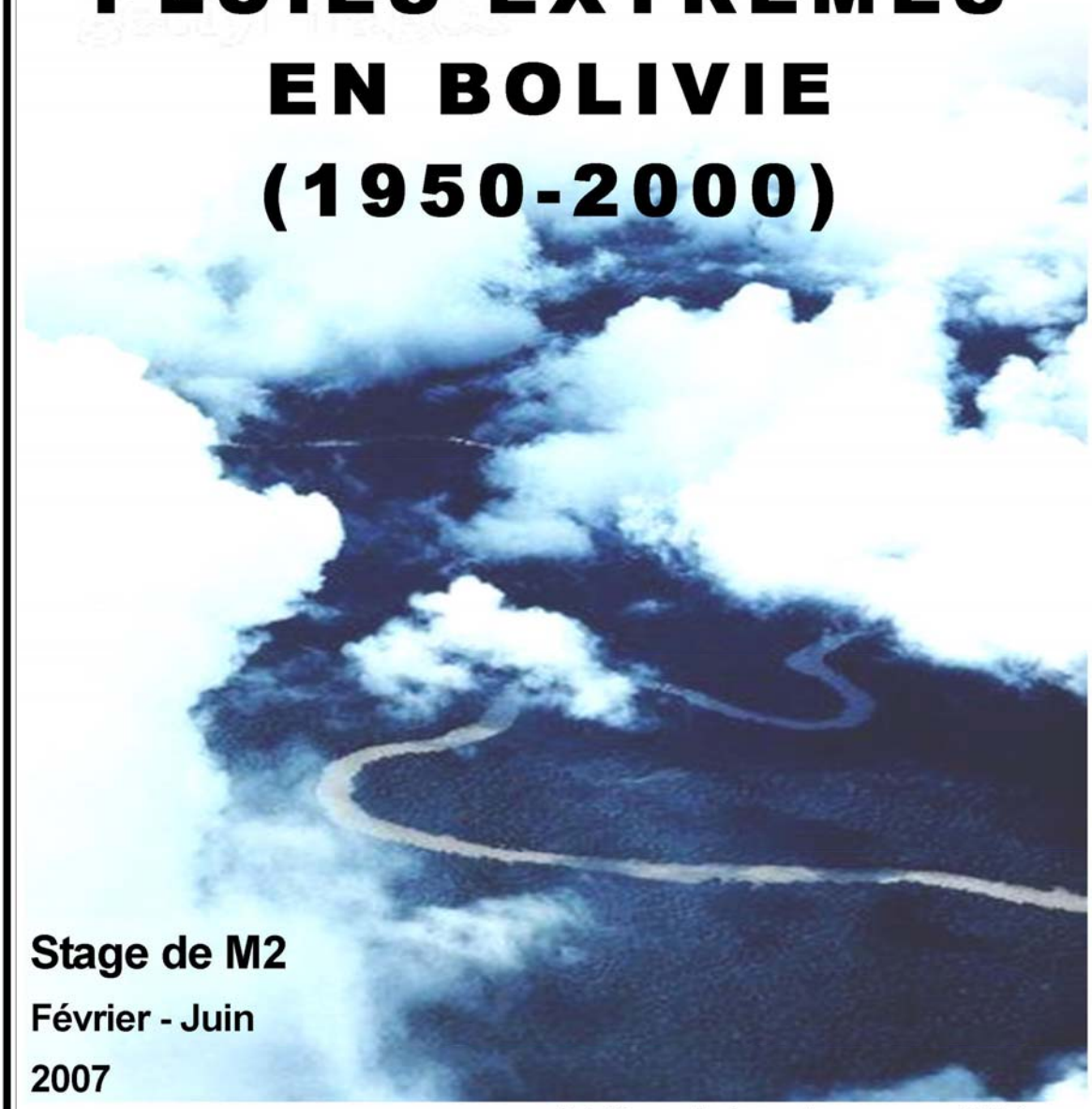
Fanny LAURENT
M2 Espaces Dynamiques, Milieux et Risques
Université Paris 7 - Denis DIDEROT

PLUIES EXTRÊMES EN BOLIVIE (1950-2000)



Stage de M2

Février - Juin

2007

Pete Turner- clouds over Amazon Getty Image

Laboratoire d'Océanographie et Climatologie: Expérimentation et Approches Numériques
CNRS/ IRD/ P6/ MNHN

Responsable du stage: **Josyane RONCHAIL**
Maître de conférences P7
Équipe scientifique VARTROP

Je souhaiterais remercier plusieurs personnes qui ont permis le bon déroulement de ce stage :

Pour l'accueil dans le laboratoire

Laurence Eymard, directrice de LOCEAN,

Serge Janicot, Dr IRD, responsable de l'équipe VARTROP

Pour la mise à disposition des données et outils

Philippe Vauchel, chercheur IRD (pour les données quotidiennes et HydrAcess)

Jean Loup Guyot, directeur de recherche IRD,

responsable de l'ORE (Observatoire Recherche pour Environnement)

et Hybam (Hydrogeodynamique du bassin amazonien)

Luis Noriega et **Oscar Fuertes**, ingénieurs et partenaires du programme Hybam en Bolivie

Jhan Carlo Espinoza Villar, thésard (pour le test d'homogénéité des données

et les cartes de pluies sur l'Amazonie)

M. R. Haylock (pour la mise à disposition du logiciel d'extraction 'R')

Pour l'intégration à ce stage, ses conseils, son soutien et la mise à disposition d'une salle, du matériel et d'autres données

Josyane Ronchail, maître de conférences Paris 7

PLAN

RÉSUMÉ → page 01

1. INTRODUCTION → page 02

Zone d'étude → page 06

2. MATÉRIEL et MÉTHODE → page 12

2.1. Les bases de données → page 12

2.2. Les logiciels utilisés → page 13

2.3. Tri de la base de données 'Bolivie' → page 14

2.4. Les indices pluviométriques → page 18

2.5. Corrélations et Analyses en Composantes Principales → page 19

3. RÉSULTATS → page 20

3.1. Variabilité spatio-temporelle des totaux annuels de pluies → page 21

3.1.1. En Amazonie → page 21

3.1.2. En Bolivie → page 29

3.1.3. Autres remarques → page 36

3.2. Analyse des indices pluviométriques en Bolivie entre 1950 et 2000 → page 37

3.2.1. Les moyennes et les tendances des indices → page 38

3.2.2. La variabilité spatio-temporelle des indices → page 56

3.2.3. Analyse de l'intensité journalière des pluies → page 67

4. CONCLUSION → page 80

Bibliographie → page 84

Liste des figures et des tableaux → page 87

Liste des annexes → page 91

Documents annexes → page 92

RÉSUMÉ

Cette étude a été réalisée dans le but d'analyser les variations des pluies et plus spécialement de leurs extrêmes, mais aussi de leur fréquence et leur intensité, sur le long terme (1950-2000), dans le sud-ouest du bassin amazonien, en Bolivie. C'est une analyse pionnière puisque les données quotidiennes de pluie sont encore très peu étudiées dans cette zone.

À partir d'une très importante base de données inédite sur les pluies quotidiennes en Bolivie, nous avons réalisé diverses analyses statistiques en utilisant différents logiciels informatiques. La base de donnée a été triée et structurée à différentes reprises afin d'être exploitable par ces logiciels. L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des totaux annuels de pluies a été réalisée en Bolivie mais aussi en Amazonie, afin de montrer comment le sud-ouest du bassin s'intègre dans un plus vaste ensemble. Des indices pluviométriques obtenus en suivant la méthodologie de Haylock et al (2006) traduisent différentes modalités annuelles des pluies : les totaux, les extrêmes, leurs fréquences et l'intensité journalière moyenne. Les analyses de ces indices sur l'ensemble de la Bolivie, entre 1950 et 2000, visent la connaissance de leurs valeurs moyennes, de leurs tendances linéaires et plus généralement de leurs variabilités spatio-temporelles.

De nombreux résultats cohérents ont été mis en évidence au cours de cette étude. Les changements des pluies à long terme, en Bolivie et en Amazonie, au cours des années 70 et la fin des années 80, sont liés à une modification du flux de mousson sud-américaine et aux phases de l'Oscillation Australe du Pacifique. En Bolivie, nous avons également spécifié que le relief (très marqué) ainsi que la latitude jouent un rôle très important sur la distribution des totaux de pluies, des extrêmes et de leurs fréquences. Les stations de plaine et celles des reliefs possèdent des valeurs très distinctes ; celles-ci sont toujours plus fortes en plaine. Les tendances linéaires entre 1950 et 2000 des indices traduisent souvent une augmentation de la quantité, de la fréquence des pluies et des extrêmes, en particulier dans le centre de la plaine bolivienne. Mais les pluies extrêmes et les séquences sèches et humides n'ont pas toujours des modes de variabilité semblables. L'analyse de l'intensité journalière, qui diminue entre 1950 et 2000, au pas de temps annuel, dans de nombreuses stations, ne semble ne pas être responsable de l'augmentation des débits de crue observée à partir de 1970. Cependant l'augmentation de l'intensité des pluies, en février-mars, juste avant la crue, dans certains bassins, pourrait y contribuer, de même que l'augmentation de la fréquence des pluies extrêmes.

VARIABILITÉ DES PLUIES EXTRÊMES EN BOLIVIE ENTRE 1950 ET 2000

Fanny LAURENT

1. INTRODUCTION

Ce stage rentre dans le cadre des projets AMANCAY (Variabilité climatique interannuelle à décennale en Amérique du Sud, 2006 - Programme National LEFE) et HYBAM (Hydrogéodynamique du bassin amazonien – Partenariat entre l'Institut de Recherche pour le Développement et des institutions sud-américaines). Leurs objectifs sont l'analyse de la variabilité du climat et de l'hydrologie, respectivement en Amérique du sud et en Amazonie.

Dans ce travail on propose d'analyser les précipitations quotidiennes mesurées depuis 50 ans (1950-2000) en Bolivie, ce qui n'a jusqu'alors pas été fait, faute de données disponibles.

On souhaite répondre à différentes interrogations concernant les pluies moyennes et leurs valeurs extrêmes:

- La variabilité des totaux annuels de pluie à long terme en Bolivie, dans le sud du bassin amazonien, est-elle la même que dans le reste de l'Amazonie? Comment s'organise la variabilité des pluies dans cet ensemble ? De plus, étant donné les forts contrastes géographiques en Bolivie (plaine amazonienne, vallées, Altiplano), on peut s'interroger sur les différences de variabilité entre ces milieux.
- Combien de jours pleut-il pendant l'année ? Quelle est la variabilité spatiale du nombre de jours de pluies ? Quelle est sa variabilité temporelle ?
- Quelles sont les valeurs de pluies extrêmes ? Comment se répartissent-elles spatialement ?
- Quelles sont tendances et plus généralement quels sont les modes de variabilités des pluies extrêmes, de la fréquence et de l'intensité des pluies ? Sont-ils uniformes dans l'espace bolivien ? Varient-ils en fonction des milieux ?
- Est-ce que l'augmentation des crues observée à partir de 1970 dans le bassin du Madeira qui draine l'Amazonie bolivienne est liée à une intensification des pluies ou à une autre modalité ?

Cette étude est motivée par les observations suivantes :

- La variabilité des pluies annuelles dans l'ensemble du bassin amazonien et en Bolivie est complexe (Liebmann et Marengo 2001, Zhou et Lau 2001, Ronchail et al. 2002 Marengo 2004 Espinoza et. 2006, 2007, Ronchail 1998, entre autres); elle est liée en partie aux conditions de surface des océans Pacifique et Atlantique. On se demande si, en conséquence, il y a des variabilités de même type des extrêmes, des fréquences et des intensités de pluies et si celles-ci sont liées en particulier à l'Oscillation Australe du Pacifique.

- Les extrêmes de débits (crues et étiages) varient beaucoup dans le bassin amazonien (Callède et al. 2004, Ronchail et al. 2005, Ronchail 2006, Espinoza et al 2007) et on veut savoir si les extrêmes de pluies peuvent les expliquer. En effet, par exemple, une forte augmentation des crues a été montrée à Obidos, dans la basse vallée de l'Amazone, ainsi que dans le bassin du Madeira qui draine l'Amazonie bolivienne, depuis le début des années 1970. Les débits extrêmes ont un impact sur les activités humaines (inondation, transport fluvial, qualité de l'eau, pêche, ...). Pour les hydrologues l'intérêt est de savoir si la fréquence des fortes crues est liée à une augmentation de l'intensité des pluies ou bien s'il faut l'attribuer à des changements de saisonnalité des pluies, à la déforestation ou à d'autres facteurs.

- Les extrêmes de pluies peuvent générer des épisodes d'érosion ou de reprise de sédiments par les rivières, des dépôts, modifiant les cours des rivières et le voisinage port rivière dans certains cas (comme à Puccalpa au Pérou où le port n'est plus sur la rivière), donc la desserte et l'économie des villes. Les sédiments par ailleurs peuvent emplir les lacs de retenues de barrages hydrolélectriques; or deux importants barrages sont actuellement en construction sur le Madeira, en aval de la Bolivie. Donc, dans le cadre du projet HYBAM, les hydrologues s'interrogent sur le rôle des extrêmes de pluie sur les événements sédimentaires et, en conséquence, sur leurs impacts sur les activités humaines.

- La déforestation est très importante en Amazonie, en particulier dans les parties sud et est (Le Tourneau, 2004) et on se demande si au fur et à mesure que les zones déforestées s'étendent on observe une diminution des pluies et/ou une modification de leurs caractéristiques, comme cela est souvent commenté (De Almeida et al. 2007). Des études récentes s'intéressant à l'inverse au rôle de la déforestation sur

l'écoulement concluent sur l'importance de ce lien à partir du début des années 1990 (Callède et al 2004 et 2007).

- Les chercheurs s'intéressent à l'évolution des valeurs extrêmes, notamment dans le cadre du changement climatique global (GIEC 2007). C'est ainsi qu'Haylock et al. 2006 on tenté de diagnostiquer l'évolution des pluies extrêmes en Amérique du Sud. Grâce aux données réunies par 28 scientifiques, l'étude de Haylock et al (2006) montre les tendances linéaires des pluies totales et des extrêmes de pluies sur une grande partie du continent sud américain. ***Figure 1***. On remarque un manque des données sur l'ensemble de l'Amazonie.

Figure 1: Carte de la répartition des stations utilisées pour l'étude de Haylock et al 2006

L'étude des tendances linéaires de différentes modalités des pluies est réalisée au moyen de douze indices pluviométriques calculés entre 1960 et 2000 dans 54 stations. Ils correspondent à des modalités particulières des pluies (par exemple : le nombre de jours dépassant un certain total de pluies, ou nombre de jours consécutifs secs ou humides, ou le total de pluies supérieures au 95ième ou 99ième percentile).

Les analyses montrent que les précipitations totales sont fortement liées aux valeurs extrêmes. Des régions aux évolutions cohérentes entre 1960 et 2000 ont été remarquées avec une diminution des pluies au sud du Pérou et au Chili et une augmentation de celles-ci dans le reste des stations. Ces indices sont corrélés aux températures de surface océanique (TSO) et la variabilité des pluies dépend en particulier de l'Oscillation Australe du Pacifique. Notre objectif est de compléter les informations apportées par Haylock et al (2006), en particulier en comblant le manque d'information évident dans le sud-ouest du bassin amazonien.

Ce travail est enfin motivé par l'acquisition récente de données quotidiennes de pluies en Bolivie dans le cadre de l'Observatoire de Recherche pour l'Environnement HYBAM. On bénéficie pour la première fois de ces données grâce aux accords entre l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et le Service National de Météorologie et d'Hydrologie (SENAMHI) de Bolivie. Une base de données de pluies quotidiennes sur la plus longue période possible, pour un maximum de stations pluviométriques, a été constituée.

La variabilité entre 1950 et 2000 des précipitations et de plusieurs indices mesurant les pluies extrêmes, leur fréquence et leur intensité pour l'ensemble de la Bolivie sera étudiée selon la progression suivante :

- Nous observerons dans la partie ***3.1.1.*** la variabilité des données annuelles de pluies sur l'Amazonie entre 1950 et 2000. Cela nous permettra de ensuite de replacer la variabilité pluviométrique du SW du bassin dans un ensemble plus vaste.

- Nous examinerons dans la partie ***3.1.2.*** les principaux modes de variabilité spatio-temporels (1950-2000) des totaux annuels de pluie, spécifiques à la zone bolivienne.

- Nous calculerons et décrirons les valeurs, dans l'espace bolivien, d'indices de pluies mesurant la fréquence et l'intensité des pluies, les valeurs de pluies extrêmes (partie ***3.2.1.***). Un total de 11 indices sera pris en compte (voir la partie ***méthodologie***).

- Nous procèderons enfin à l'examen de la variabilité temporelle, par analyse de tendance et ACP, de ces indices climatiques dans la partie ***3.2.2.***, avant de conclure.

La Bolivie

Située entre 10° et 23°S et entre 58° et 70°W, la Bolivie possède une superficie de 1 098 581Km², soit près de deux fois la France.

Figure 2: Les reliefs de la Bolivie (explorebolivia.com)

La Bolivie se divise géographiquement en zones distinctes (***Figure 2)*** :

- À l'est, une plaine alluviale dont le centre et le nord appartiennent au bassin amazonien et le sud au bassin de la Plata (Paraguay-Parana). A l'est de la plaine des reliefs bas appartiennent au bouclier brésilien
- À l'ouest:
  - Des vallées intermédiaires : Les Yungas, vallées des pentes orientales au nord des Andes (boliviennes), dont les contreforts sont recouverts par la forêt dense. Elles sont humides, car elles sont bien exposées à la mousson sud-américaine. Les vallées du sud sont plus sèches (par exemple la vallée de Tarija).
  - Deux cordillères qui dépassent 6000 mètres d'altitude (point culminant en Bolivie : Nevado Sajama à 6542m) et bordent un haut et vaste plateau, l'Altiplano, autour de 3800 mètres. Celui-ci abrite la majeure part de la population bolivienne. On y trouve les villes La Paz et Oruro.

Les versants nord orientaux des Andes et le nord et le centre de la plaine font partie du bassin amazonien. ***Figure 3***.

Le bassin amazonien

D'une surface de près de 6 000 000 Km², ce bassin est réparti sur 7 pays : Brésil (53%), Pérou (21%), Bolivie (15%), Colombie (7%), Equateur (3%), Guyana et Venezuela (1%). La plus vaste forêt ombrophile de la planète s'étend au-delà de cette zone, sur 9 états. Il n'existe pas de gestion commune de cette forêt mais des préoccupations communes au niveau international. Elle dépend des politiques de gestion et de conservation du milieu de chaque pays. Cette région subit une déforestation intense qui ne cesse de l'être depuis la décennie 1970 (Callède et al 2004, 2007, ***tableau 1***). En Bolivie, Equateur et Pérou, la déforestation a commencé entre 1976 et 1980, alors qu'elle a débuté avant 1976 au Brésil et en Colombie. Le taux de surfaces déforestées est relativement constant en Equateur et au Brésil il ne cesse d'augmenter, alors qu'il diminue en Bolivie et au Pérou, aux alentours de 1990. Il n'y a qu'au Venezuela que la forêt n'a pas (encore) été touchée. Les plus grandes surfaces déforestées sont situées sur le territoire brésilien. C'est en Equateur qu'on enregistre les plus forts taux de déboisement. En trente ans, cet état a perdu plus de la moitié de sa forêt. Les régions les plus touchées par le déboisement composent un vaste arc au sud de l'Amazonie. Cet arc se déplace lentement vers le nord, c'est-à-dire en direction de la forêt profonde, mais certains axes y ont permis une entrée directe : la route BR-364 dans le Rondônia (Brésil) et la Transamazonienne ont été les foyers d'un intense déboisement depuis les années 1970. En Bolivie le développement du réseau routier a aussi favorisé le déboisement, notamment autour de Santa Cruz de La Sierra dans la plaine. La forêt est remplacée par des systèmes agricoles simples (élevage bovin et monoculture du soja par exemple), très rentables (LeTourneau 2004).

Pays	Forêt (1976)	Déforestation : superficies cumulées (km²)							Taux 2003
		1976	1980	1985	1990	1995	2000	2003	
Bolivie	472510	0	4700	12707	21704	30022	36644	42030	8,9
Brésil	2368167	4760	20951	44590	67728	88674	108779	122142	5,2
Pérou	735171	0	21450	43847	62729	78096	89947	95371	13,0
Equateur	109440	0	3580	8989	14923	21810	31810	45435	41,5
Colombie	326221	9240	13286	18344	23397	28460	33518	36553	11,2
Venezuela	50811	0	0	0	0	0	0	0	0
Totaux	*4062320*	*14000*	*63967*	*128527*	*190481*	*247062*	*300699*	*341531*	
Taux %		*0,34*	*1,57*	*3,16*	*4,69*	*6,08*	*7,40*	*8,41*	

Tableau 1 : Superficies déboisées, de 1976 à 2003 sur le bassin amazonien limité à Óbidos. La colonne "Forêt (1976)" correspond aux résultats de l'analyse de la Carte UNESCO. Source : Callède et al. 2007

Figure 3: La Bolivie dans les bassins de l'Amazone et de La Plata. Stations présentant des augmentations de débits dans ces bassins. Source : Transboundary Freshwater Dispute Database (TFDD)

Le climat de la zone intertropicale est chaud et humide, caractérisé par de faibles amplitudes thermiques saisonnières (Beltrando 2004). En Amazonie, le total des précipitations annuelles est montré ***figure 4A*** (source : Espinoza et al 2007). Les pluies les plus importantes (autour de 3000 mm/an) sont enregistrées autour de l'équateur, dans le nord-ouest du bassin, et près de l'embouchure de l'Amazone au nord-est. Elles diminuent des régions équatoriales vers les tropiques et aussi de la plaine amazonienne vers les Andes, à l'échelle du bassin. Leur répartition saisonnière permet d'y distinguer les climats équatorial et tropical (des deux l'hémisphères), à tendance humide ou sèche. L'Amazonie possède donc un grand canevas de régimes pluviométriques (***figure 4B***, source : Espinoza et al 2007).

