIYA, M. Late Pleistocene and Holocene palaeoclimate and glacier fluctuations in Patagonia. *Global and planetary change* **43**, 79-101 (2004).
30. GLASSER, N. & JANSSON, K. The Glacial Map of southern South America. *Journal of Maps* **4**, 175-196. ISSN : 1744-5647. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.4113/jom.2008.1020> (2020) (jan. 2008).
31. GUILLAUME, B. *Evolution Cénozoïque des Andes méridionales : approche morphotectonique, géochronologique et apports de la modélisation analogique* thèse de doct. (2008).
32. HABERZETTL, T. *et al.* Environmental change and fire history of southern Patagonia (Argentina) during the last five centuries. *Quaternary international* **158**, 72-82 (2006).
33. HARRISON, S., WINCHESTER, V. & GLASSER, N. The timing and nature of recession of outlet glaciers of Hielo Patagónico Norte, Chile, from their Neoglacial IV (Little Ice Age) maximum positions. *Global and Planetary Change* **59**, 67-78 (2007).
34. HEPP, C., REYES, C. & MUÑOZ, S. R. Analyse des données historiques de cinq stations météorologiques de la région d'Aysén (Patagonie) (2014).
35. HOGG, A. G. *et al.* SHCal13 Southern Hemisphere Calibration, 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon* **55**, 1889-1903. ISSN : 0033-8222, 1945-5755. https://www.cambridge.org/core/product/identifiant/S0033822200048876/type/journal_article (2020) (2013).
36. HORMES, A., MÜLLER, B. U. & SCHLÜCHTER, C. The Alps with little ice : evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps. *The Holocene* **11**, 255-265 (2001).
37. HUGHEN, K., SOUTHON, J., LEHMAN, S., BERTRAND, C. & TURNBULL, J. Marine-derived 14C calibration and activity record for the past 50,000 years updated from the Cariaco Basin. *Quaternary Science Reviews* **25**, 3216-3227 (2006).

38. ITAMBI, A. C., VON DOBENECK, T. & ADEGBIE, A. T. Millennial-scale precipitation changes over Central Africa during the late Quaternary and Holocene : evidence in sediments from the Gulf of Guinea. *Journal of Quaternary Science : Published for the Quaternary Research Association* **25**, 267-279 (2010).
39. JENNY, B. *et al.* Moisture changes and fluctuations of the Westerlies in Mediterranean Central Chile during the last 2000 years : the Laguna Aculeo record (33 50' S). *Quaternary International* **87**, 3-18 (2002).
40. JULLIEN, E. *et al.* Low-latitude "dusty events" vs. high-latitude "icy Heinrich events". *Quaternary Research* **68**, 379-386 (2007).
41. LAGABRIELLE, Y. *et al.* Neogene to Quaternary tectonic evolution of the Patagonian Andes at the latitude of the Chile Triple Junction. *Tectonophysics* **385**, 211-241 (2004).
42. LAMOUREUX, F. & BOLLMANN, J. *Image acquisition.*[In :] P. Francus (ed.) : *Image analysis, sediments and paleoenvironments* 2004.
43. LAMY, F., HEBBELN, D., RÖHL, U. & WEFER, G. Holocene rainfall variability in southern Chile : a marine record of latitudinal shifts of the Southern Westerlies. *Earth and Planetary Science Letters* **185**, 369-382 (2001).
44. LAUGÉNIE, C. *La region des lacs, Chili meridional, recherches sur l'evolution geomorphologique d'un pie-mont glaciaire quaternaire andin* (Universite de Pau et des Pays de l'Adour, 1982).
45. LIBBY, W. Radiocarbon dates, II. *Science* **114**, 291-296 (1951).
46. LOFI, J. & WEBER, O. SCOPIX–digital processing of X-ray images for the enhancement of sedimentary structures in undisturbed core slabs. *Geo-Marine Letters* **20**, 182-186 (2001).
47. LOPEZ, P., SIRGUEY, P., ARNAUD, Y., POUYAUD, B. & CHEVALLIER, P. Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000–2006). *Global and Planetary Change* **61**, 103-116 (2008).
48. MAGNY, M. Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements. *Quaternary international* **113**, 65-79 (2004).
49. MARKGRAF, V., WHITLOCK, C. & HABERLE, S. Vegetation and fire history during the last 18,000 cal yr BP in Southern Patagonia : Mallín Pollux, Coyhaique, Province Aisén (45 41' 30 "S, 71 50' 30 "W, 640 m elevation). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **254**, 492-507 (2007).
50. MASIOKAS, M., LUCKMAN, B., VILLALBA, R., RIPALTA, A. & RABASSA, J. Little Ice Age fluctuations of Glaciar Río Manso in the north Patagonian Andes of Argentina. *Quaternary Research* **73**, 96-106 (2010).
51. MAYR, C. *et al.* Palaeoenvironmental changes in southern Patagonia during the last millennium recorded in lake sediments from Laguna Azul (Argentina). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **228**, 203-227 (2005).
52. MAZZONI, E. in *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina* 141-179 (Springer, 2017).
53. MEYER, I. & WAGNER, S. in *Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions* 395-412 (Springer, 2009).
54. MOERNAUT, J. *et al.* Giant earthquakes in South-Central Chile revealed by Holocene mass-wasting events in Lake Puyehue. *Sedimentary Geology* **195**, 239-256 (2007).
55. MORENO, P., FRANÇOIS, J. P., VILLA-MARTÍNEZ, R. & MOY, C. Millennial-scale variability in Southern Hemisphere westerly wind activity over the last 5000 years in SW Patagonia. *Quaternary Science Reviews* **28**, 25-38 (2009).
56. MOURGUIART, P., WIRRMANN, D., FOURNIER, M. & SERVANT, M. Reconstruction quantitative des niveaux du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène. *CR Acad. Sci. Paris* **315**, 875-880 (1992).
57. MOY, C. M. *et al.* in *Past climate variability in South America and surrounding regions* 353-393 (Springer, 2009).
58. MUÑOZ, M. D., PÉREZ, L., SANHUEZA, R., URRUTIA, R. & ROVIRA, A. Los paisajes del agua en la cuenca del río Baker : bases conceptuales para su valoración integral. *Revista de Geografía Norte Grande*, 31-48 (2006).
59. PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L. & MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, 36 (2007).
60. PETERS, A. F. *et al.* Genetic diversity of Ectocarpus (Ectocarpales, Phaeophyceae) in Peru and northern Chile, the area of origin of the genome-sequenced strain. *New phytologist* **188**, 30-41 (2010).
61. RODGERS, K. B. *et al.* Interhemispheric gradient of atmospheric radiocarbon reveals natural variability of Southern Ocean winds. *Climate of the Past*, 1123-1138 (2011).