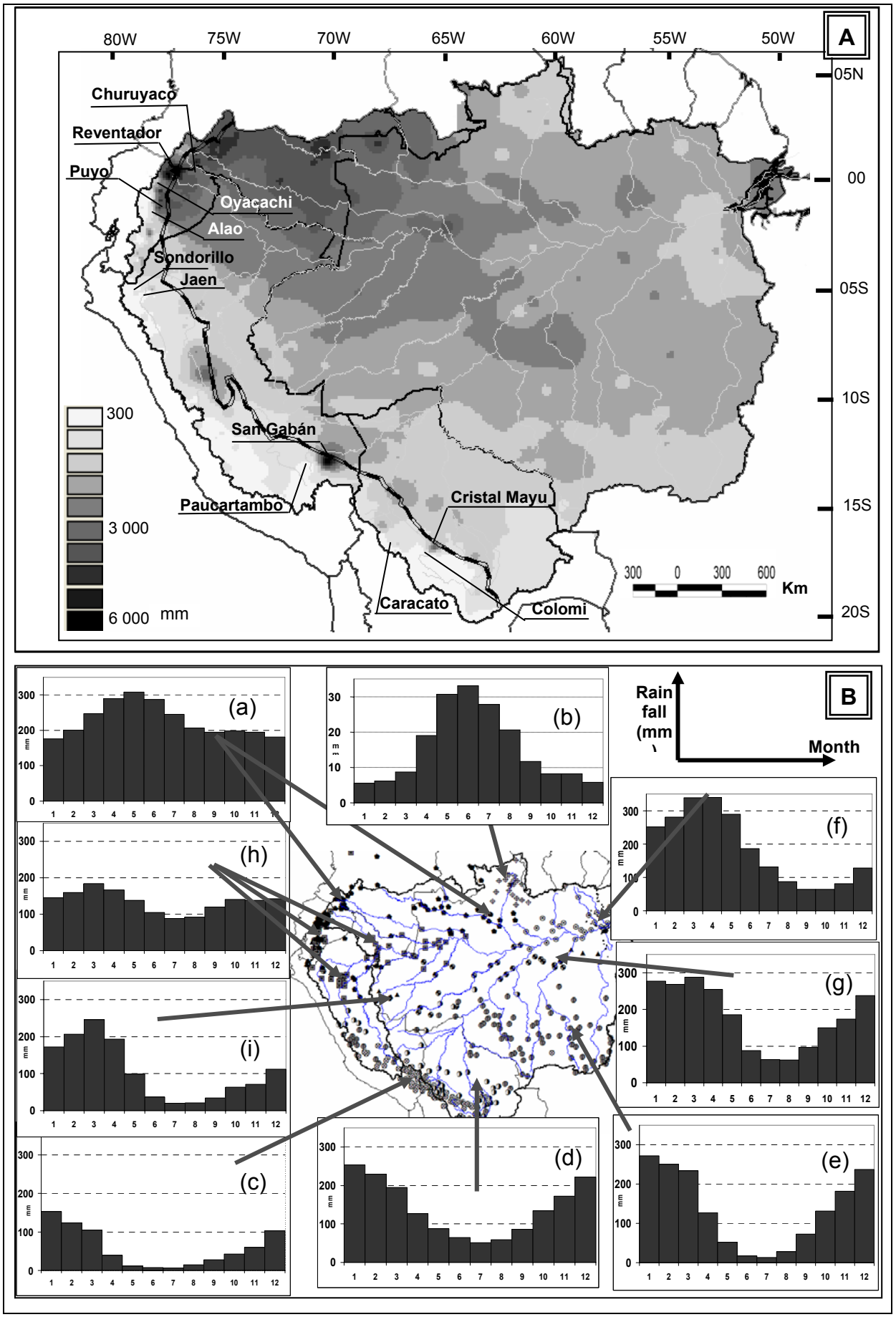


Figure 4: Total annuel des précipitations (A) et cycles moyens annuels des pluies (B) sur l'ensemble du bassin amazonien (1964-2003).
Source : J. C. Espinoza Villar 2006 et 2007

La circulation générale de l'atmosphère (enveloppe fluide) et la répartition de l'humidité sont expliquées par une forte contribution des variations spatiales et temporelles des apports énergétiques. La quantité d'énergie reçue par la planète varie sous l'action de facteurs astronomiques, externe au système TOA (Terre-Océan-Atmosphère), et physico géographiques, internes au système TOA (Beltrando 2004). Durant l'été austral (DJF), la circulation générale en Amérique du Sud est gouvernée par des vents d'est (alizés) qui se sont chargés de vapeur d'eau au dessus de l'Atlantique tropical. Ce flux de mousson est dirigé vers la dépression du Chaco mise en place à la faveur du réchauffement du continent en été austral. De plus, ce flux se recharge en eau en passant au dessus de la forêt amazonienne sujette à une forte évapotranspiration (Salati et al. 1978). Associé à la convection sur le sol échauffé, ce flux apporte de fortes précipitations sur le sud de l'Amazonie durant l'été austral (***Figure 5***).). En hiver, la mousson sud-américaine se retire, il y a un renforcement du géopotentiel sur l'Amérique du sud tropicale (***Figure 5***). Dans le sud de l'Amazonie, la saison hivernale est sèche car l'air est stable et manque la vapeur d'eau.

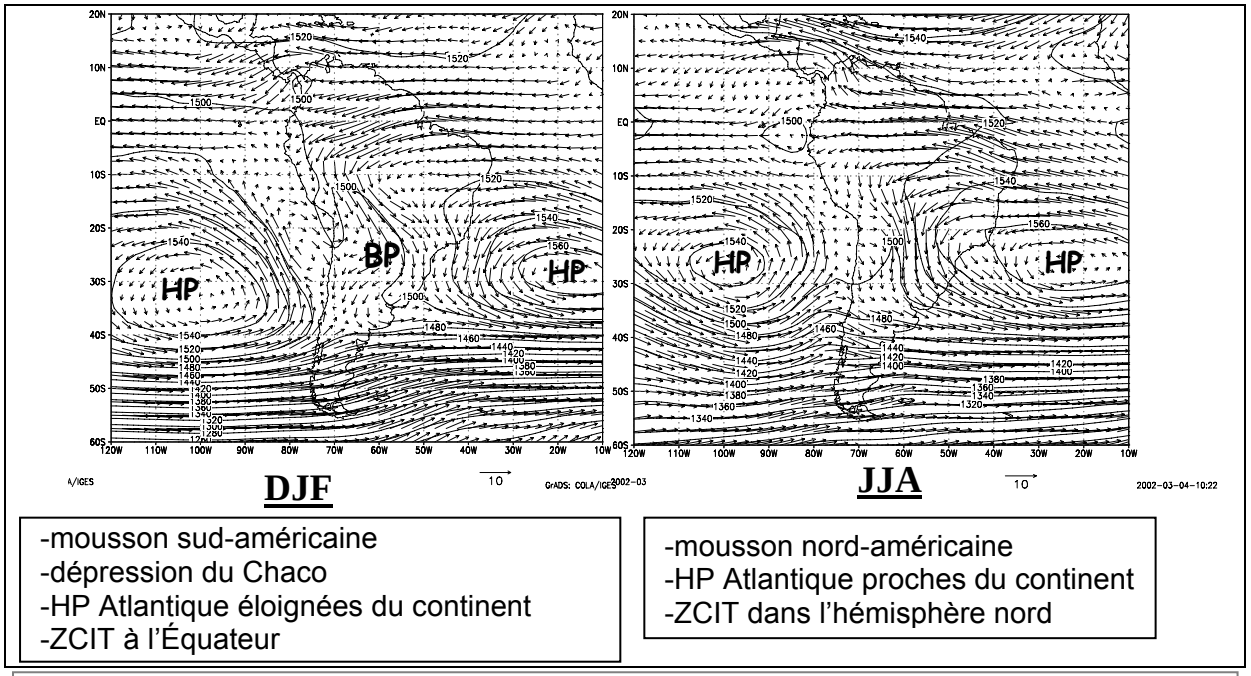
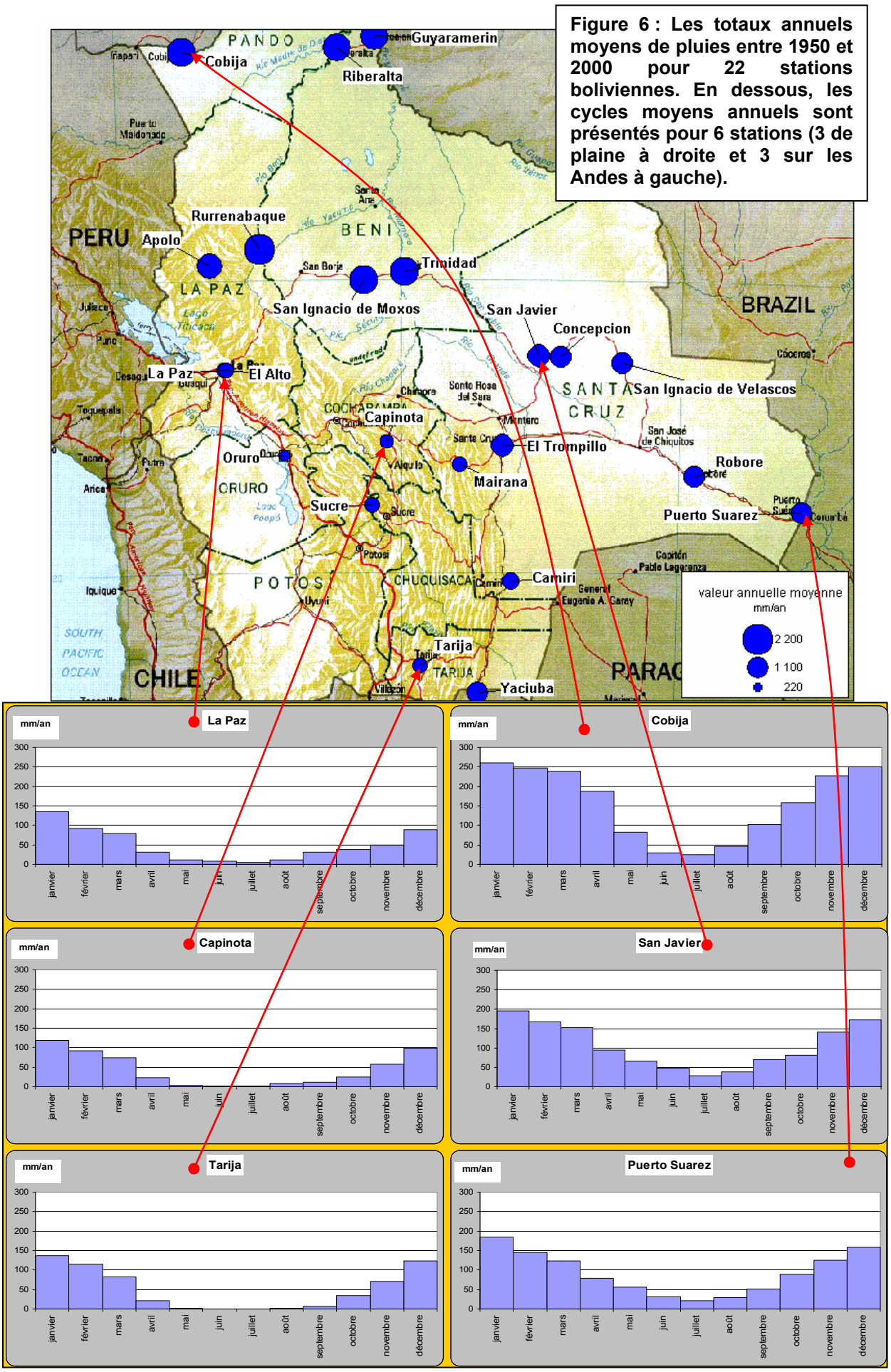


Figure 5: Vents et géopotentiel à 850 hPa. Trajet du flux de mousson. Source : données NCEP-NOAA, Ronchail 2002.

Bien que la Bolivie soit située dans la zone intertropicale, elle est soumise à des conditions thermiques très diverses en raison de l'importante variation d'altitude. On passe de valeurs de températures très élevées (25°C annuels) dans les régions de basse altitude, à des températures tempérées dans les vallées andines et des températures très basses (5 à 10°C annuels) sur l'Altiplano. Comme pour l'Amazonie, mais à l'échelle de la Bolivie, les pluies moyennes diminuent de la plaine aux Andes et en fonction de la latitude (***figure 6***). Elles suivent toujours un régime tropical (***figure 6***) mais avec une saison sèche plus ou moins longue en fonction de la position altitudinale des stations et de la latitude.

Figure 6 : Les totaux annuels moyens de pluies entre 1950 et 2000 pour 22 stations boliviennes. En dessous, les cycles moyens annuels sont présentés pour 6 stations (3 de plaine à droite et 3 sur les Andes à gauche).



2. MATERIEL ET METHODE

À partir de différentes bases de données (partie ***2.1.***) et grâce à des logiciels d'exploitation de ces données (partie ***2.2.***), diverses analyses ont pu être réalisées afin de satisfaire les objectifs de cette étude (parties ***2.3.*** à ***2.5.***).

2.1. Les bases de données

La première se constitue des totaux annuels de pluies (mm) obtenus entre 1950 et 2000 pour 42 stations en Amazonie (***figure 7***). Ils sont calculés sur la base de l'année hydrologique, allant de novembre à décembre, pour convenir à l'ensemble des stations (***figure 4***). Ces stations sont largement espacées, localisées en particulier dans le nord et le sud-ouest du bassin amazonien, la Bolivie.

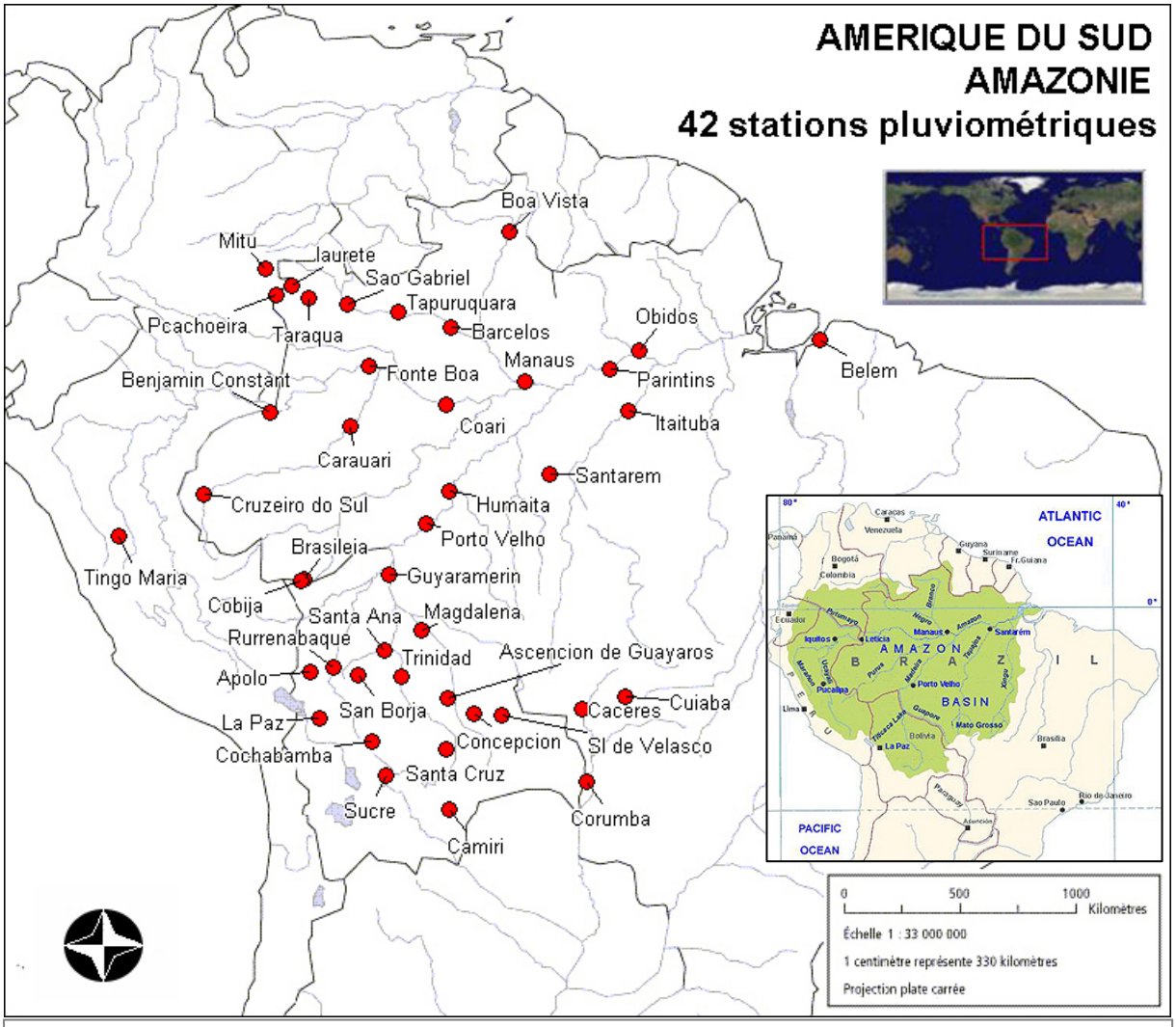


Figure 7: 42 stations pluviométriques pour lesquelles nous possédons les valeurs annuelles entre 1950 et 2000.

Cette base de données simple, au format Excel et relativement complète, pourra être utilisée telle qu'elle se présente (tableau à 2 dimensions) lors des analyses.

La deuxième base de données, au format .mdb (mega data base), de taille impressionnante (611 Mo), est beaucoup plus complexe. Elle regroupe les données pluviométriques quotidiennes (en mm) et d'autres informations (coordonnées, altitudes, gestionnaires, ...) pour 1036 stations bolivienne, sur la plus longue période disponible. Nous l'appellerons 'base de données Bolivie'. Comme nous l'avons dit en introduction, cette base de données a été réalisée dans le cadre du projet HYBAM entre l'IRD et le SENAMHI de Bolivie. C'est la première fois dans cette zone qu'une telle base de données est récoltée. Elle a été recueillie auprès de différents organismes gestionnaires (SENAMHI, AASANA : Administracion de Aeropuertos y Servicios Auxiliares a la Navigacion Aerea, ...).

Les données de cette impressionnante base doivent être triées afin de déterminer le jeu de stations, répondant à certains critères (partie ***2.3.***), que nous utiliserons pour nos différentes analyses.

Enfin, les données du Multivariate ENSO Index (MEI), qui permettent de connaître la variabilité des conditions océaniques et atmosphériques dans le Pacifique équatorial sont disponibles à l'adresse suivante http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei_index.html.

2.2. Les logiciels utilisés

La base de données « Bolivie » et ses informations sont visualisables à partir du logiciel **HydrAccess version 3.1**. Il a été créé par Philippe Vauchel (IRD) et correspond à une extension du logiciel Microsoft Office Access. Il permet de sélectionner et structurer des données pluviométriques ou hydrologiques et de les convertir en fichier Excel ou texte. Il est téléchargeable gratuitement sur le site : http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess.htm. Il nous permet de lire et extraire les longues séries de pluies quotidiennes pour un grand nombre de stations pluviométriques. Il nous aide également au tri de la base de données (cf. partie ***2.3.***).

L'information sur la façon de calculer les indices climatiques - traduisant les pluies annuelles totales, leurs fréquences et leurs extrêmes – est mise à disposition dans l'étude de Haylock et al (2006). Les opérations se déroulent sous le logiciel de statistiques **'R', version 2.4.1** 2006, téléchargeable gratuitement sur le site http://www.r-project.org. Le nouveau

programme associé **RClimDex, version 1.0**, permet le calcul de ces indices climatiques. Il a été créé par Xuelin Zhang et Feng Yang en 2004. Ce dernier est également téléchargeable gratuitement à partir du site web de Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI) : http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RClimDex/rclimdex.r. L'utilisation de RClimDex est décrite en ***annexe 2***.

Les opérations et les analyses statistiques simples (calculs de moyennes, tests de corrélation de Bravais-Pearson) sont directement effectuées sur le logiciel **Microsoft ® Office Excel 2003**. Il nous permet également de restructurer les bases de données et de montrer, sous forme de graphiques, comment s'organisent les valeurs dans le temps.

L'étude de la variabilité spatio-temporelle des données s'effectue par des analyses en composantes principales (ACP). Les ACP sont réalisées grâce au programme associé à Excel : Addinsoft XLStat, version 5.1 pro. De plus, il existe une version d'essai qui peut être téléchargée pour 30 jours sur le site : http://www.xlstat.com.

Les cartes thématiques résultantes des analyses spatiales sont générées sur le logiciel de systèmes d'informations géographiques (SIG) : **MapInfo ® professionnel version 6.0**.

Ces logiciels fonctionnent sous Windows. Des aides et des tutoriaux sont disponibles sur internet.

2.3. Le tri de la base de données 'Bolivie'

Cette base comporte les données quotidiennes de 1036 stations réparties en Bolivie. Les périodes d'enregistrement des données aux différentes stations n'est pas la même. Par exemple, pour la station La Paz (San Calixto), la période d'enregistrement commence en 1917 et s'étend jusqu'en février 2007 (date de réception de cette base de données). De plus, les stations peuvent dysfonctionner pendant des durées variables. Il nous est alors nécessaire de procéder à un tri selon trois critères :

- Période d'enregistrement : elle doit commencer avant 1950 et se terminer après 2000. Le logiciel Hydraccess nous permet d'extraire les stations possédant des valeurs sur cette période.

- Lacunes : si le pourcentage de lacunes des données est trop élevé dans une station, elle est exclue. Nous avons limité ce pourcentage à 4,1% ce qui correspond à moins de 15 jours de valeurs manquantes pour chaque année entre 1950 et 2000. Nous avons choisi cette valeur limite sur le modèle de Haylock et al (2006), car les indices climatiques ne sont pas calculés au-delà par RClimDex. HydrAccess calcule ces pourcentages de lacune (cf. partie ***4.***).

- Test d'homogénéité : il a été accompli par Jhan Carlo Espinoza Villar (Espinoza et al. 2007) sur les données mensuelles d'un millier de stations du bassin amazonien. Il s'agit d'un test de type MVR (Méthode du Vecteur Régional – Hiez, 1977 et Brunet Moret 1979) réalisé sur la période 1960-2000. Ce test d'homogénéité permet de comparer la série chronologique de données d'une station aux données des stations voisines (dans une même région). Ainsi nous pouvons vérifier si, sur une période et une région données, une station n'enregistre pas des données aberrantes. De plus, ce test d'homogénéité permet, au pas de temps mensuel, de reconstituer des données manquantes dans la série chronologique des pluies d'une station en utilisant les données des stations voisines.

  Certaines stations n'ont pas satisfait au test d'homogénéité, car elles sont isolées, ce qui est parfois le cas en Bolivie, à l'extrémité sud-ouest du bassin amazonien. Nous garderons quand même certaines d'entre elles, car elles correspondent à des stations réputées de bonne qualité selon l'expérience de terrain des hydrologues HYBAM (par exemple : El Alto, Guayamerin, Puerto Suarez, ...).

La qualité des données quotidiennes a été contrôlée statistiquement par Excel et visuellement, grâce aux graphiques fournis par RClimDex. Il est vérifié, par exemple que des valeurs fortes à des stations voisines sont en adéquation. Partant du principe que les stations retenues par Jhan Carlo Espinoza au pas de temps mensuel conviennent également au pas de temps quotidien, les tests n'ont pas été poussés plus loin.

Ce tri permet d'extraire un jeu de 27 stations (***figure 8***) réparties sur la Bolivie. Leurs coordonnées géographiques (latitudes et longitudes) de même que leurs positions altitudinales (en mètre) sont visualisables dans la base de données grâce à HydrAccess (***tableau 2***).

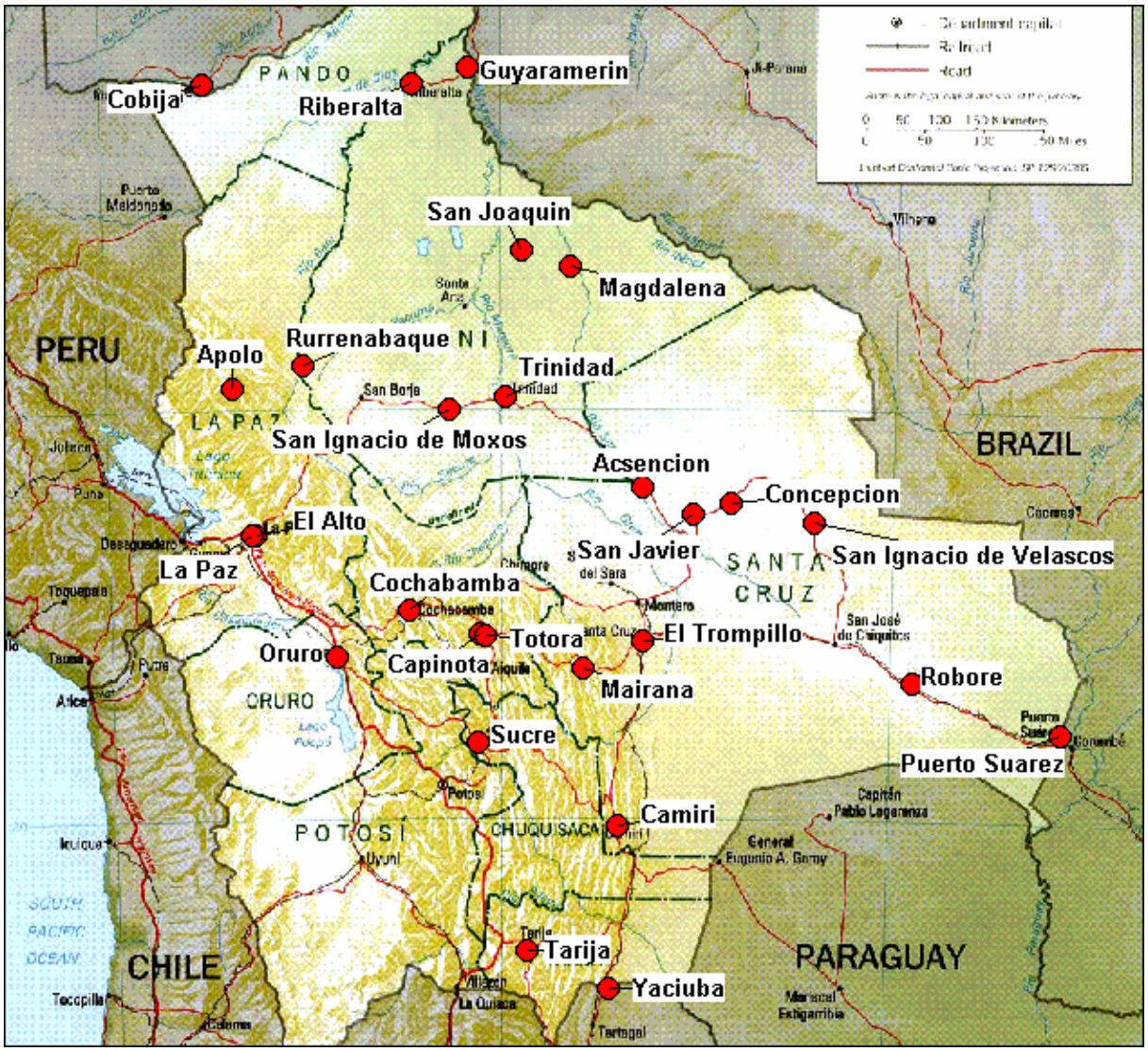


Figure 8: Localisations des 27 stations boliviennes répondants aux critères du tri de la base de données 'Bolivie' (données : de 1950 à 2000 au moins, moins de 4,1% de lacunes et ayant satisfait au test d'homogénéité).

Situation	Nom	Latitude (DD)	Longitude (DD)	altitude (m)
Plaine	Guyaramerin	-10,8	-65,4	130
	San Joaquin	-13,04	-64,66	139
	Magdalena	-13	-64,1	141
	Riberalta	-11	-66,07	141
	Puerto Suarez	-18,98	-57,81	152
	Trinidad	-14,82	-64,91	159
	San Ignacio de Moxos	-14,96	-65,63	160
	Rurrenabaque	14,43	67,50	204
	Cobija	-11,08	-68,87	235
	Ascencion de Guayaro	-15,93	-63,16	257
	Robore	-18,34	-59,72	265
	San Ignacio de Velascos	-16,4	-61	410
	El Trompillo	-17,8	-63,17	473
	Concepcion	-16,3	-62,1	490
	San Javier	-16,27	-62,5	710
Vallée	Camiri	-20,1	-63,05	810
	Yacuiba	-22,01	-63,67	1050
	Mairana	-18,12	-63,95	1350
	Apolo	-14,72	-68,41	1949
	Tarija	-21,54	-64,71	2080
	Capinota	-17,71	-65,26	2400
	Cochabamba	-17,41	-66,17	2550
	Totora	-17,73	-65,19	2900
	Sucre	-18,8	-65,53	2903
Altiplano	La Paz	-16,49	-68,13	3658
	Oruro	-17,96	-67,11	3702
	El Alto	-16,5	-68,17	4000

Tableau 2: Coordonnées spatiales (latitudes, longitudes et altitudes) des stations retenues pour l'étude des pluies en Bolivie

2.4. Les indices pluviométriques

Les indices pluviométriques retenus qui mesurent la fréquence des pluies, leur intensité et les valeurs extrêmes, sont ceux de l'étude de Haylock et al (2006) ; ils sont présentés dans le ***tableau 3***. Ces indices sont calculés annuellement à partir des données quotidiennes de pluies (en mm), sur la période 1950-2000, grâce au programme RClimDex.

Indice	Nom de l'Indice	Définition	Unité
PRCPTOT	wet-day precipitation	Précipitation annuelle totale	mm
SDII	Simple Daily Intensity index	Précipitation moyenne des jours pluvieux	mm/jour
CDD	Consecutive Dry Days	nombre maximal de jours sans pluie consécutifs	jours
CWD	Consecutive Wet Days	nombre maximal de jours pluvieux consécutifs	jours
R1 mm	precipitation days	Nombre de jours où RR ≥ 1 mm	jours
R10 mm	heavy precipitation days	Nombre de jours où RR ≥ 10 mm	jours
R20 mm	very heavy precipitation days	Nombre de jours où RR ≥ 20 mm	jours
R95p	very wet day precipitation	Précipitations totales quand RR > 95ième percentile de 1951-2000	mm
R99p	extremely wet day precipitation	Précipitations totales quand RR > 99ième percentile de 1951-2000	mm
RX1day	max 1-day precipitation	Précipitations maximales de l'année durant 1 journée	mm
RX5day	max 5-day precipitation	Précipitations maximales de l'année durant 5 jours consécutifs	mm

Tableau 3: Les indices pluviométriques calculés par le programme RClimDex, leurs définitions et unités. RR correspond à 'Rainfall Rate' (total de précipitation). Les 'Wet-days' (jours pluvieux) ont un RR ≥ 1 mm. Tous les indices sont calculés annuellement de septembre à août entre 1950 et 2000.

2.5. Corrélations et Analyses en Composantes Principales (ACP)

Les analyses de corrélation sont effectuées sur Excel entre différentes variables. Les séries chronologiques annuelles des totaux de pluies et des indices pluviométriques sont confrontés au temps pour mettre en évidence des tendances (ou leur absence), à des coordonnées terrestres pour analyser la variation dans l'espace des phénomènes et aux valeurs du MEI pour mesurer un éventuel lien avec l'Oscillation Australe du Pacifique. La corrélation linéaire de Bravais-Pearson permet de rendre compte du lien éventuel (dépendance/indépendance) entre des couples de variables. La table de Bravais-Pearson, indique la limite de significativité de cette corrélation en tenant compte du risque d'erreur choisi. Dans cette étude, le risque d'erreur retenu est de 5%. Dans le cas où ces variables sont significativement corrélées, le signe du coefficient de Pearson permet de connaître le sens du lien entre ces variables.

Des ACP sont réalisées, grâce au programme XLStat, sur les totaux annuels de pluies dans les stations disponibles pour l'étude (partie ***3.1.***) et sur les indices pluviométriques (partie ***3.2.***) en Bolivie. Les ACP permettent d'extraire les principaux modes de variabilité dans le temps et dans l'espace d'une matrice. Ces modes sont classés en ordre décroissant selon le pourcentage de variance des données de départ qu'ils résument. Ils sont par construction indépendants.

3. RÉSULTATS

Les résultats de cette étude seront présentés en 2 parties :

- On regardera en premier lieu la variabilité spatiale et temporelle des totaux de pluies sur l'Amazonie d'abord, puis sur la Bolivie.

- Dans la seconde partie, on analysera les indices pluviométriques sur la Bolivie. Cette partie est la plus importante de cette étude car elle contient des informations inédites. On regardera d'abord les valeurs moyennes et les tendances linéaires, puis la variabilité spatio-temporelle de ces indices.

2.4. Variabilité spatio-temporelle des totaux annuels de pluies

2.4.1. En Amazonie

On a réuni un total de 42 stations amazoniennes pour lesquelles on dispose des données pour l'année hydrologique qui va de novembre à octobre*, sur la période 1950-2000 (***figure 7***). Ces stations sont largement réparties dans l'ouest du bassin amazonien (nord et sud). On analysera les variabilités spatiales et temporelles des pluies annuelles sur l'Amazonie entre 1950 et 2000.

La ***figure 9*** (cf. ***figure 4***) permet de rendre compte de la différence de totaux pluviométriques (grâce aux moyennes annuelles calculées sur la période 1950-2000) dans la vaste région amazonienne.

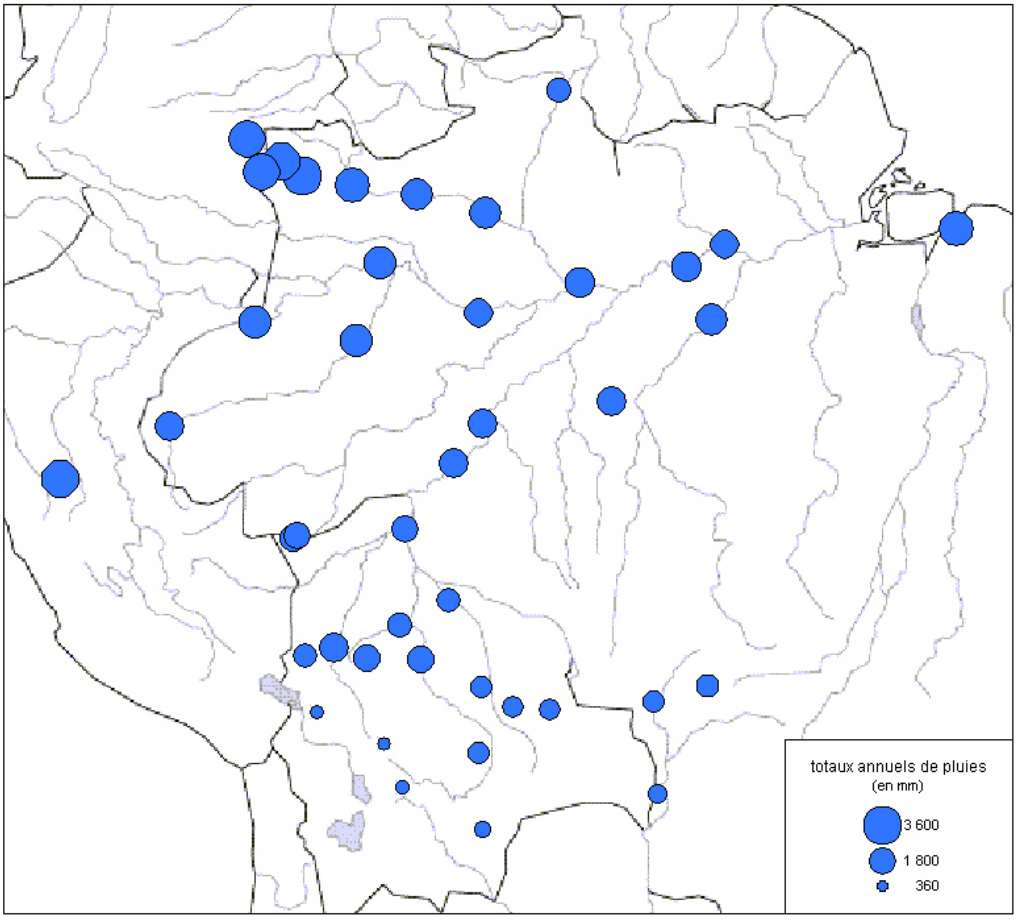


Figure 9: Les moyennes annuelles de pluies calculées entre 1950 et 2000 pour les 42 stations pluviométriques amazoniennes.

* Ce cycle hydrologique est un compromis entre celui du sud du bassin, de type tropical, et celui du nord-ouest, de type équatorial.

On peut faire une nette distinction entre les moyennes annuelles de pluies selon un gradient nord/sud. Sauf pour une exception (Rurrenabaque), les pluies annuelles moyennes ne dépassent pas 2000 mm/an en Bolivie tandis que dans le nord de l'Amazonie, elles ne sont jamais inférieures à 2000 mm/an. Cette vaste zone regroupe différents régimes pluviométriques (cycles moyens annuels non présentés, cf. ***figure 4***) : équatorial au nord et tropical plus ou moins humide au sud. En Bolivie, il existe également un gradient altitudinal (qui sera détaillé plus tard). On remarque que la station Cochabamba, localisée dans un bassin intra-andin, enregistre les pluies les plus faibles par effet d'abri.

Ces moyennes sur 50 ans masquent différents modes de variation des pluies. Pour déterminer ces principaux modes de variabilité dans le temps et dans l'espace dans cette vaste zone d'étude, des ACP sont effectuées sur les pluies annuelles de ces 42 stations entre 1950 et 2000.

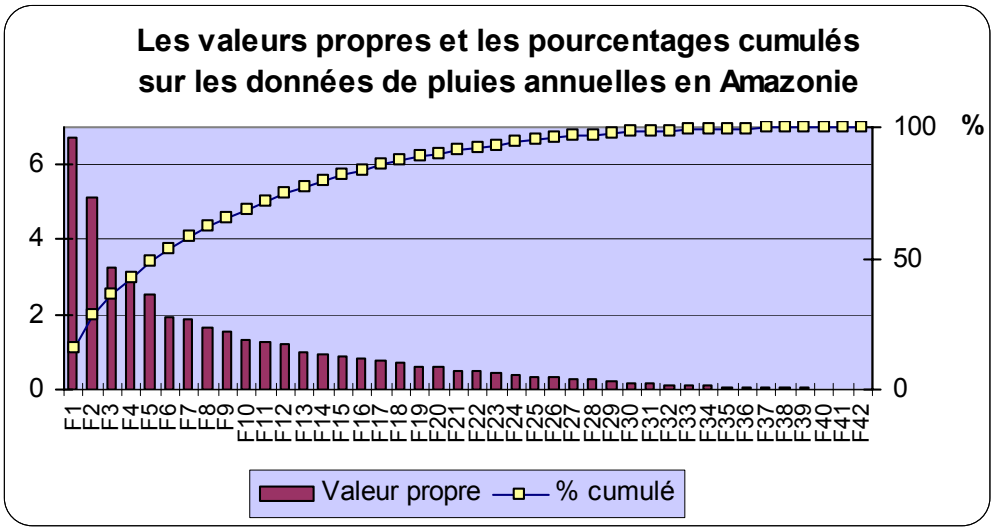


Figure 10: Valeurs propres et pourcentages cumulés de tous les axes factoriels expliquant la variabilité des pluies au dessus de l'Amazonie

Les cinq premiers axes expliquent près de la moitié (**49%**) de la variabilité des pluies au-dessus de l'Amazonie (***figure 10***). C'est un résultat modeste, mais il est aisément expliqué par le fait que sur cette importante surface d'étude la variabilité pluviométrique est très importante et que les effets locaux sont nombreux. L'analyse des axes F3 à F5, n'a révélé que certaines fluctuations locales et non des phénomènes mettant en jeu des ensembles de stations cohérents dans l'espace. Ainsi, on a décidé de ne garder que les deux premiers axes, car ils se détachent largement des autres (***figure 10***). De plus, même s'ils n'expriment que **28%** de la variabilité totale, ils représentent les principaux modes de variabilité. Ils sont donc les plus significatifs pour un maximum de stations. Nous allons analyser le comportement dans l'espace-temps de ces deux premiers axes factoriels.

2.4.1.1. Variabilité temporelle et spatiale selon F1

L'axe factoriel 1, représente **16%** de la variance totale des pluies annuelles en Amazonie. Nous observons une variabilité généralement pluri décennale, sur le long terme donc, avec une nette coupure en 1976. Ainsi, deux périodes s'opposent : 1950-1975 et 1976-2000. On peut noter qu'à partir de 1993, la variabilité devient plutôt interannuelle (***Figure 11***).

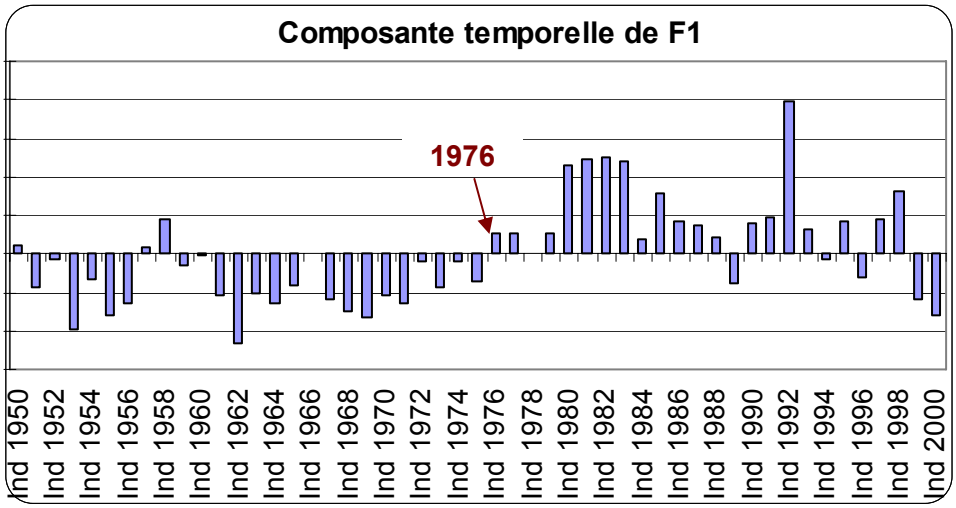


Figure 11: Coordonnées des individus sur l'axe factoriel 1 résultant d'une ACP sur les totaux de pluies en Amazonie entre 1950 et 2000.