62. RODRIGUEZ, R., MARTICORENA, A. & TENEB, E. Plantas vasculares de los ríos Baker y Pascua, Región de Aisén, Chile. *Gayana. Botánica* **65**, 39-70 (2008).
63. ROTH, E., POTY, B., MENAGER, M.-T. & COULOMB, J. Méthodes de datation par les phénomènes nucléaires naturels applications (1985).
64. SACRÉ, V., FAGEL, N., LECLERCQ, L. *et al.* Cambios ambientales del último milenio en sedimentos lacustres del Lago Thompson, Patagonia Chilena Norte (2012).
65. SACRÉ, V., FAGEL, N., SCHMIDT, S. *et al.* Last millenium environmental changes in Lake Bertrand sediments, Chilean Patagonia (2012).
66. SARBU, C. & POP, H. Principal component analysis versus fuzzy principal component analysis : a case study : the quality of Danube water (1985–1996). *Talanta* **65**, 1215-1220 (2005).
67. SCHWERDTFEGER, W. *World survey of climatology volume 12 : climates of Central and South America. F034. 032* (Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam, 1976).
68. SEPÚLVEDA, B., ANGELOMÉ, P. C., LECHUGA, L. M. & LIZ-MARZÁN, L. M. LSPR-based nanobiosensors. *nano today* **4**, 244-251 (2009).
69. SIANI, G. *et al.* Late Glacial to Holocene terrigenous sediment record in the Northern Patagonian margin : Paleoclimate implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **297**, 26-36 (2010).
70. THOMPSON, L. G. *et al.* in *Climate variability and change in high elevation regions : Past, present & future* 137-155 (Springer, 2003).
71. TISSERAND, A. *et al.* African monsoon enhancement during the penultimate glacial period (MIS 6.5 170 ka) and its atmospheric impact. *Paleoceanography* **24** (2009).
72. TORRES, L. *et al.* Vegetational and climatic history during the late Holocene in Lake Laja basin (central Chile) inferred from sedimentary pollen record. *Review of Palaeobotany and Palynology* **149**, 18-28 (2008).
73. URRUTIA, R. *et al.* Late Holocene environmental changes inferred from diatom, chironomid, and pollen assemblages in an Andean lake in Central Chile, Lake Laja (36 S). *Hydrobiologia* **648**, 207-225 (2010).
74. Van GEEL, B., BUURMAN, J. *et al.* Environmental reconstruction of a Roman Period settlement site in Uitgeest (The Netherlands), with special reference to coprophilous fungi. *Journal of Archaeological Science* **30**, 873-883 (2003).
75. Van GEEL, B., HEUSSER, C. J., RENSSSEN, H. & SCHUURMANS, C. J. Climatic change in Chile at around 2700 BP and global evidence for solar forcing : a hypothesis. *The Holocene* **10**, 659-664 (2000).
76. VERGARA, J. F. A. Reconocimiento de tipos e individuos geomorfológicos regionales en la costa de Chile. *Investigaciones Geográficas*, ág-9 (1976).
77. VIANA, M., QUEROL, X., ALASTUEY, A., GIL, J. & MENÉNDEZ, M. Identification of PM sources by principal component analysis (PCA) coupled with wind direction data. *Chemosphere* **65**, 2411-2418 (2006).
78. VILLA-MARTÍNEZ, R., MORENO, P. I. & VALENZUELA, M. A. Deglacial and postglacial vegetation changes on the eastern slopes of the central Patagonian Andes (47 S). *Quaternary Science Reviews* **32**, 86-99 (2012).
79. VILLALBA, R., D'ARRIGO, R., COOK, E., JACOBY, G. & WILES, G. in *Interhemispheric Climate Linkages* 155-172 (Elsevier, 2001).
80. VILLALBA, R. in *The Medieval Warm Period 183-197* (Springer, 1994).
81. VIMEUX, F. *et al.* Climate variability during the last 1000 years inferred from Andean ice cores : A review of methodology and recent results. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **281**, 229-241 (2009).
82. WALKER, M. *Quaternary dating methods* (John Wiley et Sons, 2005).
83. WILLIAMS, L. & WIGLEY, T. A comparison of evidence for late Holocene summer temperature variations in the Northern Hemisphere. *Quaternary Research* **20**, 286-307 (1983).
84. WOLIN, J. A. & DUTHIE, H. C. *Diatoms as indicators of water-level change* (Cambridge University Press Cambridge, 1999).
85. XAVIER, B. *Etude sédimentologique à haute résolution de séries lacustres. Recherche de traceurs paléoclimatiques annuels et comparaison des réponses de l'hémisphère Nord (Lac Bai`kal, Sibérie) et de l'hémisphère Sud (Lake District, Chili)*. thèse de doct. (Université de Liège, 2005).