À cet axe factoriel F1, est aussi associée une opposition spatiale nord/ sud (***figure 12***). Ce mode de variation touche, en particulier, les stations situées au nord du fleuve Amazone et les stations situées dans la plaine centrale de la Bolivie. Il pleut moins dans la plaine centrale de Bolivie entre 1950 et 1975, quand il pleut plus au nord de l'Amazonie. Le contraire est observé de 1976 à 2000.

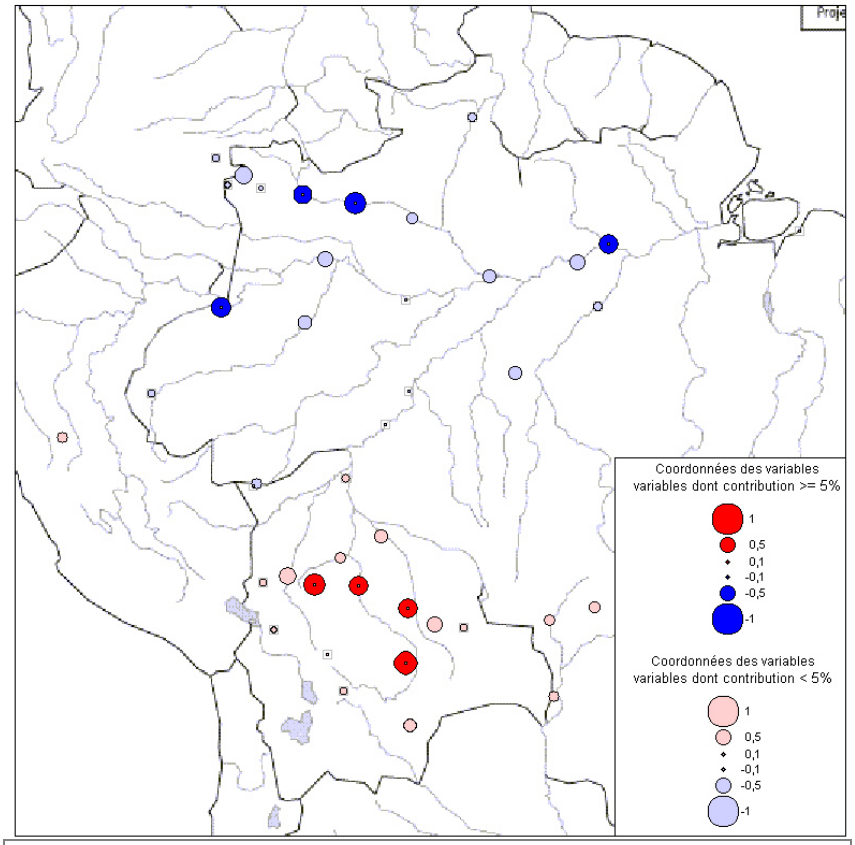


Figure 12: Variabilité spatiale des pluies en Amazonie selon l'axe factoriel F1. En rouge et bleu apparaissent les stations qui contribuent à plus de 5% à la formation de l'axe ; en rose et bleu pale, les stations qui contribuent à moins de 5%

2.4.1.2. Variabilité spatiale et temporelle selon F2

12% de la variabilité des pluies est expliquée par l'axe factoriel 2. On remarque que cette variabilité temporelle est d'ordre pluri décennale avec moins de pluies dans l'ensemble des stations durant les périodes : 1950-1969 et 1990-2000, et plus de pluies entre 1970 et 1989 (***figure 13***). L'année 1983 correspond à la forte anomalie 'El Niño' de l'année hydrologique 1982-1983, et constitue une exception durant la période 1970-1989.

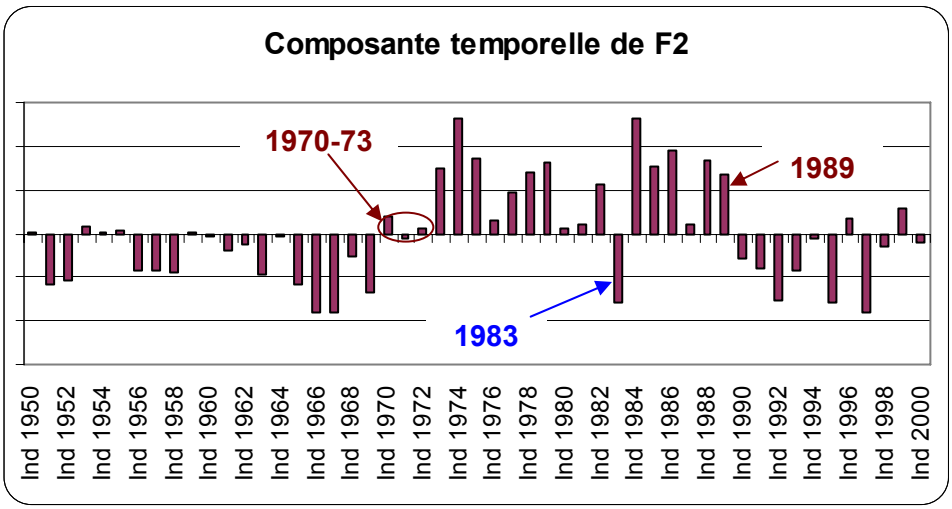


Figure 13: Coordonnées des individus sur l'axe factoriel 2 résultant d'une ACP sur les totaux de pluies en Amazonie entre 1950 et 2000.

L'axe factoriel F2 semble affecter les stations amazoniennes principalement le long d'une courbe partant du nord-est du Brésil, suivant la plaine de l'Amazone et semble s'étaler le long de la cordillère des Andes (***figure 14***), c'est à dire le long de la trajectoire du flux de mousson sud-américaine (***figure 5***). Les contributions des stations andines et du centre de l'Amazonie sont plus importantes. Entre 1950 et 1970, il pleut moins et les pluies sont plus abondantes au contraire de 1970 à 1990 (excepté en 1983). Après 1990, les pluies sont à nouveau moins importantes.

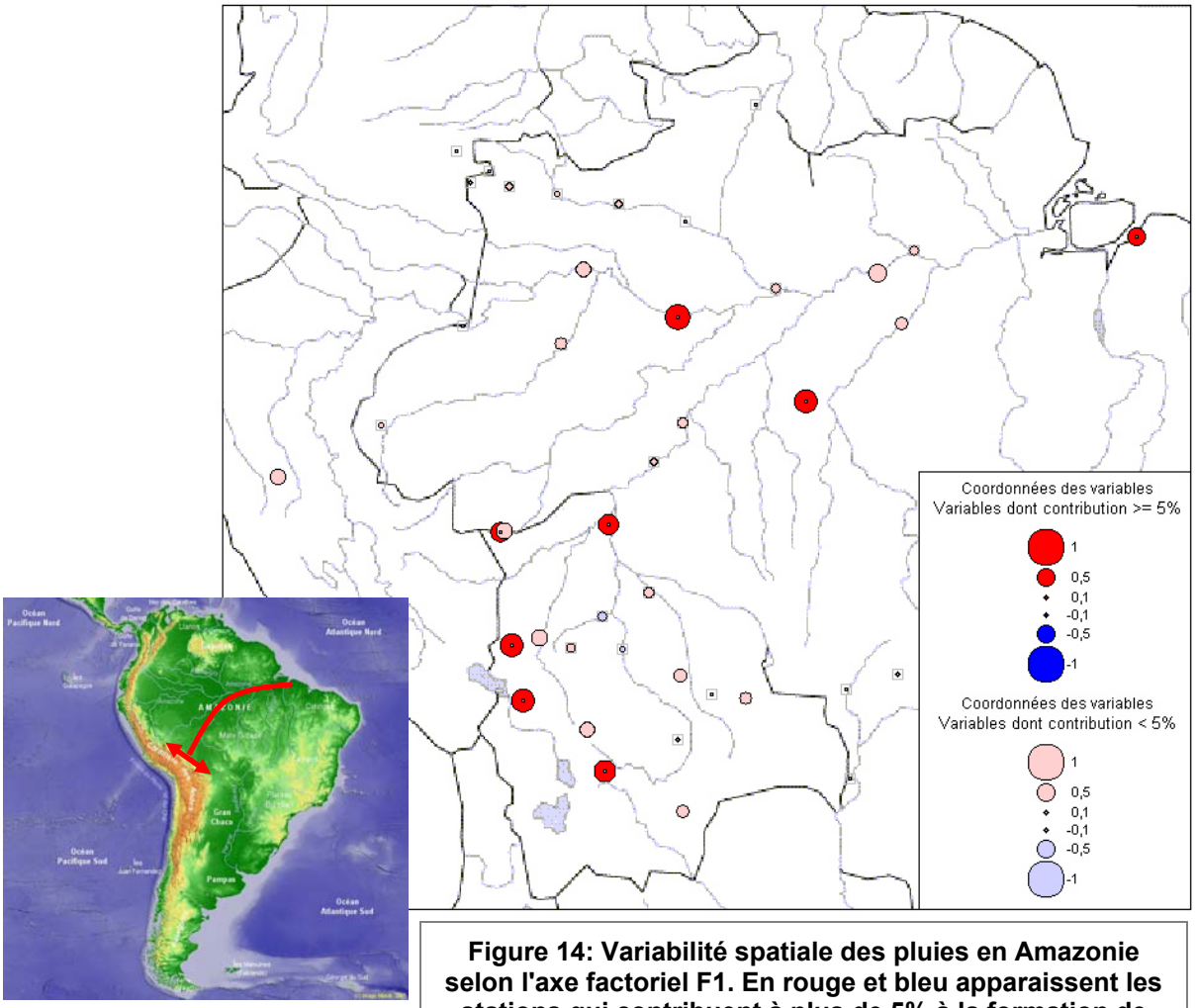


Figure 14: Variabilité spatiale des pluies en Amazonie selon l'axe factoriel F1. En rouge et bleu apparaissent les stations qui contribuent à plus de 5% à la formation de l'axe ; en rose et bleu pale, les stations qui contribuent à moins de 5%

On a pu remarquer sur la ***figure 10*** que ces deux premiers axes factoriels F1 et F2 se détachaient visiblement de tous les autres par leurs valeurs propres. À eux seuls ils expliquent près de 30% de variabilité des pluies au dessus du vaste bassin amazonien. Ils possèdent tous les deux des périodes plus ou moins humides distinctes sur le long terme, entre 1950 et 2000, qui s'inversent à l'échelle pluri décennale à des dates différentes (1976 sur F1, 1970 et 1990 sur F2). Sur cette vaste région, ces modes sont spatialement bien représentés. Ils affectent de nombreuses stations dans des zones cohérentes spatialement (***figures 12 et 14***). F1 et F2 sont représentatifs d'une majorité des stations dont nous disposons pour l'étude, cela représente alors une grande part de l'Amazonie. Nous pouvons dire que ces deux seuls axes factoriels sont de bons représentants de la principale part de la variation totale des pluies sur cette zone.

2.4.1.3. Explication des modes de variabilité observés

On sait qu'un des principaux moteurs de la variabilité des pluies dans cette région du monde est l'Oscillation Australe du Pacifique (ENSO). ENSO possède une variabilité interannuelle mais également une variabilité à long terme : de 1950 à 1975, il se produit plus souvent et fortement des évènements La Nina et entre 1976 et 2000, ce sont les anomalies El Nino qui sont plus fréquentes et importantes (Trenberth and Hurrel 1994) (***figure 15***). C'est pourquoi, on va analyser l'existence d'un lien entre la composante temporelle de chaque axe et le MEI (Multivariate ENSO Index), (***figure 16***). Les valeurs du MEI sont construites à partir de variables décrivant l'atmosphérique et l'océan au dessus du Pacifique (***annexe 2***, **figure 15**).

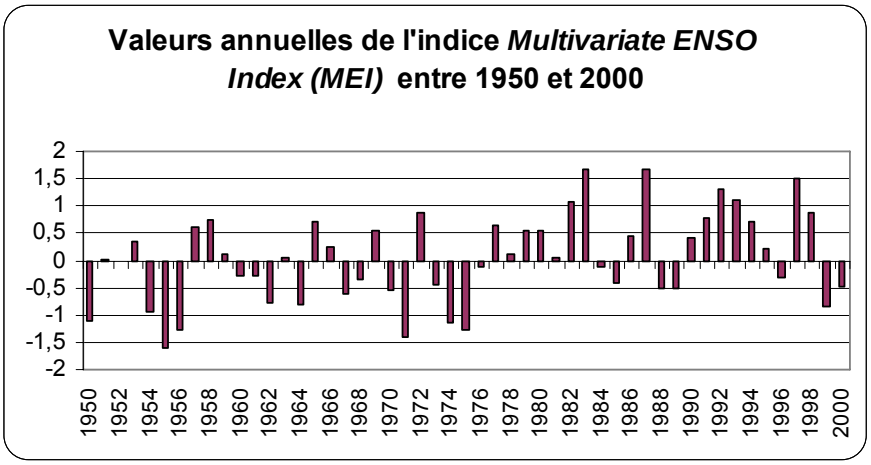


Figure 15: Valeurs annuelles (sur l'année calendaire) du MEI (Multivariate ENSO Index) entre 1950 et 2000

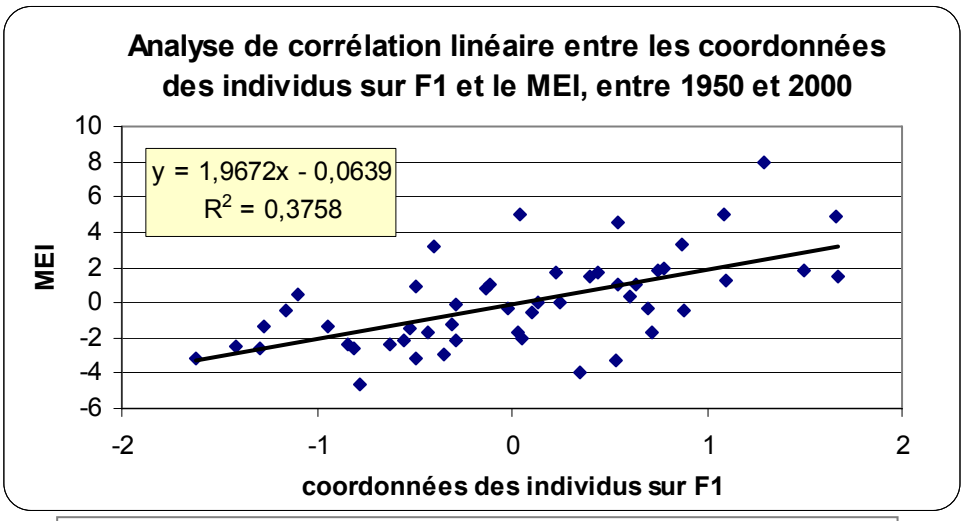


Figure 26: Lien entre les coordonnées des individus sur F1 et le MEI entre 1950 et 2000

Le mode F1 est significativement corrélé (r= 0,613) à la variabilité sur le long terme de l'Oscillation Australe du Pacifique. À tour de rôle, de fortes anomalies ont tendance à s'enchaîner sur des périodes d'environ 25 ans entre 1950 et 2000 sur toute l'Amazonie. Le sud du bassin reçoit un excédent de pluies durant la période 1976-98 quand les phases El Nino sont plus fréquences et au contraire le nord du bassin connaît l'inverse pendant cette période, c'est-à-dire des conditions plus sèches. Ces résultats sont cohérents avec les travaux précédemment réalisés sur le rôle d'ENSO sur les pluies en Amazonie (Liebmann et al. 2001, Ronchail et al. 2002, Marengo et al. 1998, Marengo et al. 2004). La déficience des pluies sur le nord de l'Amazonie en phase Nino est liée à l'inversion de la circulation est-ouest, dite de Walker, entre l'est du Pacifique et l'Amazonie et à des conditions inhabituelles de subsidence au dessus de cette région. Ils sont aussi cohérents avec ceux de Marengo *et al.* (2004) et Ronchail *et al.* (2006) quant à la variabilité des pluies à long terme.

La variabilité à long terme sur l'axe F2 présente une coupure en 1970 que l'on retrouve aussi dans les débits des bassins de l'Amazone et de la Plata (Ronchail *et al* 1997, 2002, 2005, Collischonn *et al* 2001, Callède *et al* l 2004) (***Figure 17***, source : Ronchail *et al* 2006).

Après 1970, une augmentation des fortes crues dans les plaines amazoniennes est remarquée à Obidos (Callède et al 2004) et en Bolivie (Ronchail et al 2005). En Bolivie, 13 cas de fortes crues sont relevés de 1970 à 1998 (28 ans) tandis que sur la même durée, de 1945 à 1970, il y en a eu 9. Callède et al 2004, remarquent l'existence de seulement 5 grosses crues à Obidos de 1903 à 1969 (66 ans), alors que 12 ont été observées entre 1970 et 1999 (29 ans), dont celle de 1989 qui représente la plus importante crue enregistrée depuis 1903. Il y a aggravation du nombre de très fortes crues depuis 1969. Callède et al (2004) montrent que la variation annuelle (analysée ici) se répercute dans le même sens sur les débits des crues, des modules (débits moyens) et des étiages. Cependant, alors que les débits de crues restent forts et constants récemment, ils notent que les débits de modules et d'étiage diminuent, en liaison avec une diminution des pluies, à partir de la fin des années 1980. Une telle diminution des pluies après 1988 est aussi remarquée en Bolivie par Ronchail et al (2006). Le maintien des débits de crue importants à Obidos, après 1990, alors que les pluies diminuent, est attribué par Callède et al (2004) à la déforestation entraînant une augmentation du coefficient d'écoulement.

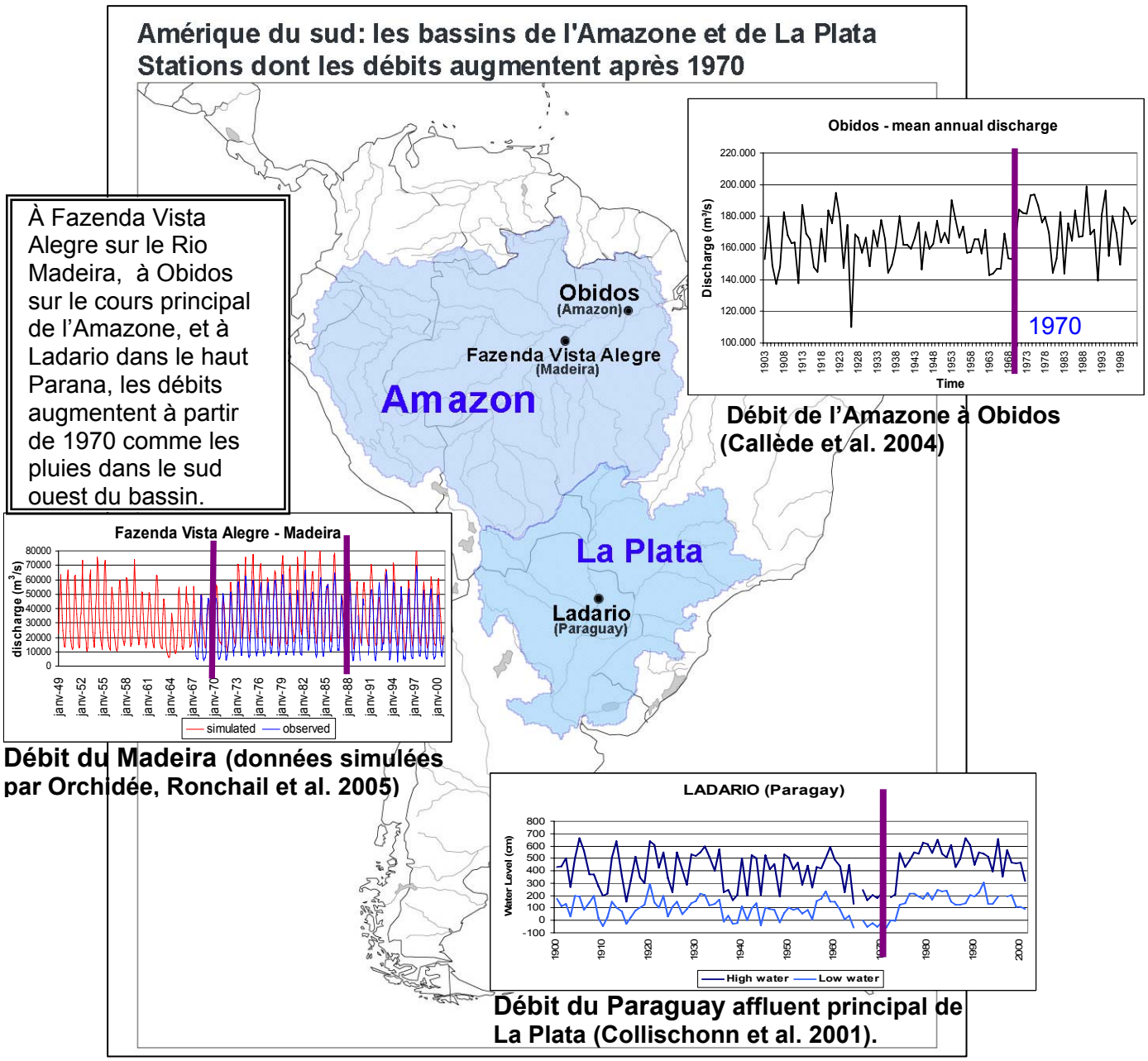


Figure 17: Stations pour lesquelles des augmentations de débits ont été enregistrées au début des années 1970

Même description dans le bassin du Parana (Genta et al. 1998, Robertson and Mechoso (1998), Garcia and Vargas (1998),..)