Table des figures

1.1	Carte de la localisation du site d'étude représentant l'emplacement de la carotte LBb11A (46°55'55,8"S et 72°47'28,9"O) prélevée dans le lac Bertrand, les stations météorologiques les plus proches de la zone d'étude, et la grille des données CRU TS 3.0 réalisées autour du site.	2
1.2	Carte géologique (44°S - 48°S) à l'échelle régionale des Andes chiliennes du Sud. À gauche, une carte plus générale de la géologie avec l'emplacement de la calotte glaciaire (Hielo Patagónico Norte). À droite, la géologie du bassin versant du lac General Carrera et le lac Bertrand modifié à partir de GUILLAUME 2008 ; LAGABRIELLE <i>et al.</i> 2004 ; DE LA CRUZ & SUÁREZ 2006.	3
1.3	Représentation de la variabilité climatique actuelle de la région d'Aysén. À gauche, la classification climatique basée sur les travaux de Wladimir Köppen (1900). À droite, le climatogramme de la localité de Puerto Aysen (45°S ; 72°O) et de Cochrane (46°S 72°O). Les axes des ordonnées de gauche et de droite représentent respectivement les précipitations moyennes mensuelles en mm (bâtonnets) et les températures moyennes mensuelles en °C (courbe noire) (modifié à partir de PEEL <i>et al.</i> 2007 ; HEPP <i>et al.</i> 2014 ; LOPEZ <i>et al.</i> 2008).	5
2.1	Représentation d'un schéma de dualité. À gauche, le cercle des corrélations. À droite, le plan factoriel (repris de Mr Fournier, Méthodologie interprétative d'une ACP, page 2, Université de Rouen, 2019).	10
3.1	Représentation de l'analyse sédimentaire pour la carotte LBb11A. De gauche à droite, la lithologie, le log sédimentaire, la photographie, l'image SCOPIX, et la courbe des valeurs scopix moyennes	13
3.2	Modèle d'âge pour la carotte LBb11A par la méthode d'interpolation spline lissé	15
3.3	Représentation de certains éléments géochimiques obtenus lors de l'analyse XRF	16
3.4	Représentation des températures pour les stations météorologiques Puerto Aysén et de Cochrane, et des données CRU TS	17
3.5	Représentation des précipitations pour les stations météorologiques Puerto Aysén et de Cochrane, et des données CRU TS	17
4.1	Tableau de corrélation entre l'aluminium (Al), la silice (Si), le soufre (S), le potassium (K), le calcium (Ca), le titane (Ti), le vanadium (V), le magnésium (Mn), le fer (Fe), le brome (Br), le rubidium (Rb), le strontium (Sr) et le zirconium (Zr), la silice biogène (SiO ₂), la température (T), les précipitations (P), le vent (V) pour les stations météorologiques de Puerto Aysen (PA) et de Cochrane (C) ainsi que pour les données CRU TS (CRU) et enfin les données SCOPIX, et les rapports Si/Al et Br/Al	18
4.2	Représentation ACP (à gauche) des éléments de la carotte (à droite) avec la météo.	19
4.3	Représentation de la reconstruction sur la période connue des précipitations à partir des données CRU TS et des données SCOPIX et géochimique (à gauche) , et de la Calibration et de la Validation pour la reconstruction sur la période connue des précipitations à partir des données CRU TS (à droite).	20
4.4	Reconstruction des précipitations sur toute la période couverte par la carotte LBb11A à travers les données de précipitations CRU TS et des données SCOPIX et géochimiques par régression linéaire multiple. Le trait plein en noir correspond aux précipitations en mm/an. Le trait plein en bleu correspond aux précipitations des données CRU TS pour le quadrillage de latitude -46,8481°N à -47,0120°N et de longitude -72,9180°E à -72,7660°E. La bande de couleur jaune et verte traduit un climat sec ou humide, respectivement en prenant en compte un intervalle de confiance à 0.95	21

5.1	Reconstruction des précipitations de cette étude où la couleur jaune et verte traduit un climat sec ou humide en prenant en compte un intervalle de confiance à 0.95. Ci-dessous, une synthèse des changements climatique décrit dans la littérature pour les derniers millénaires pour l'Amérique du Sud : (1) [VIMEUX <i>et al.</i> 2009], (2) [THOMPSON <i>et al.</i> 2003], (3) [LAMY <i>et al.</i> 2001], (4) [JENNY <i>et al.</i> 2002], (5) [TORRES <i>et al.</i> 2008], (6) [URRUTIA <i>et al.</i> 2010], (7) [BERTRAND, BOËS <i>et al.</i> 2005], (8) [MORENO <i>et al.</i> 2009], (9) [MASIOKAS <i>et al.</i> 2010], (10) [ARANEDA, TORREJÓN <i>et al.</i> 2007], (11) [VILLALBA 1994], (12) [VILLALBA <i>et al.</i> 2001], (13) [MARKGRAF <i>et al.</i> 2007], (14) [de OCA <i>et al.</i> 2018], (15) [SACRÉ, FAGEL, SCHMIDT <i>et al.</i> 2012], (16) [ARANEDA, JANA <i>et al.</i> 2013], (17) ELBERT <i>et al.</i> 2012, (18) [SIANI <i>et al.</i> 2010], (19) ÁLVAREZ <i>et al.</i> 2015, (20) [VILLA-MARTÍNEZ <i>et al.</i> 2012], (21) [N. F. GLASSER <i>et al.</i> 2004], (22) [HARRISON <i>et al.</i> 2007], (23) , (24) [MOY <i>et al.</i> 2009], (25) [HABERZETTL <i>et al.</i> 2006], (26) [MAYR <i>et al.</i> 2005]	23
5.2	Information sur l'emplacement des stations de la Direction météorologique du Chili (DMC) dans la Région d'Aysén. Les températures et les précipitations annuelles moyennes, maximales et minimales ("année normale") pour les quatre stations DMC d'après HEPP <i>et al.</i> 2014	i
5.3	Les températures et les précipitations mensuelles moyennes, maximales et minimales pour les stations météorologiques de Puerto Aysen (-45,39944°S et -72,67722°O), Balmaceda (-45,91278°S et -71,69417°O), Chile Chico (-46.58083°S et -71,69472°O) de 1960 à 2017, et Cochrane (-47.24389°S et -72.59306°O) de 1970 à 2017, d'après HEPP <i>et al.</i> 2014	ii
5.4	Représentation des éléments géochimique : l'aluminium (Al), la silice (Si), le soufre (S), le potassium (K), le calcium (Ca), le titane (Ti), le vanadium (V), le magnésium (Mn), le fer (Fe), le brome (Br), le rubidium (Rb), le strontium (Sr) et le zirconium (Zr) obtenue par XRF, la silice biogène (SiO ₂), ainsi que les données SCOPIX	iii
5.5	Représentation des températures saisonnières pour les stations météorologiques de Puerto Aysen (-45,39944°S et -72,67722°O) , Coyhaique, Balmaceda (-45,91278°S et -71,69417°O), Chile Chico (-46.58083°S et -71,69472°O), et Cochrane (-47.24389°S et -72.59306°O) ainsi que pour les données CRU TS	iv
5.6	Représentation des précipitations saisonnières pour les stations météorologiques de Puerto Aysen (-45,39944°S et -72,67722°O) , Coyhaique, Balmaceda (-45,91278°S et -71,69417°O), Chile Chico (-46.58083°S et -71,69472°O), et Cochrane (-47.24389°S et -72.59306°O) ainsi que pour les données CRU TS	iv
5.7	Tableau de Corrélacion entre l'aluminium (Al), la silice (Si), le soufre (S), le potassium (K), le calcium (Ca), le titane (Ti), le vanadium (V), le magnésium (Mn), le fer (Fe), le brome (Br), le rubidium (Rb), le strontium (Sr) et le zirconium (Zr) , la silice biogène (SiO ₂), la température (T), les précipitations (P), le vent (V) pour les stations météorologiques de Puerto Aysen (PA) et de Cochrane (C) ainsi que pour les données CRU TS (CRU) et enfin les données SCOPIX, et les rapports Si/Al et Br/Al	vi
5.8	Représentation des corrélacions des températures pour les stations météorologiques de Puerto Aysen, Cochrane et les données CRU TS	vii
5.9	Représentation des corrélacions des précipitations pour les stations météorologiques de Puerto Aysen, Cochrane et les données CRU TS	vii
5.10	Représentation des corrélacions des vents pour les stations météorologiques de Puerto Aysen, Cochrane et les données CRU TS	viii
5.11	Représentation de l'analyse des composantes principales pour les éléments géochimiques et sédimentaire de la carotte LBb11A. Cercle rouge : Limite à 65% (qui correspond à un sigma de signification)	viii