Il pourrait y avoir un lien entre ces coupures et les températures de surface de l'Atlantique nord, qui, rappelons le, fournit via la mousson une grande partie de la vapeur d'eau au bassin amazonien. Ce lien est appréhendé à partir de l'indice Atlantic Multidecadal Index (AMO) qui mesure les anomalies de températures de surface océaniques de l'Atlantique nord entre l'Equateur et 70°N (Enfield et al 2001, ***figure 18***). L'océan se refroidit au début des années 1970, ce qui correspond à une augmentation de la pression de surface, des alizés et donc du flux de vapeur d'eau (flux de mousson) vers le sud de l'Amazonie (***figure***

5). Au début des années 90, l'océan se réchauffe (***figure 18***) et on observe l'inverse (diminution du flux de vapeur d'eau vers l'Amazonie tropicale).

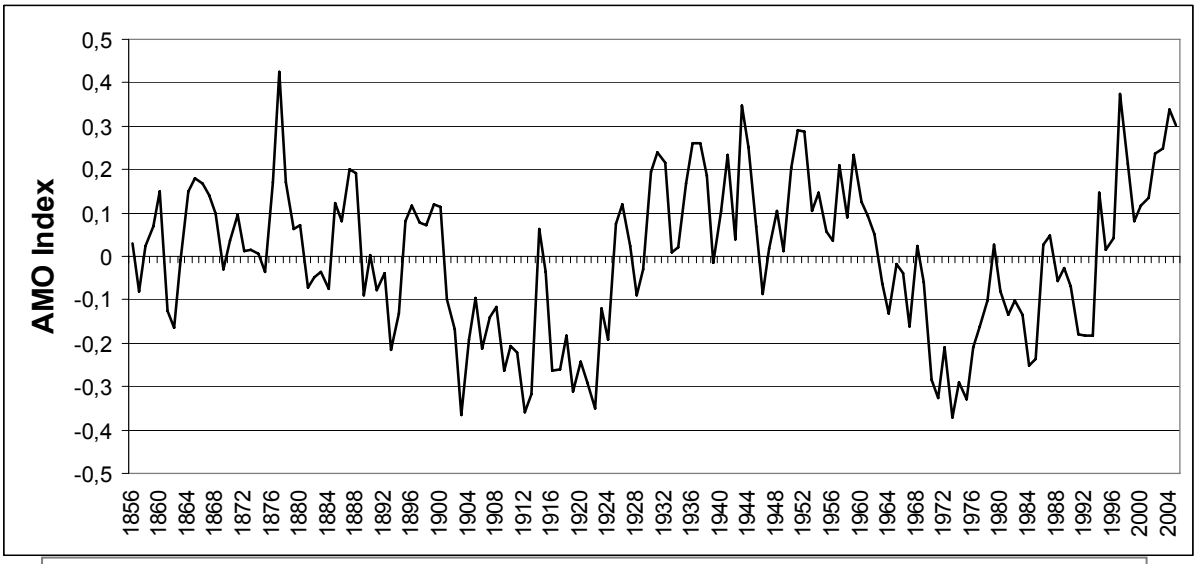


Figure 18 : Atlantic Multidecadal Index donnant l'évolution des anomalies de températures de surface de l'Atlantique entre 0 et 70°N entre 1956 et 2005.

2.4.2. En Bolivie

La ***figure 6*** présente les valeurs annuelles moyennées entre 1950 et 2000, ainsi que les cycles moyens annuels pour 6 stations. Les valeurs des pluies varient en fonction de la localisation des stations. Les stations de la plaine (<800m) sont plus humides que celle situées sur le relief bolivien où l'air est sec et où les pluies dépendent de l'advection d'air humide en provenance de la plaine (Aceituno et Montecinos 1993, Garreaud et al. 2003, ***figure 19***). Elles présentent aussi une diminution de leurs valeurs selon la latitude, du nord au sud, celles du sud étant atteintes moins longtemps et de façon plus aléatoire par la mousson sud-américain (***figure 5***).

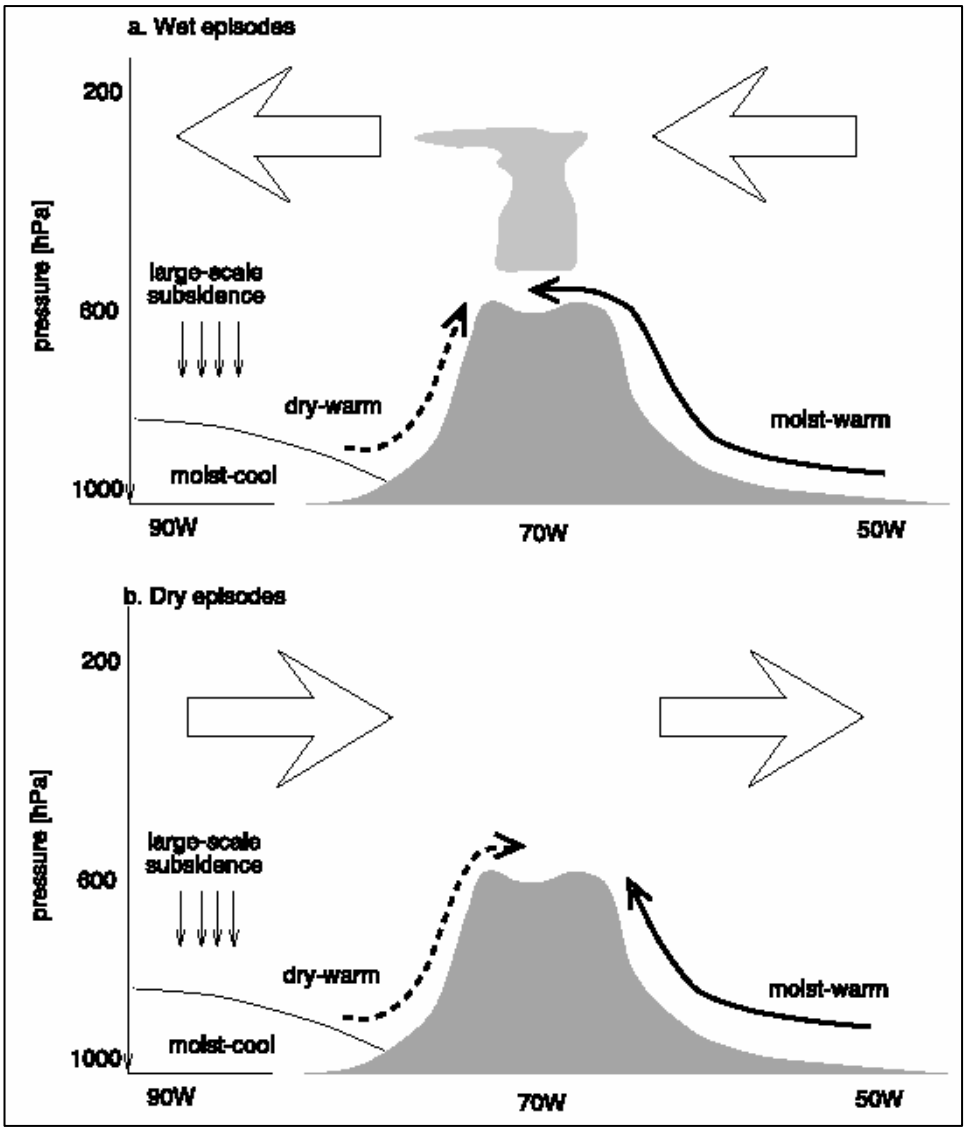


Figure 19: Extrait de Garreaud et al 2003. Représentation schématique de la circulation dans les Andes centrales. Masses d'air passant au-dessus des Andes, pour (a) des épisodes pluvieux et (b) des épisodes secs. Les flèches épaisses indiquent le sens de la circulation des niveaux supérieurs ; c'est l'écoulement à grande échelle. Les courbes pleines (à tiret) représentent le transport d'air humide (sec) par la circulation régionale au-dessus des pentes andines. Les flèches verticales minces représentent l'affaissement à grande échelle au-dessus du Pacifique subtropical qui maintient une forte inversion thermique (en trait plein).

Dans la plaine, la saison sèche ne s'effectue pas franchement durant le trimestre juin-juillet- août. Aucun de ces mois ne possède de total moyen nul : il s'y produit toujours quelques jours de pluies à cause des fronts des latitudes moyennes qui atteignent ces régions en hiver (Ronchail 1989). La saison des fortes pluies s'effectue franchement sur trois mois, de décembre à février, avec un maximum pour le mois de janvier.

Sur les reliefs, les saisons sèches et de fortes pluies durent plus longtemps : quatre mois. La saison sèche commence en mai et se termine en août. Durant les mois de juin et juillet, il peut ne pas pleuvoir du tout. La saison des fortes pluies s'étend de décembre à mars (les mois de décembre et mars exposant des valeurs voisines) et présente un maximum en janvier.

À partir de ces cycles moyens annuels, il est convenu de proposer le mois de septembre pour marquer le début de l'année hydrologique. Par exemple l'année 1950 représente l'année hydrologique septembre 49-août 50.

Des ACP sont effectuées sur 22 stations pluviométriques réparties en Bolivie afin de décrire la variabilité spatio-temporelle des pluies (***figure 8***). Elles sont réalisées à partir des valeurs annuelles calculées sur la base de l'année hydrologique débutant donc en septembre.

F1 et F2 représentent les deux principaux modes de variabilité des pluies dans le temps et l'espace (***figure 20***). Ces modes résument 42% de la variance des pluies. La variabilité est ici un peu mieux représentée que sur l'espace amazonien par les premiers axes (cf. partie ***discussion***). À partir de l'axe F3, les valeurs propres deviennent relativement faibles et sont liées au fonctionnement particulier de quelques stations isolées. Afin de limiter l'étude, nous ne retiendrons que les 2 premiers axes factoriels.

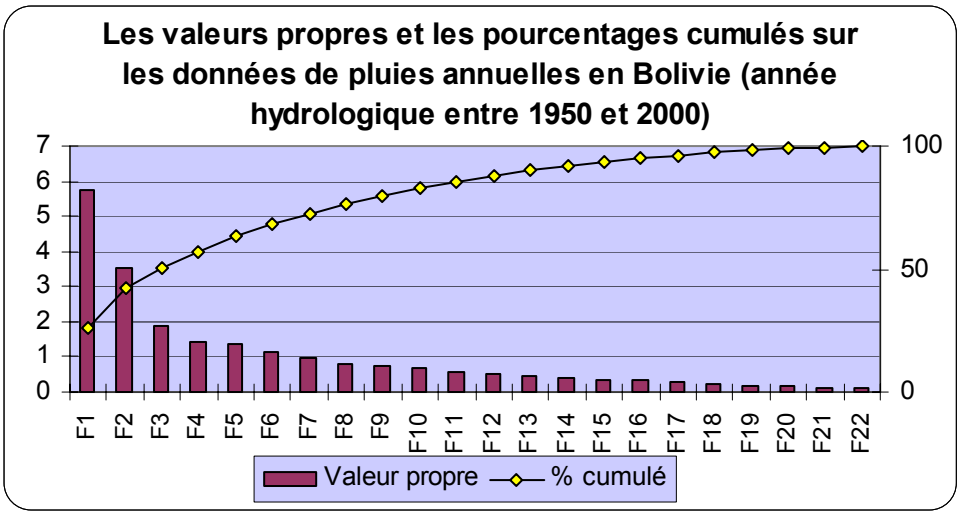


Figure 20: Valeurs propres et pourcentages de variance cumulés de tous les axes factoriels expliquant la variabilité des pluies au dessus de la Bolivie.

3.1.2.1. Variabilité spatiale et temporelle selon F1

26% de la variance est résumé par l'axe factoriel F1. Il s'agit d'un mode pluri décennale entre 1950 et 1988, avec une inversion en 1973 (***figure 21***). À partir de 1989, une variabilité plus interannuelle se met en place, avec cependant de nombreuses années sèches. On remarque une ressemblance avec l'axe F2 résultant de l'ACP sur l'Amazonie : ces axes présentent les mêmes cassures (1973 et 1989).

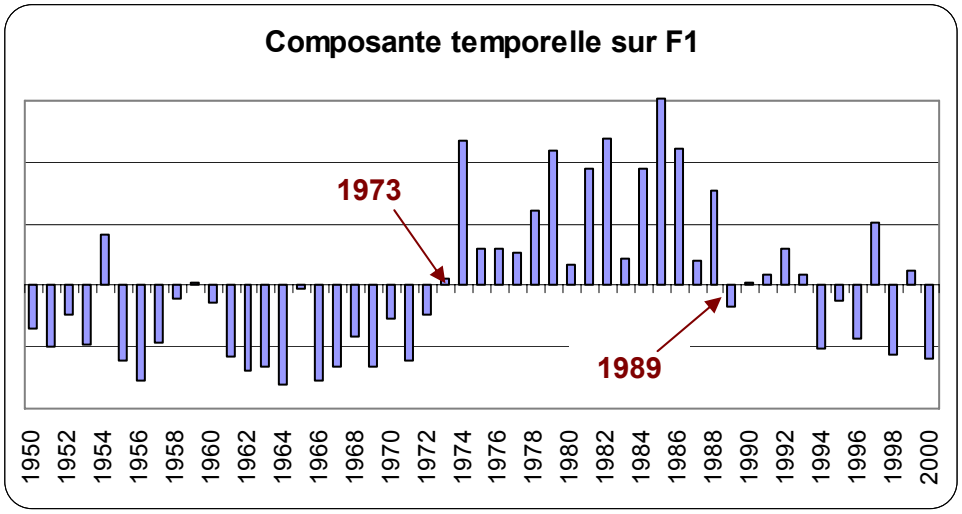


Figure 21: Coordonnées des individus entre 1950 et 2000 des pluies annuelles en Bolivie selon F1

On peut voir sur la ***figure 22***, la variabilité spatiale des pluies selon le mode F1. On remarque que ce mode de variabilité touche l'ensemble de la Bolivie, plus ou moins fortement selon les stations. Il y a 8 stations dont la contribution est très importante. On note alors que ce mode contribue principalement à la variabilité des stations de la partie nord des Andes et de stations de piedmont proches. Une dizaine de stations possède une contribution plus faible, mais leur variation reste significativement expliquée par F1. Ainsi on observe deux nouveaux ensembles de stations : au centre de la plaine et au nord.

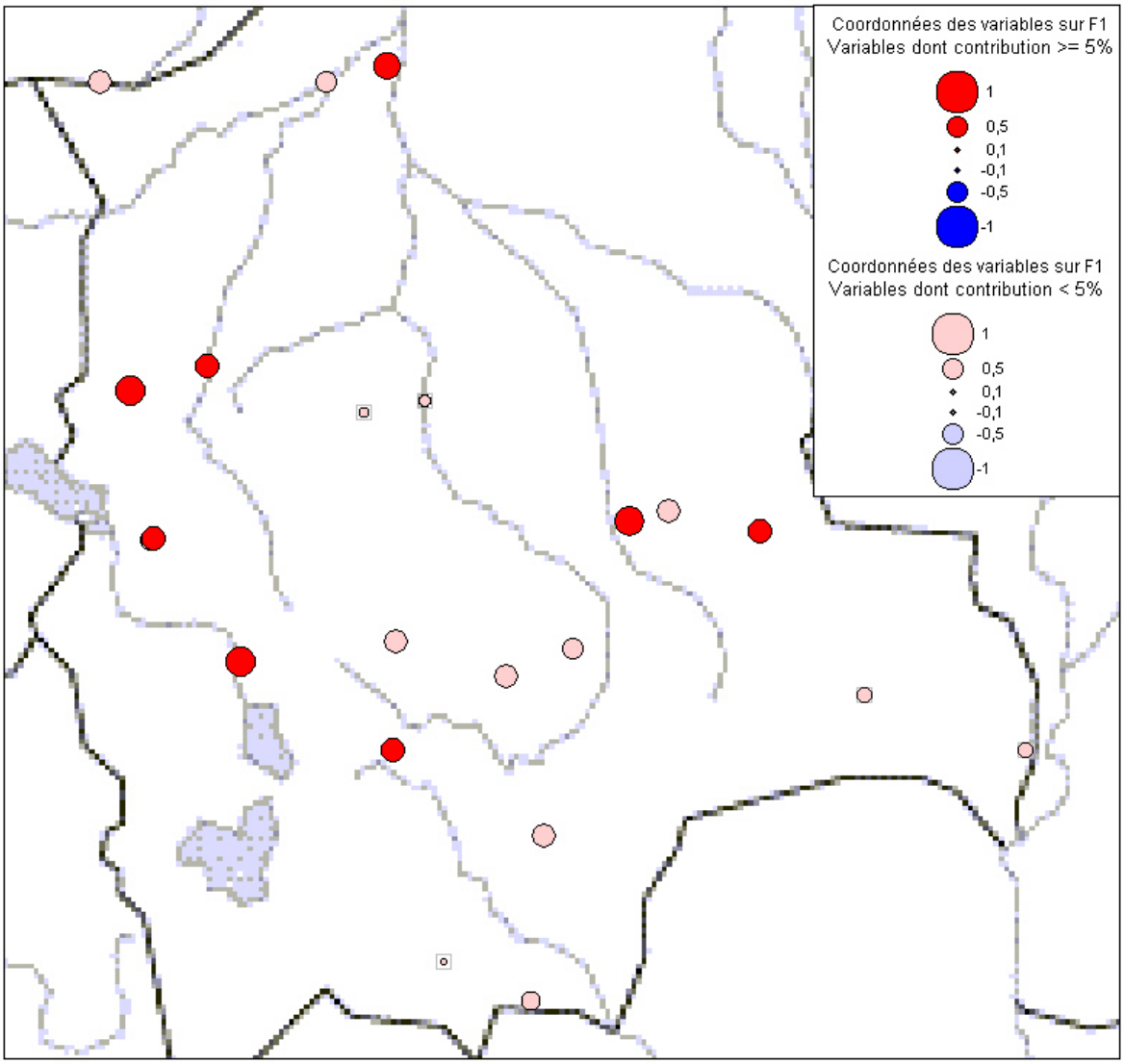


Figure 22: Variabilité spatiale des pluies sur la Bolivie déterminée par l'axe factoriel 1

Il s'agit d'un phénomène contribuant fortement à la variabilité sur le long terme des stations andines et de celles du nord et du centre de la plaine bolivienne, plus sèches entre 1950 et 1972 et depuis 1989, et plus pluvieuses entre 1973 et 1988.

3.1.2.2. Variabilité spatiale et temporelle selon F2

L'axe factoriel 2 représente **16%** de la variabilité totale. Il s'agit d'un mode de variation interannuel (***figure 23***).

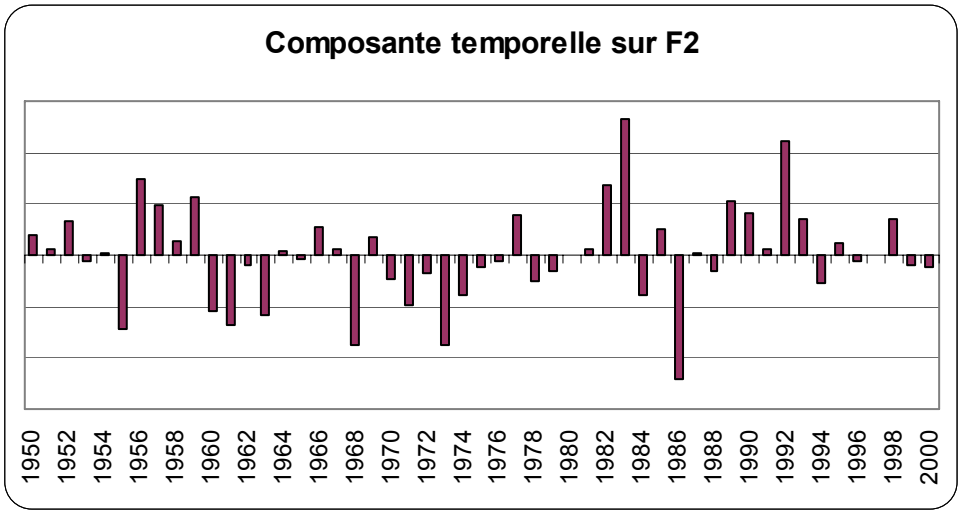


Figure 23: Coordonnées des individus entre 1950 et 2000 des pluies en Bolivie selon F2

Les variations temporelles par F2, de durées plus ou moins longues, semblent être liées aux évènements ENSO (par exemple les années négatives : 1955, 1973 et positives: 1983, 1992, 1998). De plus, la variabilité spatiale, présentée sur la ***figure 24***, montre une opposition centre de la plaine/ Andes, correspondant à celles enregistrées lors des phases de l'ENSO.

L'analyse de corrélation de Pearson entre le MEI et le facteur F2 (R^2 = 0,1804 → r = 0,42) ne montre pourtant qu'un faible lien (***figure 25***). L'analyse de la covariance entre ces deux matrice montre qu'elles sont dépendantes (cov (X, Y) = 64,37%), variant dans le même sens. Nous avons noté quelques années importantes dont la variabilité correspondait à des anomalies fortes positives ou négatives du MEI (1955, 1973, 1983, 1992 et 1998). Les années 1983 et 1992 contribuent très fortement (15,6 et 10,9%) à la variabilité temporelle de F2. Durant ces années, les stations du centre de la plaine reçoivent plus de pluies que la moyenne lors des évènements El Nino, et les stations des Andes en reçoivent plus pendant La Nina. Ce résultat correspond à ce qui est généralement trouvé et connu (Garreaud et al 2003, Ronchail et al 2006). Pendant une phase Nino, l'apport de vapeur d'eau au dessus des Andes est amoindri (figure XX b - celle du bas de Garreaud), c'est l'inverse en phase Nina (figure XX a). Dans la plaine c'est la convection, liée aux perturbations extra-tropicales qui est renforcée en phase Nino et amoindri en phase Nina.