Liste des tableaux

3.1 Datation radiocarbone de la carotte LBb11A 14

Annexes

Annexe : Résultats

1 Données instrumentales

	Puerto Aysén	Balmaceda	Chile Chico	Cochrane
Lat (S)	-45,39944°	-45,91278°	-46,58083°	-47,24389°
Long (W)	-72,67722°	-71,69417°	-71,69278°	-72,58639°
Élévation (m)	11	517	306	204
Température moyenne (°C)	9,0	6,4	9,3	7,8
Température maximale (°C)	18,7	18,8	22,1	19,9
Température minimale (°C)	0,3	-6,4	-2,2	-2,1
Précipitation moyenne (mm)	2637	564	290	702
Précipitation maximale (mm)	3898	970	573	1187
Précipitation minimale (mm)	1563	277	75	331

FIGURE 5.2 – Information sur l'emplacement des stations de la Direction météorologique du Chili (DMC) dans la Région d'Aysén. Les températures et les précipitations annuelles moyennes, maximales et minimales ("année normale") pour les quatre stations DMC d'après HEPP *et al.* 2014

Station		Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
Puerto Aysén	Température moyenne (°C)	13,9	13,5	11,8	9,3	6,9	4,5	4,1	5,5	7,1	9,2	11,2	12,8
	Température maximale (°C)	25,4	24,4	22,8	17,8	14,3	11,6	11,4	12,9	16,8	19,9	22,6	24,1
	Température minimale (°C)	4,8	4,3	1,9	0,4	-1,4	-3,7	-4,2	-2,3	-1,7	0,3	2,3	4,4
	Précipitation moyenne (mm)	187	149	154	199	276	250	247	235	181	168	179	181
	Précipitation maximale (mm)	579	352	331	558	755	549	487	491	383	431	470	416
	Précipitation minimale (mm)	35	10	25	22	2	18	29	16	9	14	22	1
Balmaceda	Température moyenne (°C)	12,2	11,7	9,4	6,5	3,5	0,8	0,2	2,0	4,3	6,8	9,1	11,0
	Température maximale (°C)	26,4	26,5	24,4	18,8	14,0	10,5	9,7	11,9	16,3	19,8	22,7	24,6
	Température minimale (°C)	-0,3	-1,6	-5,0	-7,3	-9,2	-12,8	-15,0	-9,7	-7,2	-5,0	-2,4	-1,0
	Précipitation moyenne (mm)	27	21	38	50	82	81	73	61	40	33	29	29
	Précipitation maximale (mm)	111	76	86	175	340	224	223	164	147	147	123	103
	Précipitation minimale (mm)	0	0	2	2	9	1	7	7	2	0	1	0
Chile Chico	Température moyenne (°C)	15,8	15,2	12,7	9,2	5,9	3,3	2,7	4,2	6,6	9,5	12,5	14,5
	Température maximale (°C)	29,8	29,3	26,6	22,0	18,1	14,7	14,3	16	19	22,5	25,9	28,1
	Température minimale (°C)	2,7	2,6	0,3	-1,8	-4,6	-6,5	-7,9	-5,8	-4,3	-2,3	-0,1	1,2
	Précipitation moyenne (mm)	9	10	17	24	47	44	46	37	22	13	10	9
	Précipitation maximale (mm)	91	78	69	92	264	129	178	118	89	86	40	111
	Précipitation minimale (mm)	0	0	0	0	2	0	0	4	0	0	0	0
Cochrane	Température moyenne (°C)	14	13,7	11	7,6	4,1	1,3	1,1	3,1	6,1	8,7	11	12,8
	Température maximale (°C)	27,7	27,4	24,8	19,6	15,2	11,5	11,4	13,7	17,8	20,8	23,9	25,8
	Température minimale (°C)	3,2	2,5	0,0	-2,3	-4,8	-7,2	-8,5	-5,7	-3,1	-1,5	0	2,2
	Précipitation moyenne (mm)	42	33	47	66	87	85	73	83	48	50	44	44
	Précipitation maximale (mm)	115	101	153	209	198	233	299	250	146	250	148	179
	Précipitation minimale (mm)	1	0	4	3	2	7	4	9	0	2	0	0

FIGURE 5.3 – Les températures et les précipitations mensuelles moyennes, maximales et minimales pour les stations météorologiques de Puerto Aysen (-45,39944°S et -72,67722°O), Balmaceda (-45,91278°S et -71,69417°O), Chile Chico (-46.58083°S et -71,69472°O) de 1960 à 2017, et Cochrane (-47.24389°S et -72.59306°O) de 1970 à 2017, d'après HEPP *et al.* 2014

Annexe : Résultats

1 Évolution géochimique

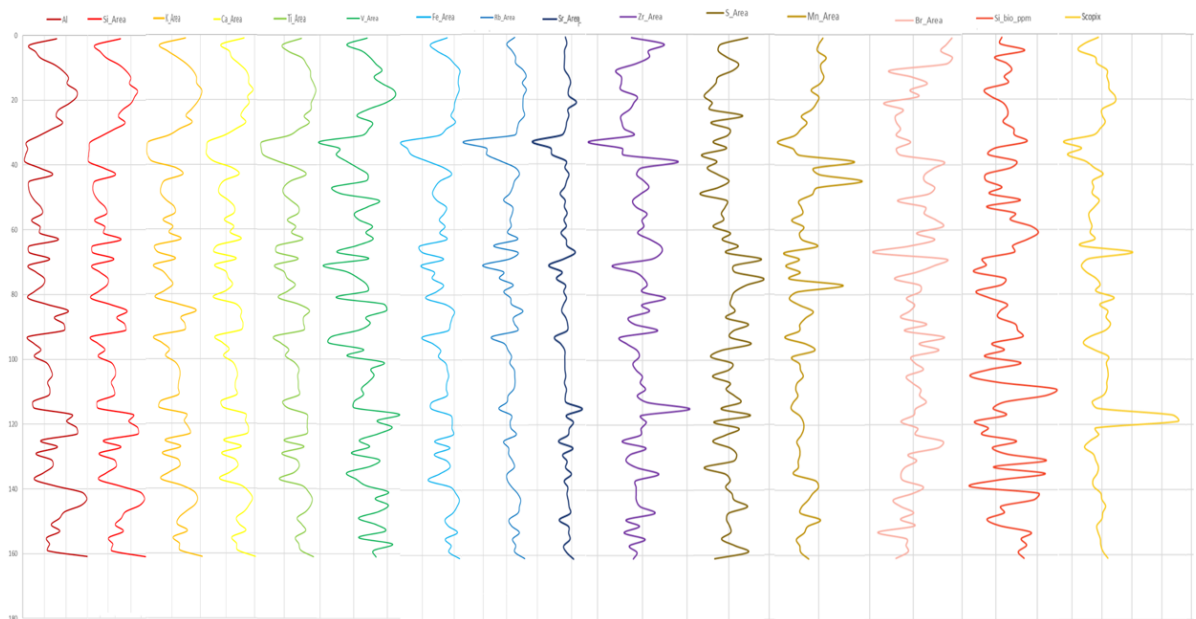


FIGURE 5.4 – Représentation des éléments géochimique : l'aluminium (Al), la silice (Si), le soufre (S), le potassium (K), le calcium (Ca), le titane (Ti), le vanadium (V), le magnésium (Mn), le fer (Fe), le brome (Br), le rubidium (Rb), le strontium (Sr) et le zirconium (Zr) obtenue par XRF, la silice biogène (SiO_2), ainsi que les données SCOPIX