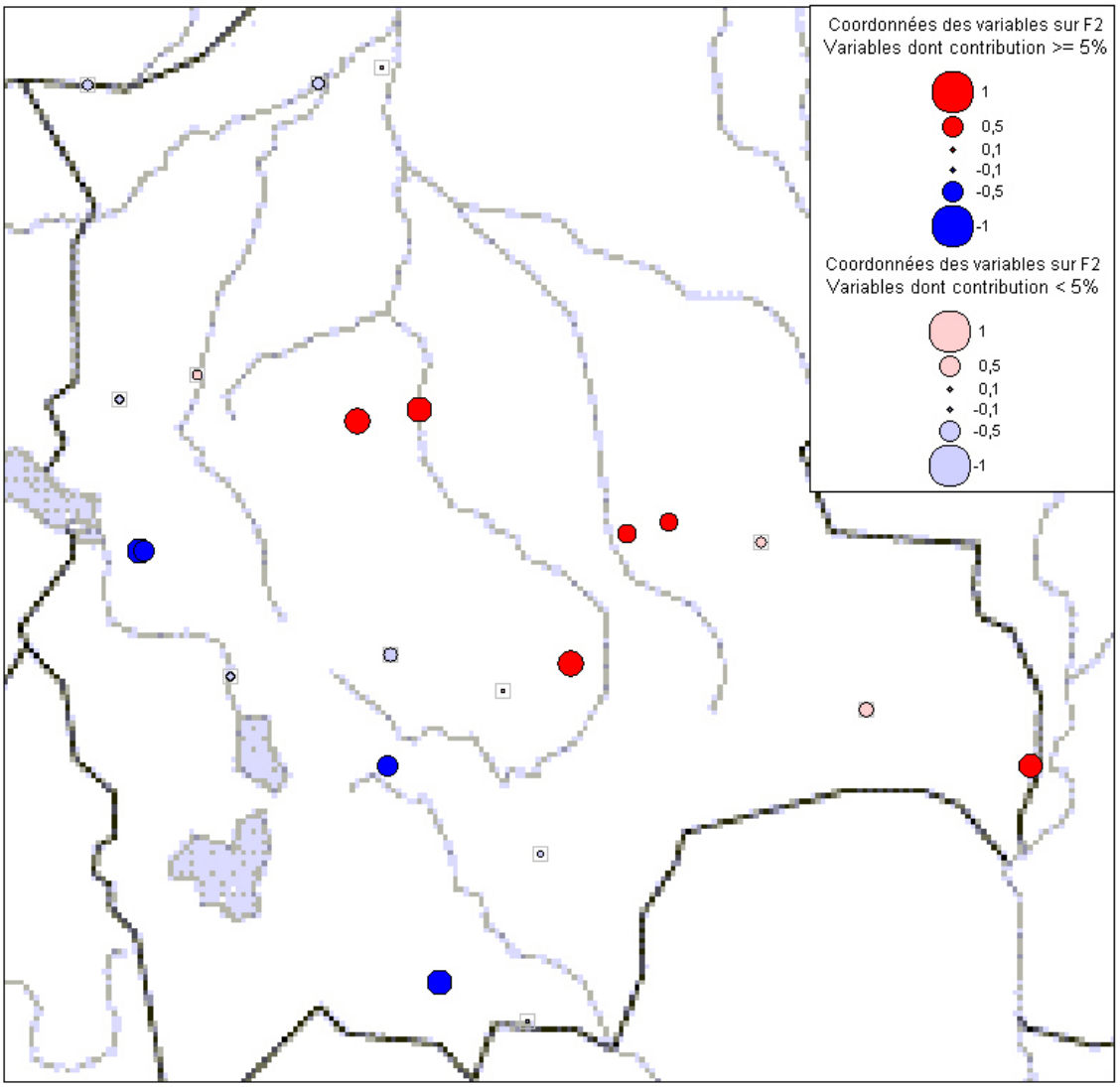


Figure 24: Variabilité spatiale des pluies sur la Bolivie déterminée par l'axe factoriel F2

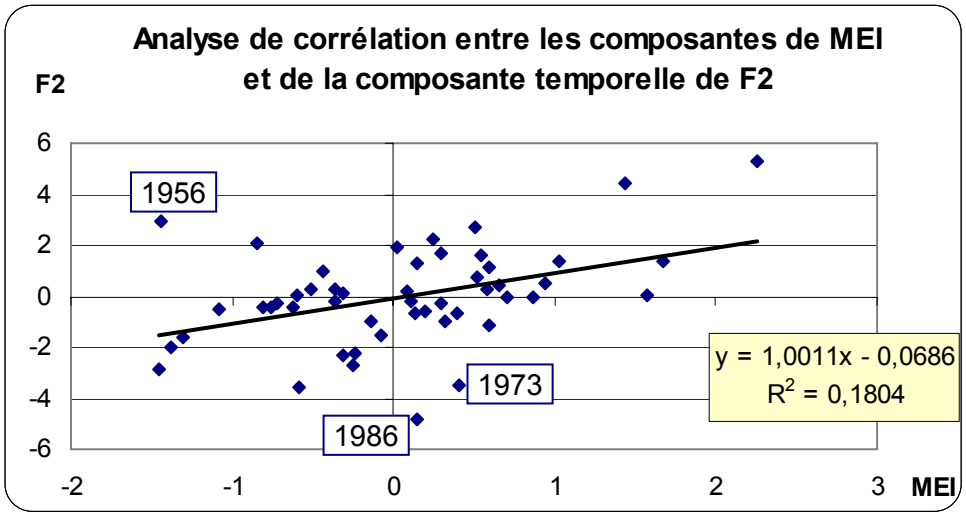


Figure 25: Analyse de la corrélation linéaire entre les coordonnées des individus sur F2 et le MEI entre 1950 et 2000

Sur la ***figure 25***, on remarque 3 années : 1956, 1973 et 1986, qui sont particulièrement éloignées du nuage de points. Si nous enlevons ces années qui contribuent fortement à très fortement à la formation de l'axe (12,8% pour 1986), la corrélation devient alors forte et très significative, de même que la covariance (non montré ici r = 0,6 et cov (X, Y) = 81,23%).

On remarque aussi les faits suivants :

- Durant des années 'normales' (anomalies proches de 0), il peut se produire des excédents (i.e.1957, 1959) ou, très significativement, des déficits de pluies (i.e. 1973, 1986).
- Durant les années La Nina (phase négatives de l'ENSO), généralement plus sèches sur la plaine et plus humides sur les Andes, il se produit parfois l'inverse (i.e. 1956, 1989)
- Durant les années El Nino (anomalies positives de l'ENSO), il se produit toujours des excédants pluviométriques en plaine et une certaine sécheresse sur les Andes.

Ces différentes remarques traduisent que le mode de variabilité des pluies F2 est probablement expliqué par des facteurs explicatifs complémentaires à l'ENSO.

3.1.3. Autres remarques sur la variabilité spatio-temporelle en Amazonie et en Bolivie

Contrairement à ce qui est observé en Amazonie, les premiers mode de variabilité des pluies en Bolivie ne sont pas liés avec la variabilité à long terme de l'oscillation australe. On peut remarquer cependant pour la Bolivie une variabilité temporelle et spatiale relativement similaire au mode de variabilité F2 des pluies observé sur l'Amazonie. L'analyse entre les coordonnées des individus des axes factoriels F1 sur la Bolivie et F2 sur l'Amazonie montre une forte corrélation (r = 0,62).

Le principal mode de variabilité des pluies en Bolivie semble correspondre à la variation du flux de mousson sud américaine, sur le long terme entre 1950 et 2000, à l'échelle bi décennale, touchant l'ensemble de l'Amazonie.

3.2. Analyse des indices pluviométriques en Bolivie entre 1950 et 2000

Cette partie montre dans le détail les résultats des analyses des onze indices pluviométriques présentés dans le ***tableau 3*** (***partie 2***). Rappelons que ces indices mesurent les totaux, les fréquences, l'intensité et les extrêmes de pluies. Ils sont calculés de 1950 à 2000, sur la base de l'année hydrologique débutant en septembre. La période correspondant au calcul des percentiles de pluies (95ième et 99ième) s'étend sur toute la durée de l'étude.

Les 25 stations pluviométriques retenues pour le calcul de ces indices sont bien réparties sur l'ensemble de la Bolivie (***figure 8*** et ***tableau 2***).

Le programme RClimDex fournit les résultats sous forme de textes et de graphiques (***annexe 3***). L'analyse de ces données est longue et complexe, elle se fait station par station et indice par indice. Les résultats obtenus seront synthétisés afin de pouvoir observer de possibles liaisons entre les indices.

- Premièrement on observera les moyennes et les tendances, entre 1950 et 2000, de certains indices représentatifs :
  - des totaux de pluies (**PCPTOT**),
  - des fréquences de pluies (**R1mm**),
  - des fréquences des fortes pluies (**R20mm**),
  - des valeurs extrêmes de pluies (**R99p**).

- Dans une seconde sous partie, la variabilité spatio-temporelle de ces indices, entre 1950 et 2000 en Bolivie, sera analysée grâce aux ACP.

- Enfin une dernière sous partie permettra d'analyser les intensités de pluies de façon un peu plus poussée afin d'essayer d'analyser la relation entre évolution de l'intensité des pluies et évolution des crues.

3.2.1. Les moyennes et les tendances de différents indices

3.2.1.1. PCPTOT et R1mm

L'indice PCPTOT correspond aux totaux annuels des pluies. Pour chaque station, ses valeurs moyennées entre 1950 et 2000 sont présentées sur la ***figure 6***. Sa variation spatiale a déjà été décrite dans les ***parties 1*** et ***3.1.2***. L'***annexe 4*** permet de rendre compte des valeurs atteintes par six stations de référence (choisies selon leur position dans l'espace) : 3 localisées en plaine (nord, centre et sud) et 3 localisées dans les Andes (nord, centre et sud). Sur l'ensemble des stations, les valeurs s'étalent de 132 mm de pluies, enregistrés à *Oruro* en 1957, à 3052 mm à *Riberalta* en 1986. Comme nous l'avons vu, les pluies sont plus fortes en plaine que sur les Andes. Dans la plaine, elles sont plus fortes au nord. Dans les Andes elles diminuent avec l'altitude.

L'indice R1mm correspond au nombre de jours pluvieux (taux ≥ 1 mm) sur une année. En ***annexe 5***, on peut observer les valeurs de cet indice pour les six stations de références. On note une valeur minimale de cet indice de 19 jours de pluies à *San Javier* en 1954, et un maximum de 160 jours à *Cobija* en 1974. En l'associant à l'indice PCPTOT, on peut observer la distribution générale des pluies sur la Bolivie (***figure 26***).

Les analyses de corrélation montrent de fortes relations entre les coordonnées des stations (latitudes et longitudes) et le nombre de jours de pluies (respectivement r = 0,87 et r = -0,89 - les latitudes dans l'hémisphère sud sont exprimées par des coordonnées négatives et ainsi que les longitudes à l'ouest de Greenwitch). La même relation est montrée pour les totaux annuels (respectivement r = 0,81 et r = -0,92). Les indices PCPTOT et R1mm sont plus forts au nord et à l'ouest (pied des Andes) de la plaine bolivienne. Ils présentent également entre eux une forte corrélation (r= 0,88) en dessous de 470m d'altitude. Dans la plaine, là où les totaux de pluies sont les plus forts, il pleut également plus souvent. Au-delà de 470m, ils ne sont plus corrélés. Ainsi, en contre partie, nous pouvons observer une grande variété de distribution des pluies, par exemple :

- Les stations *La Paz* et *El Alto*, possèdent une faible moyenne de pluies (~600 mm/an), mais un nombre important de jours pluvieux (entre 100 et 109 j). À Oruro sur l'Altiplano, il pleut en moyenne 65 jours pour atteindre 364mm de pluies en une année.

- À la station *Tarija*, en position de vallées au sud, la même moyenne annuelle de pluies (~600 mm/an) est obtenue par un nombre bien plus faible de jours de pluies (59 j).

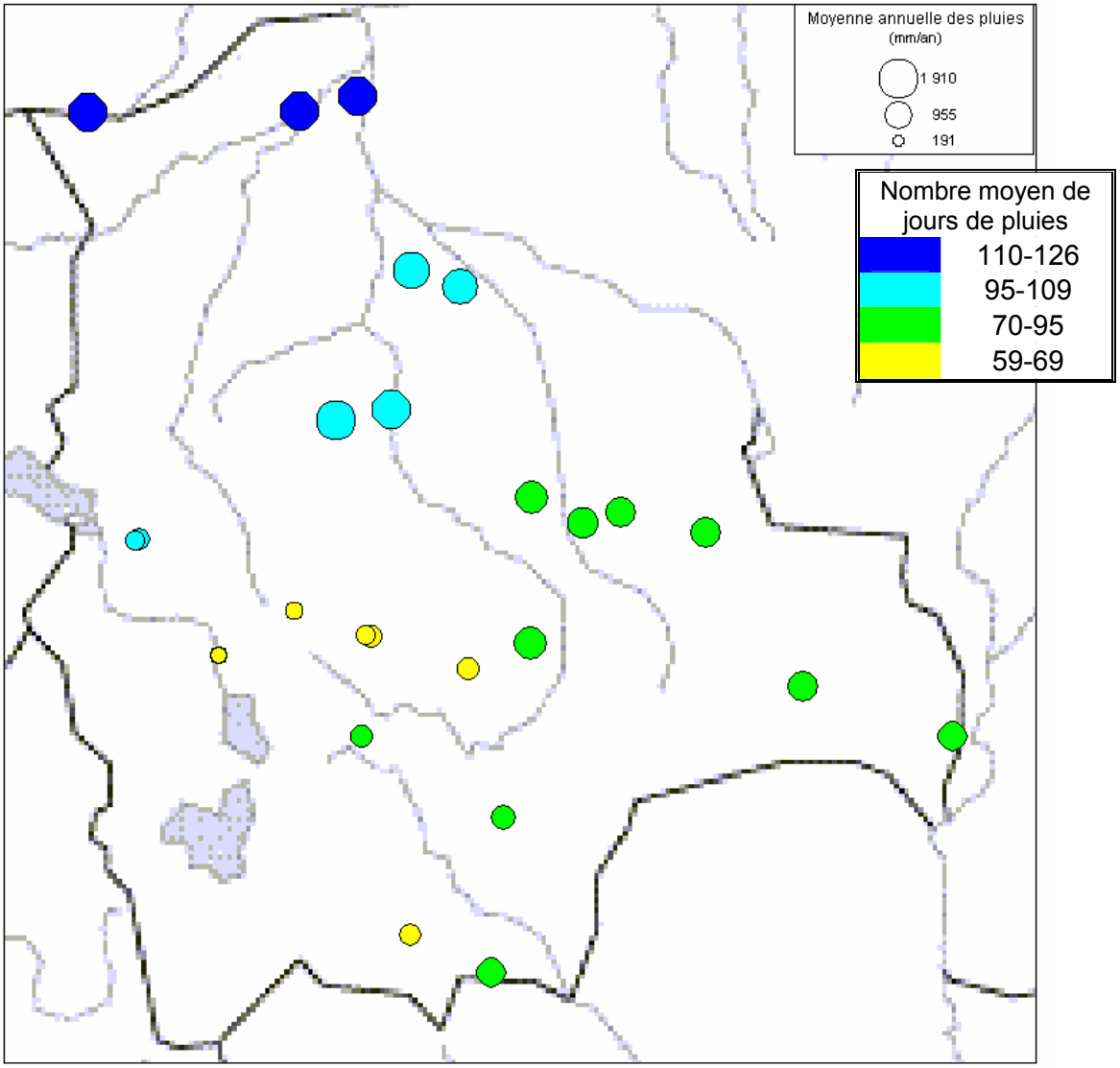


Figure 26: Les totaux annuels des précipitations (en mm) associé au nombre moyen (annuel) de jours de pluies obtenus entre 1950 et 2000 pour les 25 stations boliviennes.

Pour les stations situées au-delà de 470m d'altitude, les moyennes annuelles des pluies sont fortement corrélées à l'altitude (r = - 0,82) : les pluies sont moins importantes vers le haut du relief, notamment sur l'Altiplano où les stations sont abritées des flux d'est humide par la Cordillère Orientale des Andes (***figure 27***).

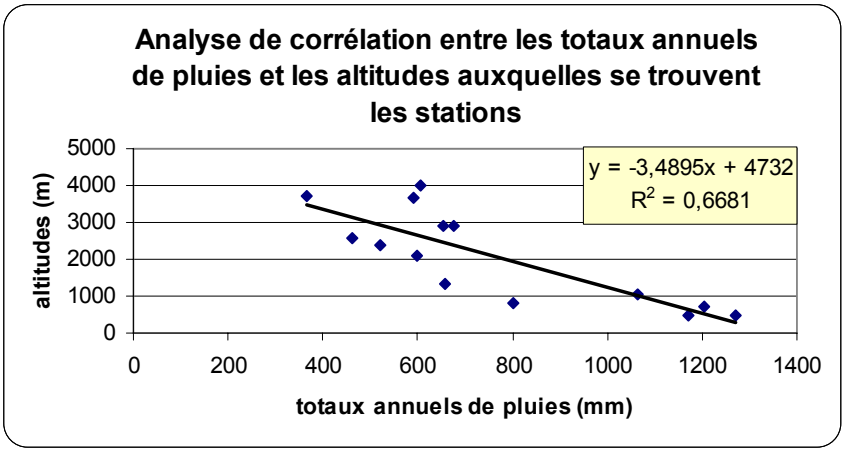


Figure 27: analyse de corrélation linéaire entre les totaux annuels de pluies et les altitudes.

En revanche, R1mm ne répond pas à cette règle, il possède deux comportements distincts dont la limite se fait aux alentours de 1800m d'altitude (***figure 28***).

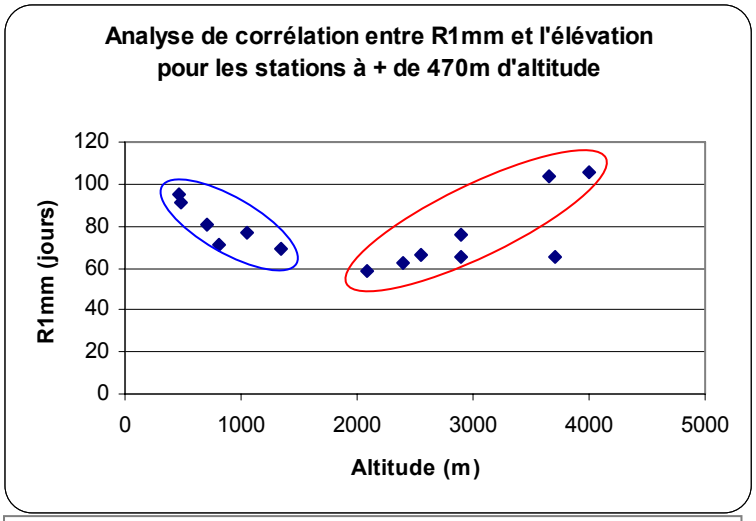


Figure 28: analyse de corrélation des valeurs moyennes de R1mm/altitude, pour les stations > 470m d'altitude

Les analyses de corrélation pour ces deux groupes de stations montrent de fortes relations entre R1mm et l'altitude :

Sous 1800m d'altitude, R1mm diminue en fonction de l'altitude (r = -0,86).

Au-delà de 1800m, R1mm augmente avec l'altitude (r = 0,77).

Ce comportement étonnant est difficilement interprétable. Il pourrait traduire l'importance de la convection et des fortes averses dans les vallées andines.

L'analyse des tendances de R1mm sur le long terme (1950-2000), présentée sur la ***figure 29*** montre que les stations du centre et du nord de la plaine, ainsi que celles de la moitié sud des Andes, suivent une tendance linéaire positive significative de R1mm entre 1950 et 2000.

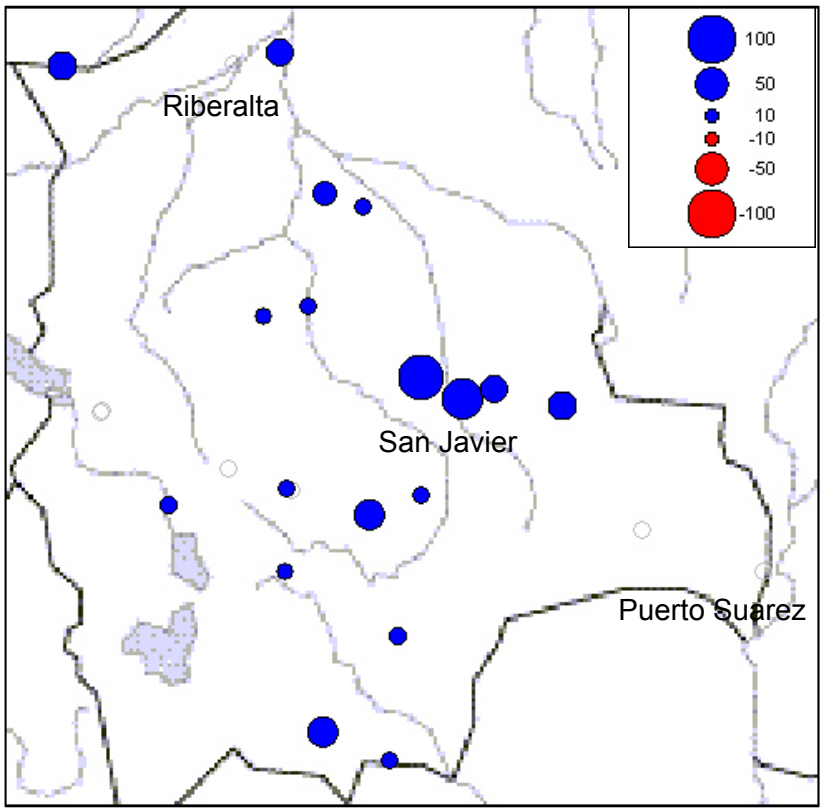


Figure 29: Signes et coefficients de détermination associés aux tendances de l'indice R1mm. Les cercles transparents indiquent une absence de tendance significative

Nous avons pris l'exemple de trois stations répondant différemment à cet indice, pour montrer les graphiques (résultats) que nous fourni RClimDex. Le nombre de jours de pluies augmente sur une bande verticale passant par le centre de la Bolivie entre 1950 et 2000 (***figure 29***).

À *Riberalta*, entre 1950 et 2000, il n'y a pas de tendance significative de R1mm, alors qu'il y en a dans les stations voisines (nord de la plaine). Dans le détail, on note une forte variabilité interannuelle entre 1950 et 2000 (***figure 30***).

À *San Javier*, dans le centre de la plaine, on note une très forte tendance linéaire positive de R1mm entre 1950 et 2000. Dans le détail, les valeurs augmentent jusque vers 1980, puis on observe une stagnation (***figure 31***). En seulement 30 ans (1950-1980), les valeurs de R1mm ont doublé ! Il pleut deux fois plus souvent depuis 1980 qu'au début de la période d'étude.

À *Puerto Suarez*, dans le sud de la plaine, aucune tendance linéaire significative n'est mesurée. On remarque tout de même une diminution jusqu'au début des années 70, puis une plus légère augmentation des valeurs de R1mm jusqu'en 2000 (***figure 32***).

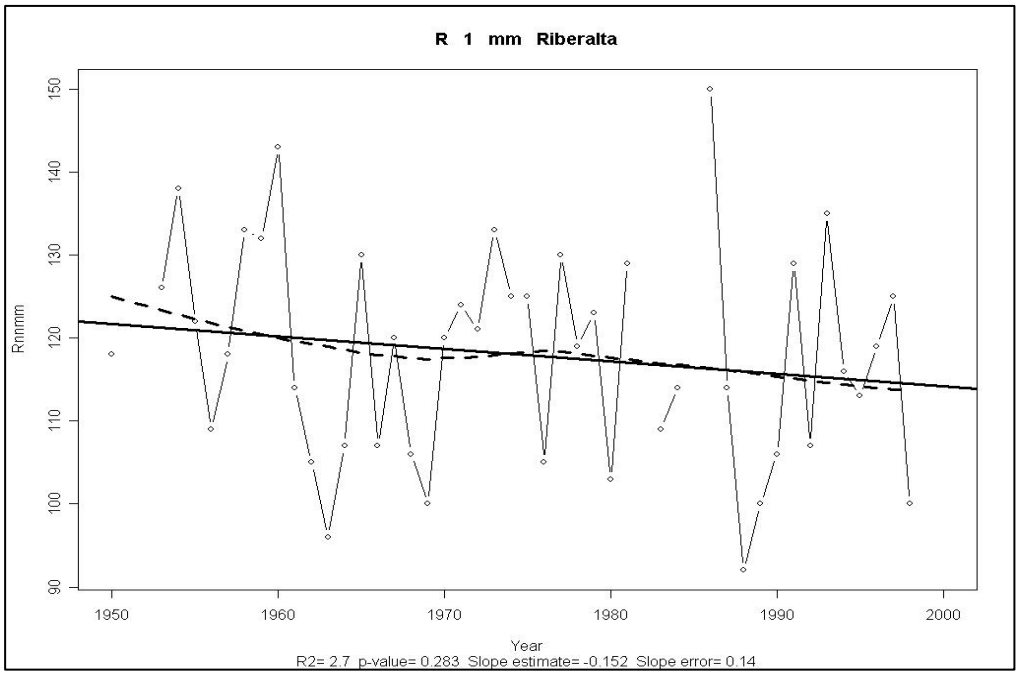


Figure 30: Variation annuelle, tendance linéaire (ligne pleine) et évolution non linéaire (ligne tiretée) entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R1mm (en jours) à de Riberalta (plaine-nord)

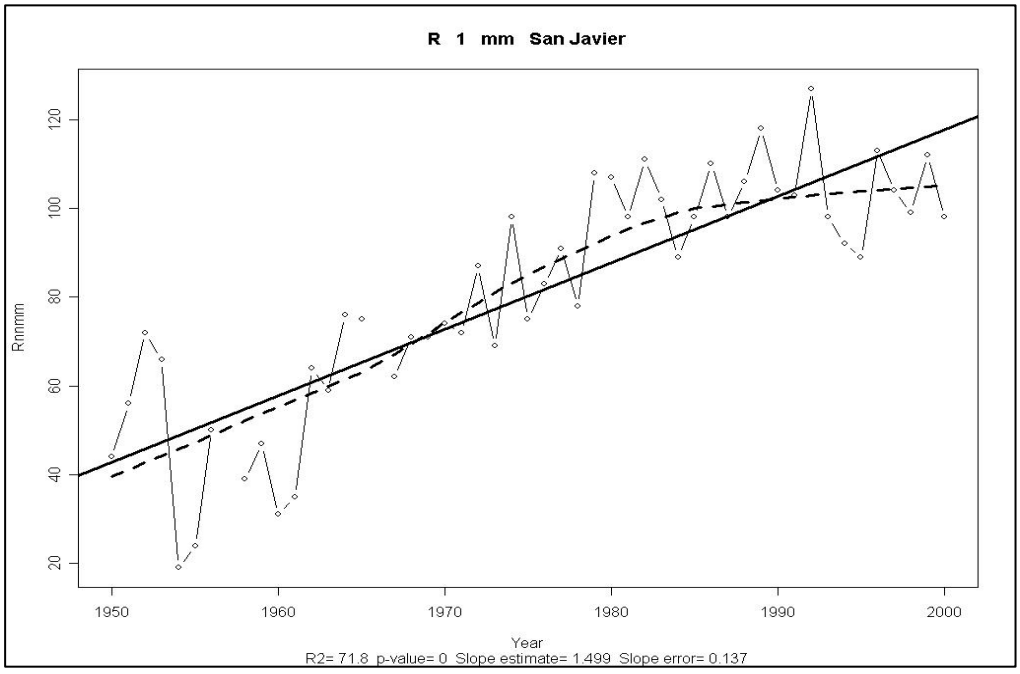


Figure 31: Variation annuelle et tendance linéaire (ligne pleine) et évolution non linéaire (ligne tiretée) entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R1mm à de San Javier (plaine-centre)

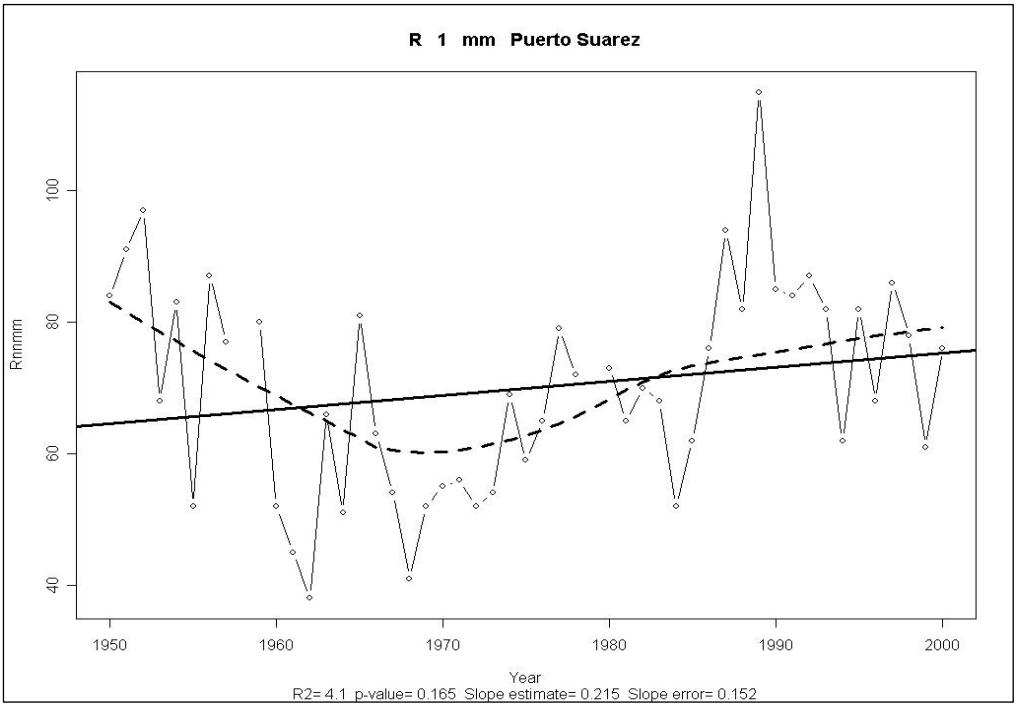


Figure 32: Variation annuelle et tendance linéaire (ligne pleine) et évolution non linéaire (ligne tiretée) entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R1mm au niveau de Puerto Suarez (plaine-sud)

On remarque des évolutions très différentes selon les stations, les valeurs de R1mm sont très variables dans le temps. Dans la partie ***3.2.2***, les modes traduisant les principales variations seront analysés.

3.2.1.2. R20mm

Cet indice correspond au nombre de jours où il a plu fortement (au moins 20mm). Associé à l'indice R1mm, sur une carte, il nous permet de visualiser la contribution des fortes pluies au nombre de jours de pluie (***figure 33***).

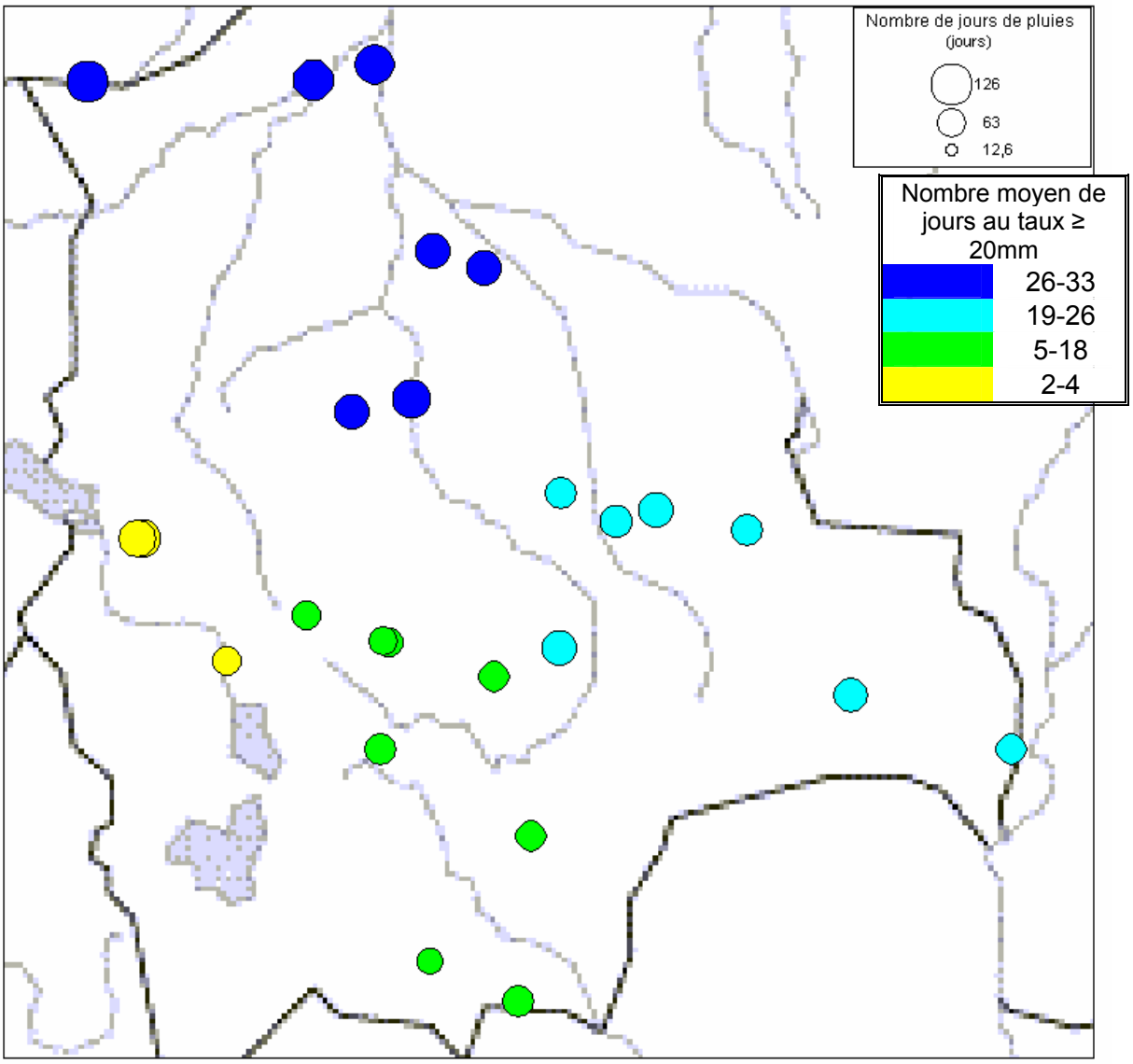


Figure 33: Valeurs moyennes de R1mm associées à celles de R20mm, obtenues entre 1950 et 2000 pour les 25 stations boliviennes

Sur la carte on remarque quatre zones distinctes :

- En jaune : les stations de hautes altitudes (> 3000m) ne possèdent en moyenne que de très faibles valeurs pour l'indice R20mm (2 à 4 jours). Dans ces 3 stations les jours de pluies ≥ 20mm sont très rares. À Oruro, ce sont « les pluies » en général qui sont rares. Au niveau de La Paz et El Alto, les pluies sont fréquentes mais presque toujours inférieures à 20mm.

- En vert : les stations de vallées comprises entre 800 et 3000m d'altitude. Elles comptabilisent en moyenne moins de 18 jours de fortes pluies au cours d'une année. Il y a un nombre très modeste de pluies fortes et de pluies en général, en cohérence avec des totaux annuels plutôt bas.

- En bleu (clair et foncé) : en dessous de 800m, dans la plaine, le nombre de jours de fortes pluies est toujours plus important que sur les reliefs. Il est plus fort dans le nord de la plaine que dans le sud. Cela a été remarqué de la même façon par les valeurs de PCPTOT.

Dans la plaine les totaux annuels de pluies montrent une diminution des pluies du nord au sud et d'ouest en est (avec un piémont andin plus arrosé que l'est de la plaine bolivienne). Cette dernière remarque nous incite à analyser les corrélations entre R20mm et les coordonnées spatiales (***figures 34*** et ***35***).

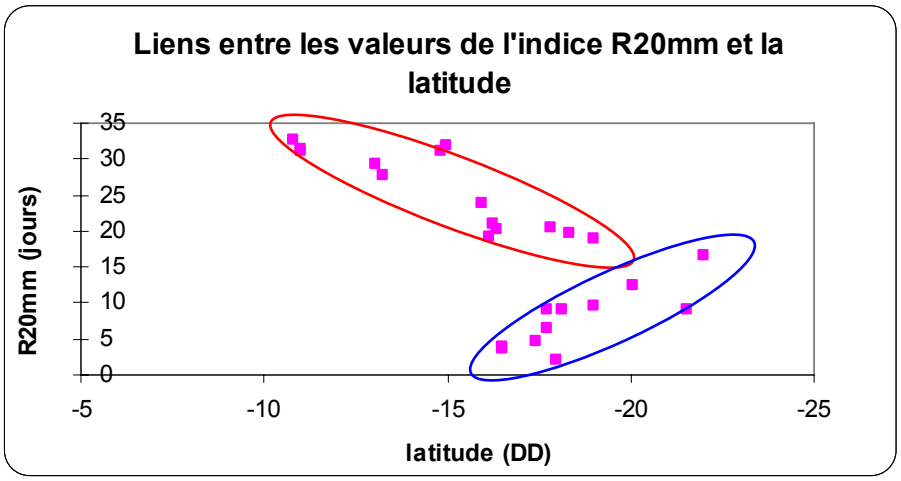


Figure 34: Analyse de corrélation entre les valeurs moyennes de R20mm et la latitude. Cerclées de rouge : les stations < 800 m et cerclées de bleu : les stations ≥ 800m.

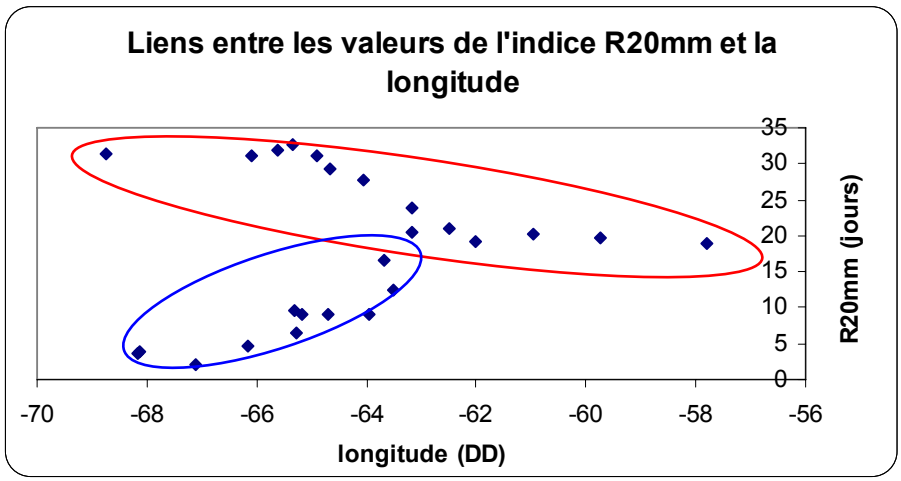


Figure 35: Analyse de corrélation entre les valeurs moyennes de R20mm et la longitude. Cerclées de rouge : les stations < 800 m et cerclées de bleu : les stations ≥ 800m.

On observe que les stations de plaine (< 800m) et les stations andines (> 800m) ont des comportements distincts en fonction de la latitude et la longitude. Dans la plaine (sous 800m), les pluies fortes (≥ 20mm) sont moins fréquentes vers le sud-est, peut-être à cause de la fréquence des pluies fines d'origine extra-tropicales, liées aux front froids. Cependant, les pluies fortes convectives sont toujours beaucoup plus fréquentes dans la plaine que sur le relief andin. Dans les Andes, les pluies fortes sont moins fréquentes à l'ouest et au nord, en relation avec l'altitude (***figure 6***). Ailleurs, dans les vallées, des effets de surchauffement peuvent expliquer de fortes pluies convectives.

Une analyse de corrélation détermine que les valeurs moyennes de R20mm sont quasiment parfaitement corrélées (r = 0,99) aux valeurs des totaux annuelles (PCPTOT) pour l'ensemble des 25 stations (***figure 36***). Cela signifie que les moyennes annuelles dépendent beaucoup du nombre de jours de fortes pluies (total ≥ 20mm).

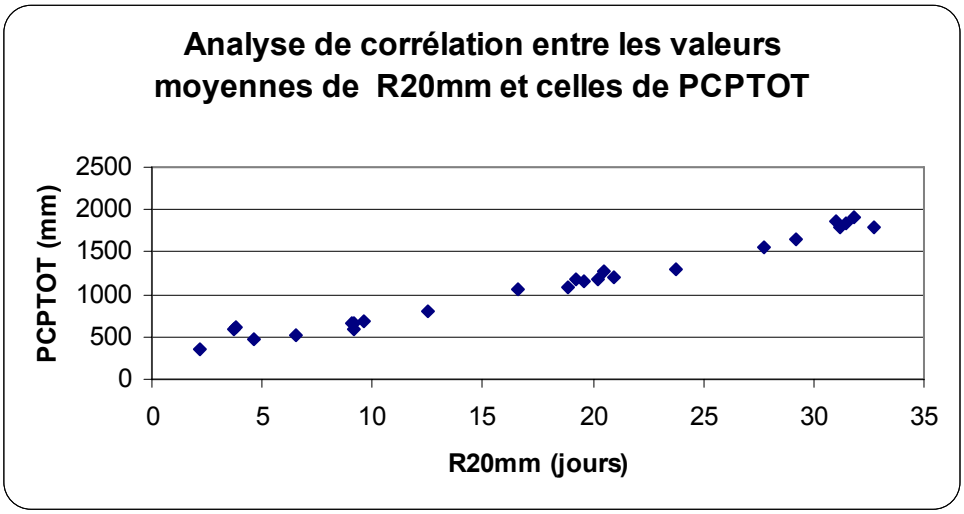


Figure 36: Analyse de corrélation entre les moyennes de R20mm (en jours) et les moyennes de PCPTOT (en mm).

La ***figure 37*** suivante montre les stations présentant une tendance linéaire significative des valeurs de R20mm sur la période 1950-2000. Sept stations présentent cette tendance significative. Dans la plaine, une augmentation de la fréquence des fortes pluies se réalise le long d'un axe nord-sud, dans le centre de la Bolivie. Une seule station, à 2550m d'altitude, montre une tendance à la diminution des fortes pluies : *Cochabamba*. Trois exemples d'évolution de cet indice sur le long terme sont présentés dans la ***figure 38***.