2 Données météorologiques instrumentales et prévisionnelles

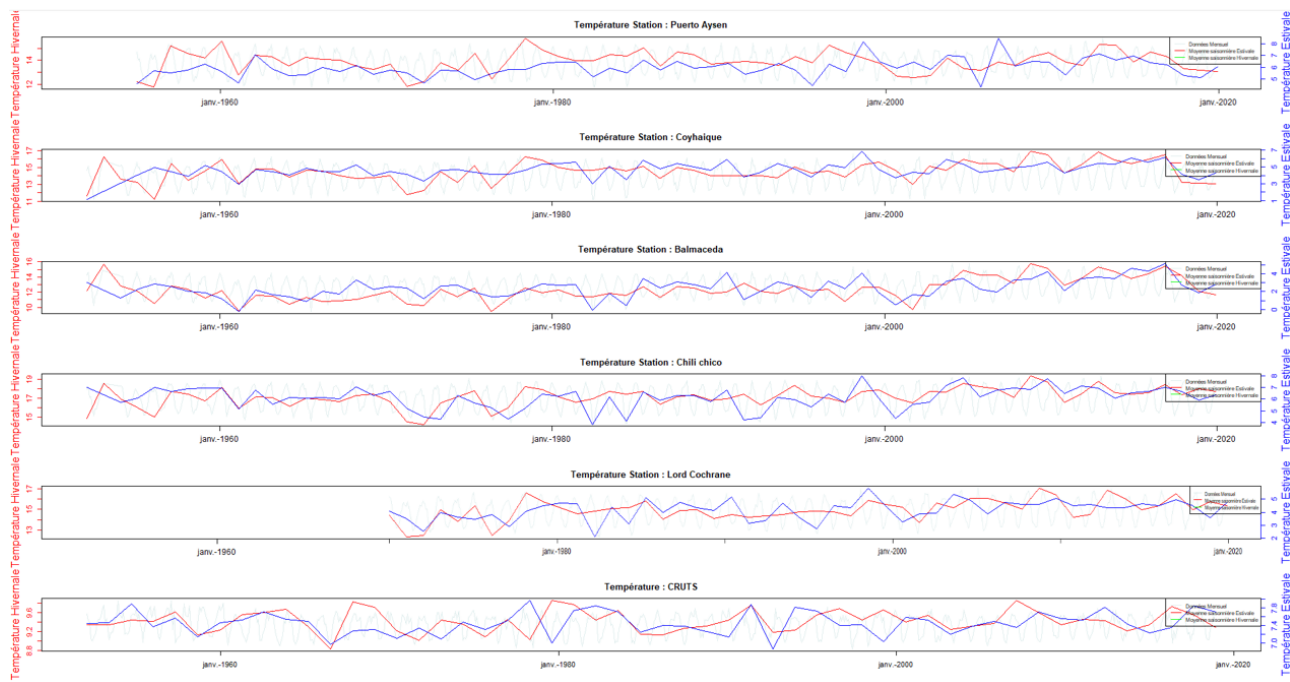


FIGURE 5.5 – Représentation des températures saisonnières pour les stations météorologiques de Puerto Aysen (-45,39944°S et -72,67722°O) , Coyhaique, Balmaceda (-45,91278°S et -71,69417°O), Chile Chico (-46.58083°S et -71,69472°O), et Cochrane (-47.24389°S et -72.59306°O) ainsi que pour les données CRU TS

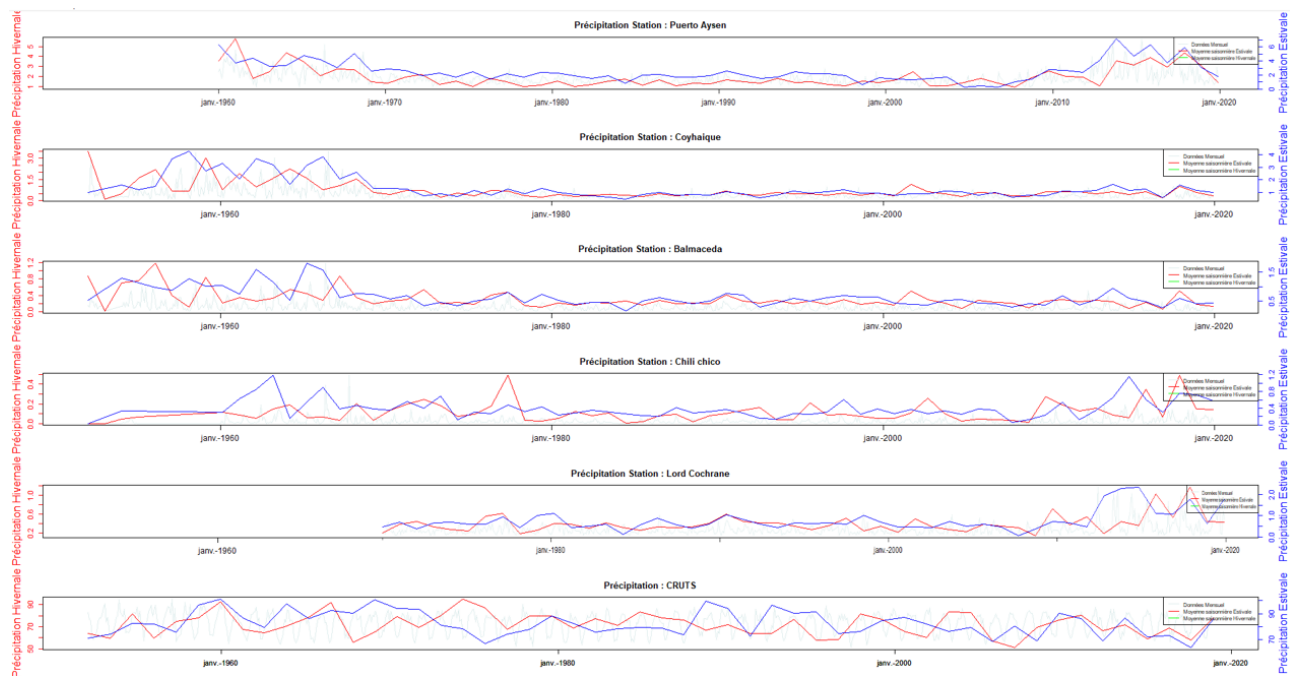


FIGURE 5.6 – Représentation des précipitations saisonnières pour les stations météorologiques de Puerto Aysen (-45,39944°S et -72,67722°O) , Coyhaique, Balmaceda (-45,91278°S et -71,69417°O), Chile Chico (-46.58083°S et -71,69472°O), et Cochrane (-47.24389°S et -72.59306°O) ainsi que pour les données CRU TS

Annexe Interprétations

- 1 Corrélation entre les éléments caractéristiques de la carotte et les données instrumentales
- 2 Corrélation des données instrumentales
- 3 Analyse des composantes principales

	Al	Si	S	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Br	Rb	Sr	Zr	SiO ₂	T_PA	P_PA	V_PA	T_C	P_C	V_C	T_CRU	P_CRU	SCOPIX	Si/Al	Ti/Al
Al	1	1.00	0.95	1.00	0.99	1.00	0.84	0.92	0.99	0.74	0.91	0.38	0.96	0.25	0.50	0.98	0.02	0.63	0.52	0.78	0.52	0.95	0.95	0.91	0.85
Si	1.00	1	0.96	1.00	0.99	0.99	0.83	0.93	0.99	0.75	0.90	0.36	0.96	0.27	0.49	0.99	0.04	0.65	0.50	0.80	0.50	0.94	0.94	0.91	0.88
S	0.95	0.96	1	0.93	0.91	0.92	0.63	0.99	0.90	0.91	0.74	0.08	0.84	0.53	0.22	0.99	0.32	0.84	0.23	0.93	0.23	0.81	0.92	0.91	0.90
K	1.00	1.00	0.93	1	1.00	1.00	0.88	0.88	1.00	0.68	0.94	0.45	0.98	0.17	0.57	0.97	0.06	0.57	0.58	0.73	0.58	0.97	0.91	0.91	0.92
Ca	0.99	0.99	0.91	1.00	1	1.00	0.90	0.86	1.00	0.64	0.95	0.50	0.99	0.12	0.61	0.95	0.11	0.53	0.62	0.69	0.62	0.98	0.90	0.91	0.94
Ti	1.00	0.99	0.92	1.00	1.00	1	0.88	0.88	1.00	0.68	0.94	0.46	0.98	0.16	0.58	0.96	0.07	0.56	0.59	0.73	0.59	0.97	0.84	0.90	0.94
V	0.84	0.83	0.63	0.88	0.90	0.88	1	0.55	0.91	0.25	0.99	0.82	0.95	0.32	0.89	0.72	0.53	0.11	0.90	0.32	0.90	0.97	0.92	0.90	0.94
Mn	0.92	0.93	0.99	0.88	0.86	0.88	0.55	1	0.85	0.95	0.66	0.02	0.78	0.61	0.12	0.97	0.41	0.89	0.13	0.97	0.13	0.74	0.91	0.90	0.94
Fe	0.99	0.99	0.90	1.00	1.00	1.00	0.91	0.85	1	0.63	0.96	0.51	0.99	0.10	0.63	0.95	0.13	0.51	0.64	0.68	0.64	0.98	0.90	0.90	0.94
Br	0.74	0.75	0.91	0.68	0.64	0.68	0.25	0.95	0.63	1	0.38	0.35	0.53	0.84	0.21	0.85	0.69	0.99	0.20	1.00	0.20	0.48	0.53	0.46	0.46
Rb	0.91	0.90	0.74	0.94	0.95	0.94	0.99	0.66	0.96	0.38	1	0.73	0.99	0.18	0.82	0.81	0.41	0.25	0.83	0.45	0.83	0.99	0.91	0.87	0.84
Sr	0.38	0.36	0.08	0.45	0.50	0.46	0.82	0.02	0.51	0.35	0.73	1	0.61	0.80	0.99	0.20	0.92	0.48	0.99	0.28	0.99	0.66	0.91	0.87	0.84
Zr	0.96	0.96	0.84	0.98	0.99	0.98	0.95	0.78	0.99	0.53	0.99	0.61	1	0.02	0.72	0.90	0.25	0.40	0.73	0.59	0.73	1.00	0.90	0.91	0.94
SiO ₂	0.25	0.27	0.53	0.17	0.12	0.16	0.32	0.61	0.10	0.84	0.18	0.80	0.02	1	0.71	0.42	0.97	0.91	0.70	0.80	0.70	0.07	0.09	0.17	0.12
T_PA	0.50	0.49	0.22	0.57	0.61	0.58	0.89	0.12	0.63	0.21	0.82	0.99	0.72	0.71	1	0.34	0.86	0.35	1.00	0.14	1.00	0.75	0.21	0.25	0.41
P_PA	0.98	0.99	0.99	0.97	0.95	0.96	0.72	0.97	0.95	0.85	0.81	0.20	0.90	0.42	0.34	1	0.20	0.76	0.35	0.88	0.35	0.87	0.73	0.52	0.56
V_PA	0.02	0.04	0.32	0.06	0.11	0.07	0.53	0.41	0.13	0.69	0.41	0.92	0.25	0.97	0.86	0.20	1	0.79	0.85	0.64	0.85	0.30	0.09	0.54	0.73
T_C	0.63	0.65	0.84	0.57	0.53	0.56	0.11	0.89	0.51	0.99	0.25	0.48	0.40	0.91	0.35	0.76	0.79	1	0.34	0.98	0.34	0.35	0.34	0.29	0.33
P_C	0.52	0.50	0.23	0.58	0.62	0.59	0.90	0.13	0.64	0.20	0.83	0.99	0.73	0.70	1.00	0.35	0.85	0.34	1	0.13	1.00	0.76	0.85	0.60	0.83
V_C	0.78	0.80	0.93	0.73	0.69	0.73	0.32	0.97	0.68	1.00	0.45	0.28	0.59	0.80	0.14	0.88	0.64	0.98	0.13	1	0.13	0.54	0.71	0.96	0.50
T_CRU	0.52	0.50	0.23	0.58	0.62	0.59	0.90	0.13	0.64	0.20	0.83	0.99	0.73	0.70	1.00	0.35	0.85	0.34	1.00	0.13	1	0.76	0.34	0.29	0.33
P_CRU	0.95	0.94	0.81	0.97	0.98	0.97	0.97	0.74	0.98	0.48	0.99	0.66	1.00	0.07	0.75	0.87	0.30	0.35	0.76	0.54	0.76	1	0.95	0.89	0.88
SCOPIX	0.95	0.94	0.92	0.91	0.90	0.84	0.92	0.91	0.90	0.53	0.91	0.91	0.90	0.09	0.21	0.73	0.09	0.34	0.85	0.71	0.34	0.95	1	0.83	0.74
Si/Al	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.46	0.87	0.87	0.91	0.17	0.25	0.52	0.54	0.29	0.60	0.96	0.29	0.89	0.83	1	0.93
Br/Al	0.85	0.88	0.90	0.92	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.46	0.84	0.84	0.94	0.12	0.41	0.56	0.73	0.33	0.83	0.50	0.33	0.88	0.74	0.93	1

FIGURE 5.7 – Tableau de Corrélacion entre l'aluminium (Al), la silice (Si), le soufre (S), le potassium (K), le calcium (Ca), le titane (Ti), le vanadium (V), le magnésium (Mn), le fer (Fe), le brome (Br), le rubidium (Rb), le strontium (Sr) et le zirconium (Zr), la silice biogène (SiO₂), la température (T), les précipitations (P), le vent (V) pour les stations météorologiques de Puerto Aysen (PA) et de Cochrane (C) ainsi que pour les données CRU TS (CRU) et enfin les données SCOPIX, et les rapports Si/Al et Br/Al

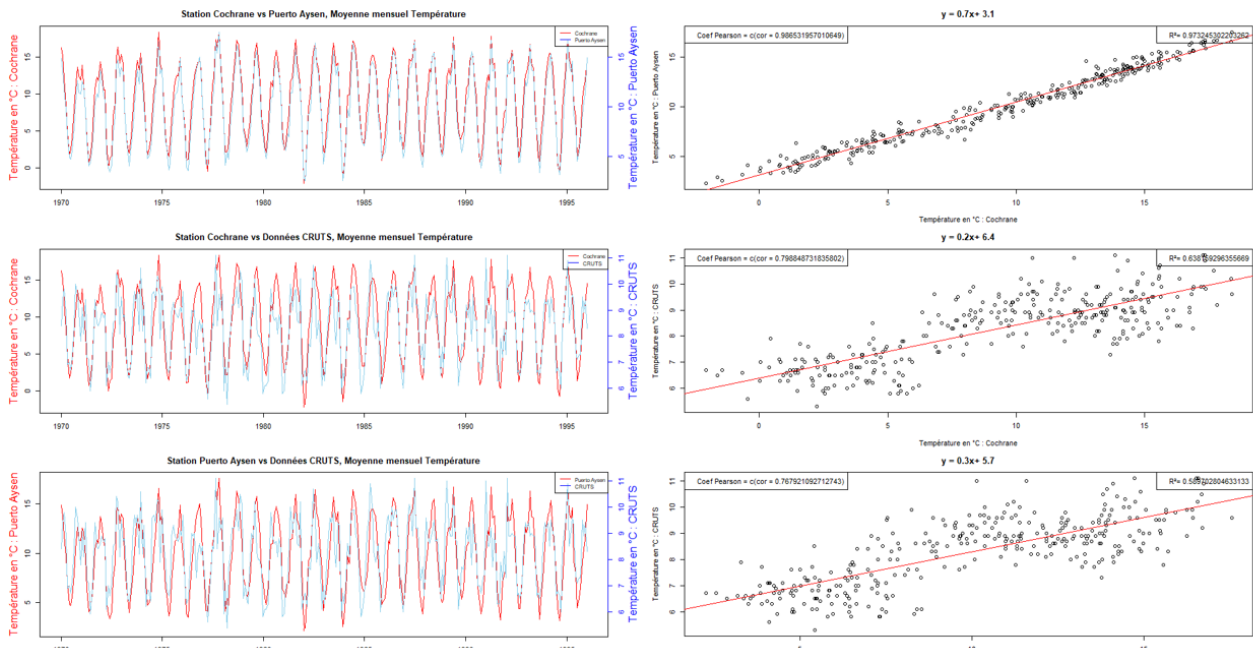


FIGURE 5.8 – Représentation des corrélations des températures pour les stations météorologiques de Puerto Aysen, Cochrane et les données CRU TS

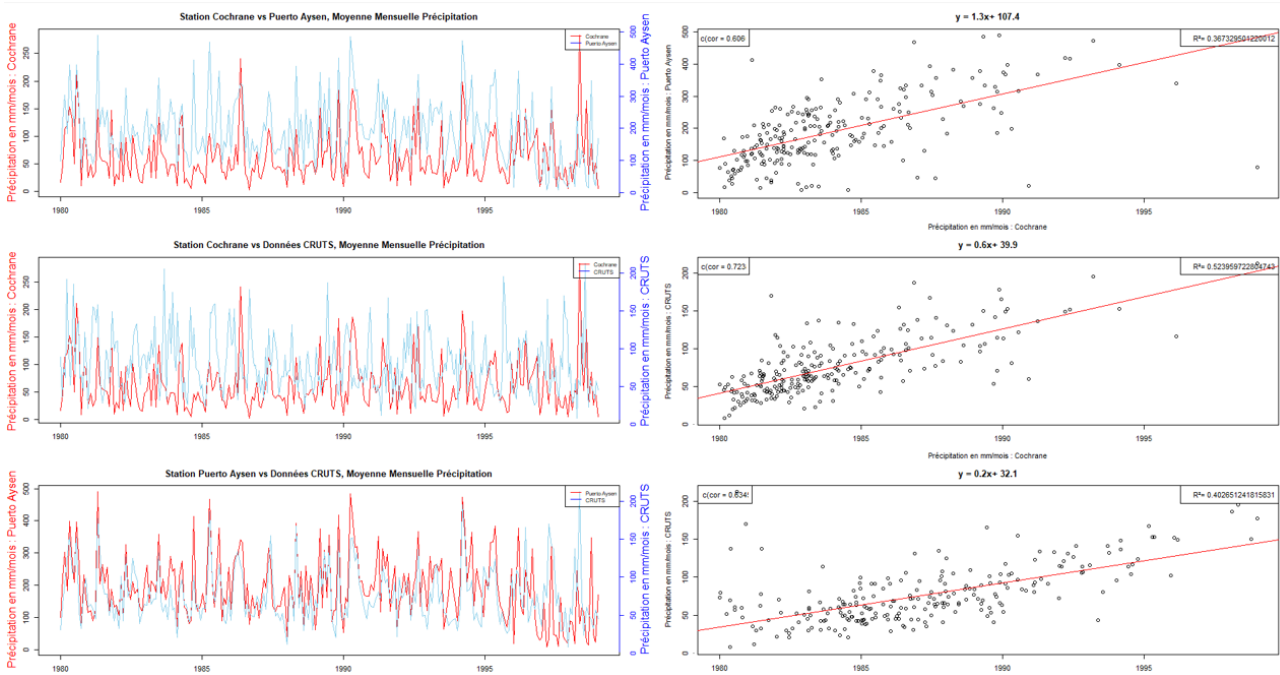


FIGURE 5.9 – Représentation des corrélations des précipitations pour les stations météorologiques de Puerto Aysen, Cochrane et les données CRU TS

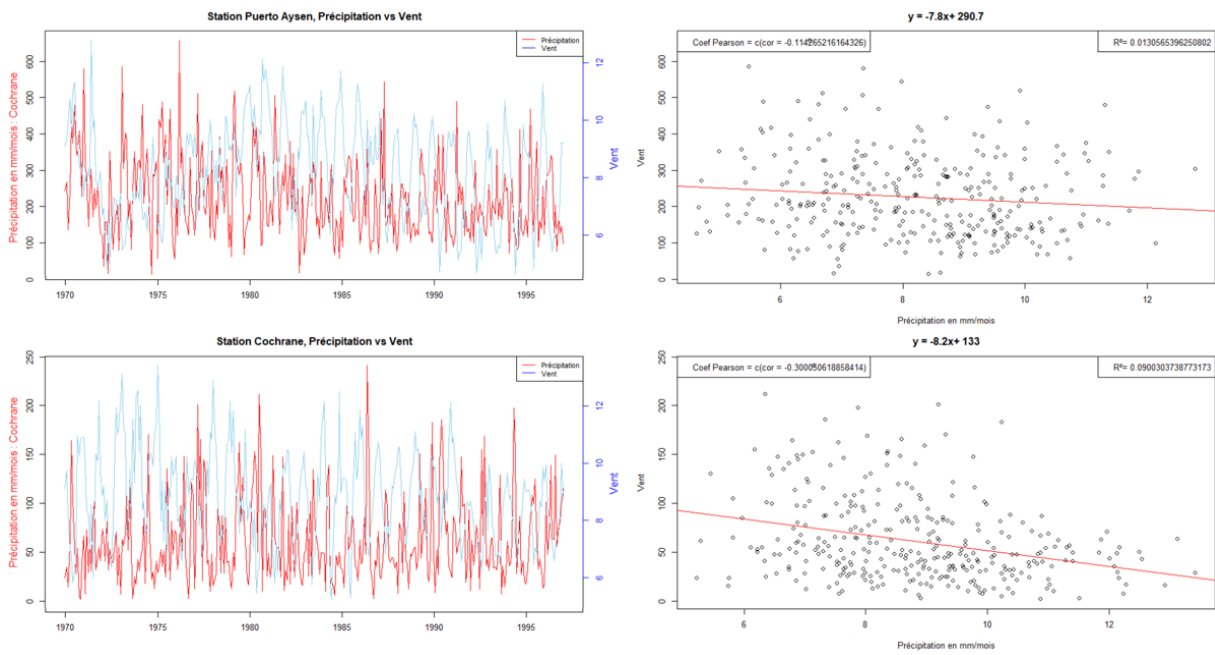


FIGURE 5.10 – Représentation des corrélations des vents pour les stations météorologiques de Puerto Aysen, Cochrane et les données CRU TS

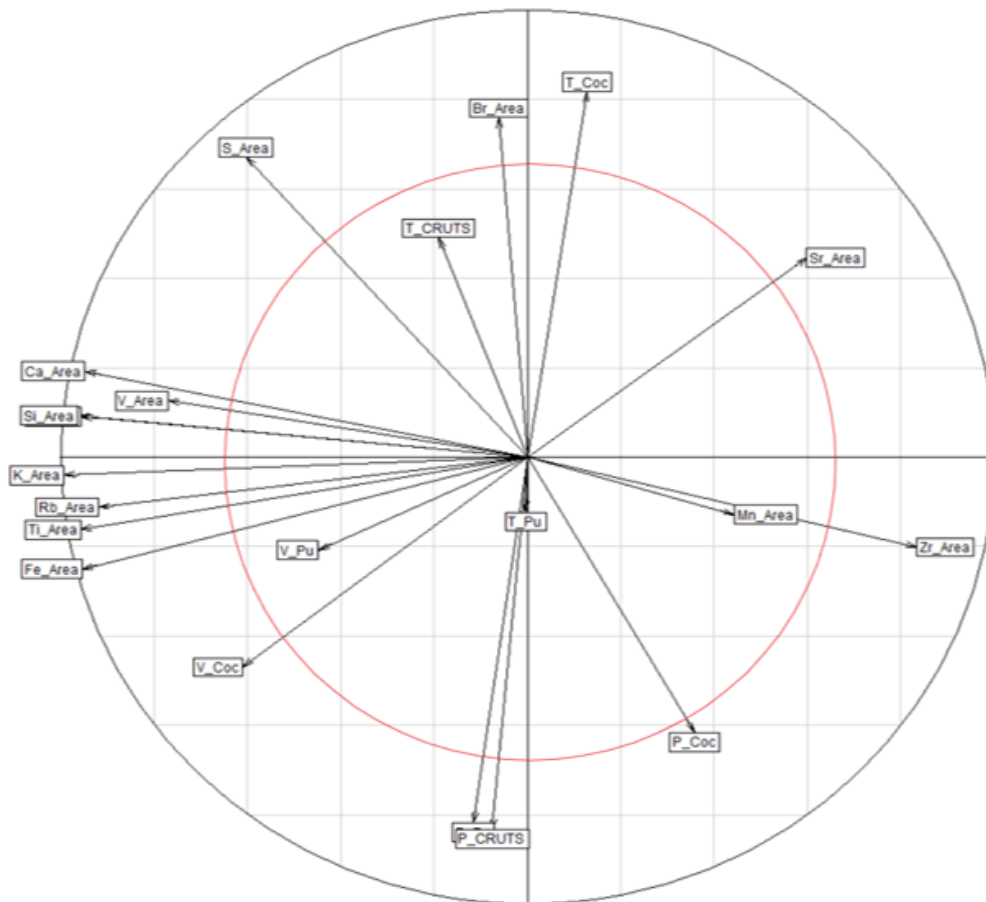


FIGURE 5.11 – Représentation de l'analyse des composantes principales pour les éléments géochimiques et sédimentaire de la carotte LBb11A. Cercle rouge : Limite à 65% (qui correspond à un sigma de signification)