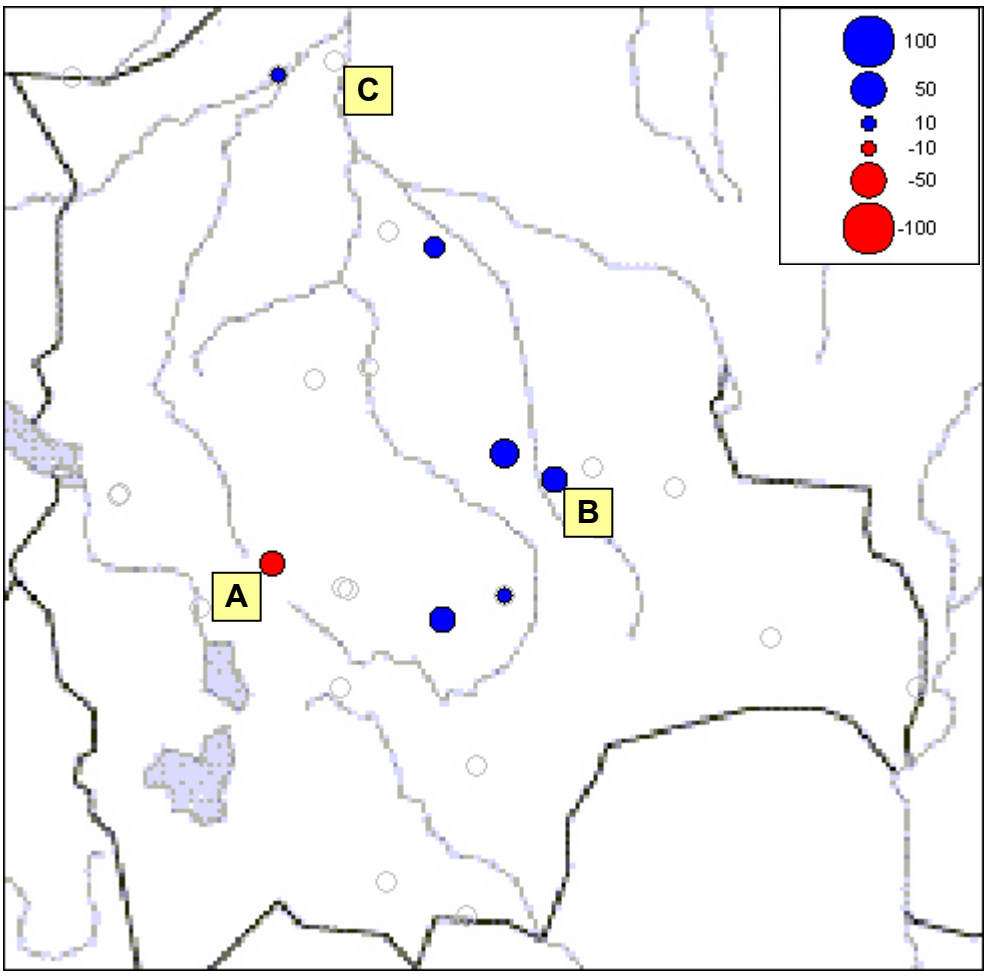


Figure 37: Signe et coefficient de détermination des tendances de l'indice R20mm entre 1950 et 2000, pour les stations montrant des tendances significatives. Les cercles transparents indiquent une absence de tendance.

On observe à *Cochabamba* une très forte variabilité interannuelle et une diminution au cours du temps de R20mm (***figure 38A***). Il passe de 6 à 2 jours entre le début et la fin de la période étudié. Les pluies fortes sont en moyenne peu fréquentes dans cette station (5 jours par an de pluies ≥20mm), de même que la fréquence et le total de pluies. Le nombre total de jours de pluies ne diminue pas, ce ne sont que les fortes pluies qui diminuent. On reviendra sur cette station plus tard, car elle possède des comportements exceptionnels.

Dans le centre de la plaine, la station de *San Javier* présente une tendance significative avec augmentation de la fréquence des fortes pluies (***figure 38B***). On peut remarquer trois sous-tendances sur un plus court terme : 1950-1970, 1970-1985 et au-delà jusqu'en 2000. La tendance positive significative dans cette station dépend uniquement d'une forte augmentation de R20mm enregistrée entre 1970 et ±1985.

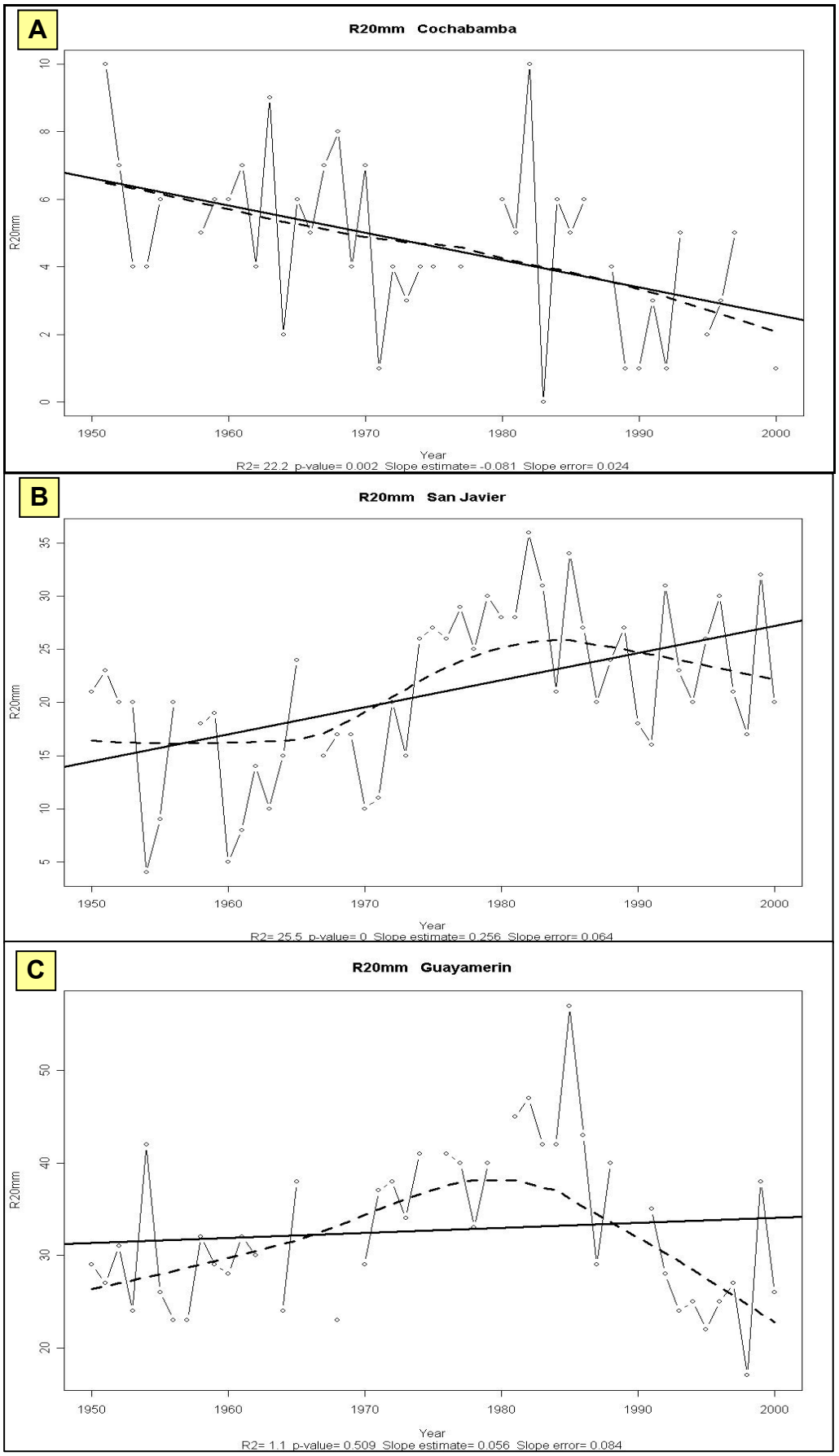


Figure 38: Variation annuelle et tendance linéaire (ligne pleine) et évolution non linéaire (ligne à tirets) entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R20mm (en jours) sur 3 stations

La station de *Guayamerin* ne présente pas de tendance linéaire significative sur le long terme (***figure 38C***). Pourtant on remarque sur un temps plus court une augmentation de la fréquence des forte pluies jusqu'aux alentours de 1980, puis une diminution jusqu'en 2000. Entre 1980 et 2000, en 20 ans, ces fréquences ont diminuées de moitié, de près de 40 jours à une vingtaine de jours.

On voit que l'évolution de l'indice R20mm sur le long terme peut également prendre des formes différentes selon les stations. Elle peut correspondre à une tendance linéaire, comme à *Cochabamba*, ou à une succession de tendances distinctes (*San Javier* et *Guayamerin*) révélant ou non une tendance significative sur le long terme.

3.2.1.3. R99p

Cet indice correspond à la valeur de la somme des précipitations sur une année, lorsque celles-ci atteignent un total supérieur ou égal au 99ième percentile de l'ensemble des valeurs de la période 1950-2000. Ainsi, si au cours d'une année les pluies n'ont pas dépassé une seule fois cette valeur du 99ième percentile, alors R99p est égale à zéro (***figure 39***).

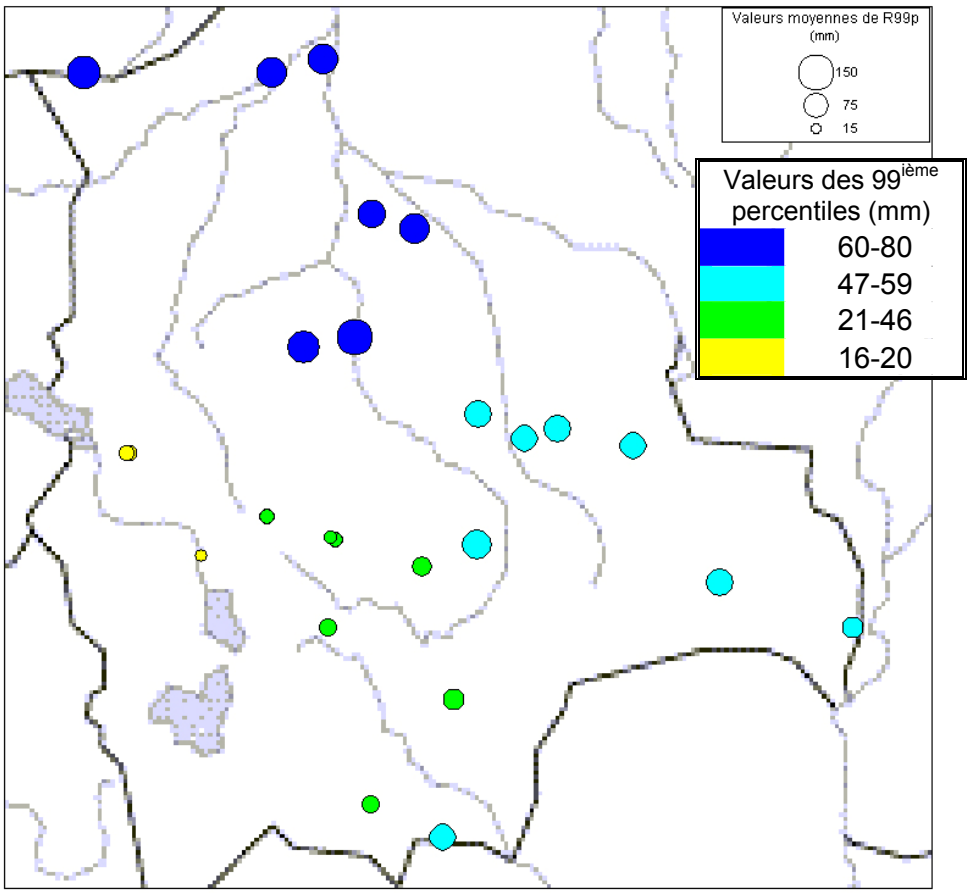


Figure 39: Valeurs moyennes de l'indice R99p (en mm) entre 1950 et 2000. Valeurs des 99ièmes de la période 1950-2000 (en mm) percentiles qui doit être atteint pour que R99p soit différent de zéro.

On peut observer encore une fois quatre groupes de stations bien distincts (excepté *Yacuiba*, qui présente une forte valeur de 99p et R99p par rapport aux stations voisines). Les extrêmes sont plus forts dans le nord de la plaine que dans le sud puisque les valeurs dépassées dans 1% des cas valent autour de 70 mm dans le nord et 50 mm dans le sud. Ils sont également plus forts dans la plaine en général (plus de 50 mm) que dans les Andes (moins de 50 mm) et enfin dans le sud des Andes (plus de 20 mm) que dans le nord (moins de 20 mm). De façon générale la fréquence de ces valeurs extrêmes suit le même schéma de répartition. Cela a été également observé pour la fréquence des fortes pluies.

Sur l'ensemble de la Bolivie, les valeurs de R99p sont très fortement corrélées aux valeurs de l'indices et R20mm (r = 0,96). R99p est donc fortement corrélé à la latitude et la longitude. Il est également très fortement corrélé aux totaux de pluies, PCPTOT (r = 0,97). On peut renvoyer aux remarques faites précédemment sur R20mm.

Les tendances sont présentées dans la ***figure 40***, suivante :

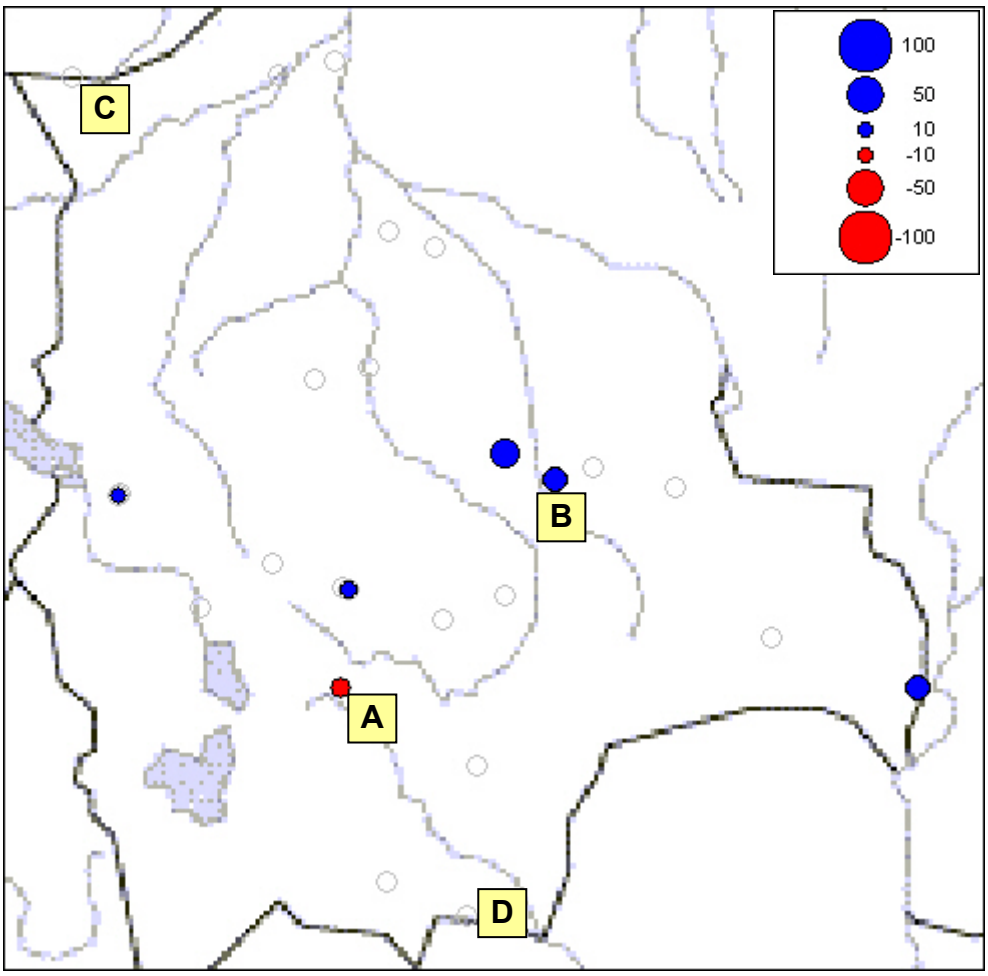


Figure 40: Signe et coefficients de détermination des tendances de l'indice R99p entre 1950 et 2000, pour les stations montrant des tendances significatives. Les cercles transparents indiquent une absence de tendance.

Sur les six stations présentant des tendances significatives sur le long terme, une seule (*Sucre*) montre une diminution des extrêmes de pluies. On peut voir dans la ***figure 41*** suivante comment évoluent les valeurs entre 1950 et 2000 au niveau des stations de *Sucre* et de *San Javier* qui présentent des tendances opposées. On observera également les variations de R99p au niveau de deux stations ne présentant pas de tendance linéaire significative sur le long terme : *Cobija* et *Yacuiba* (***figure 42***).

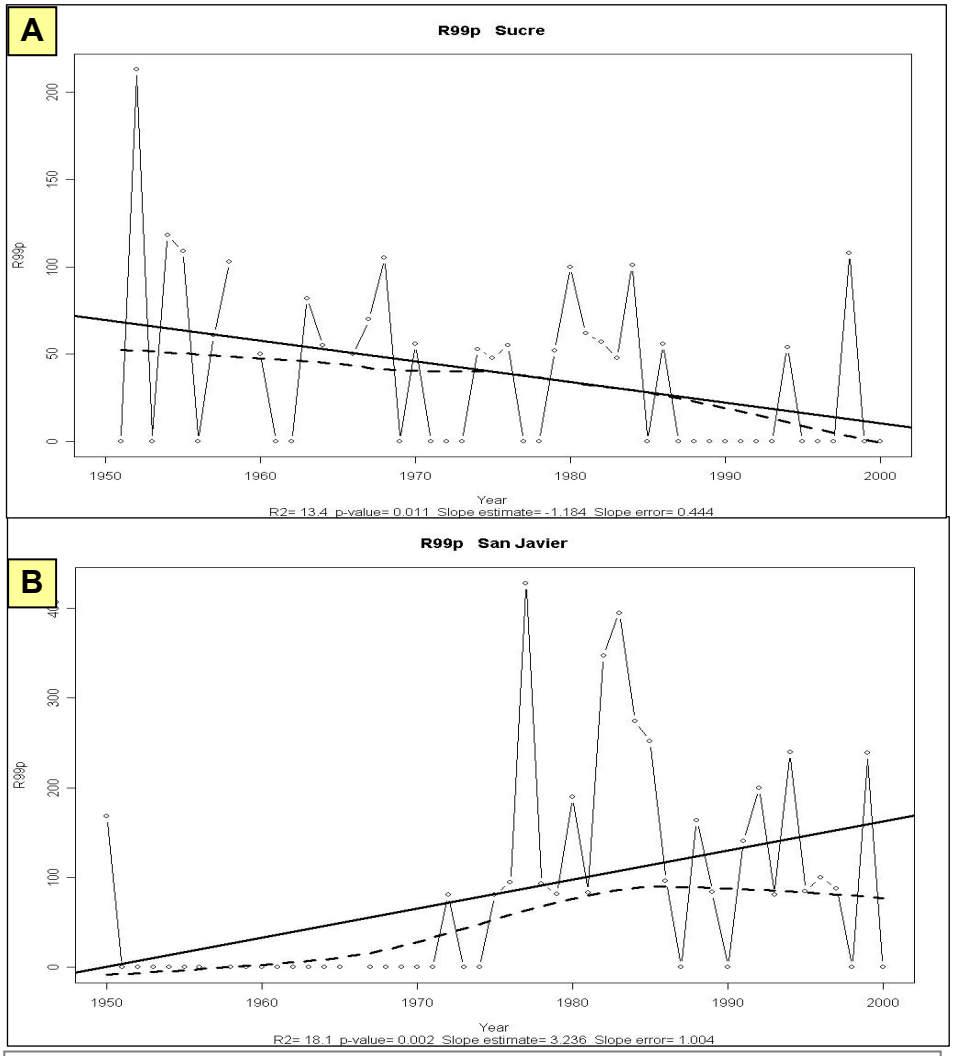


Figure 41: Variation annuelle et tendance linéaire (ligne pleine) et évolution non linéaire (ligne tiretée) entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R99p sur les stations *Sucre* et *San Javier*

Des tendances inverses sont remarquées entre Sucre et San Javier. À Sucre, les valeurs extrêmes sont atteintes presque une année sur deux avant la fin des années 80, tandis qu'après les extrêmes sont rarement dépassés. Dans cette station le 99ième percentile vaut 30 mm. Ainsi, par exemple en 1952, R99p dépasse 200mm, cela signifie qu'il y a eu au maximum 7 jours (à 30 mm) dans cette année, qui ont dépassé la valeur du 99ième percentile (7x30mm= 210mm).

À San Javier, c'est l'inverse : les extrêmes ne sont presque jamais atteints avant 1970, tandis qu'après on les dépasse souvent. Par exemple en 1987 on enregistre un R99p de 400 mm. Comme le 99ième percentile vaut 50,8mm, il y a au maximum 8 jours qui ont dépassé le 99ième percentile.

Au niveau de la station *Cobija*, au nord de la plaine bolivienne, les pluies extrêmes sont très variables d'une année sur l'autre et il n'existe pas de tendance linéaire significative. À *Yacuiba* les extrêmes ne sont pas atteints aux alentours des années 70. Les extrêmes varient faiblement avant 1970 : peu de jours dépassent le 99ième percentile. À partir de la fin des années 70, les extrêmes deviennent très fortement variables et plusieurs jours dépassent le 99ième percentile.

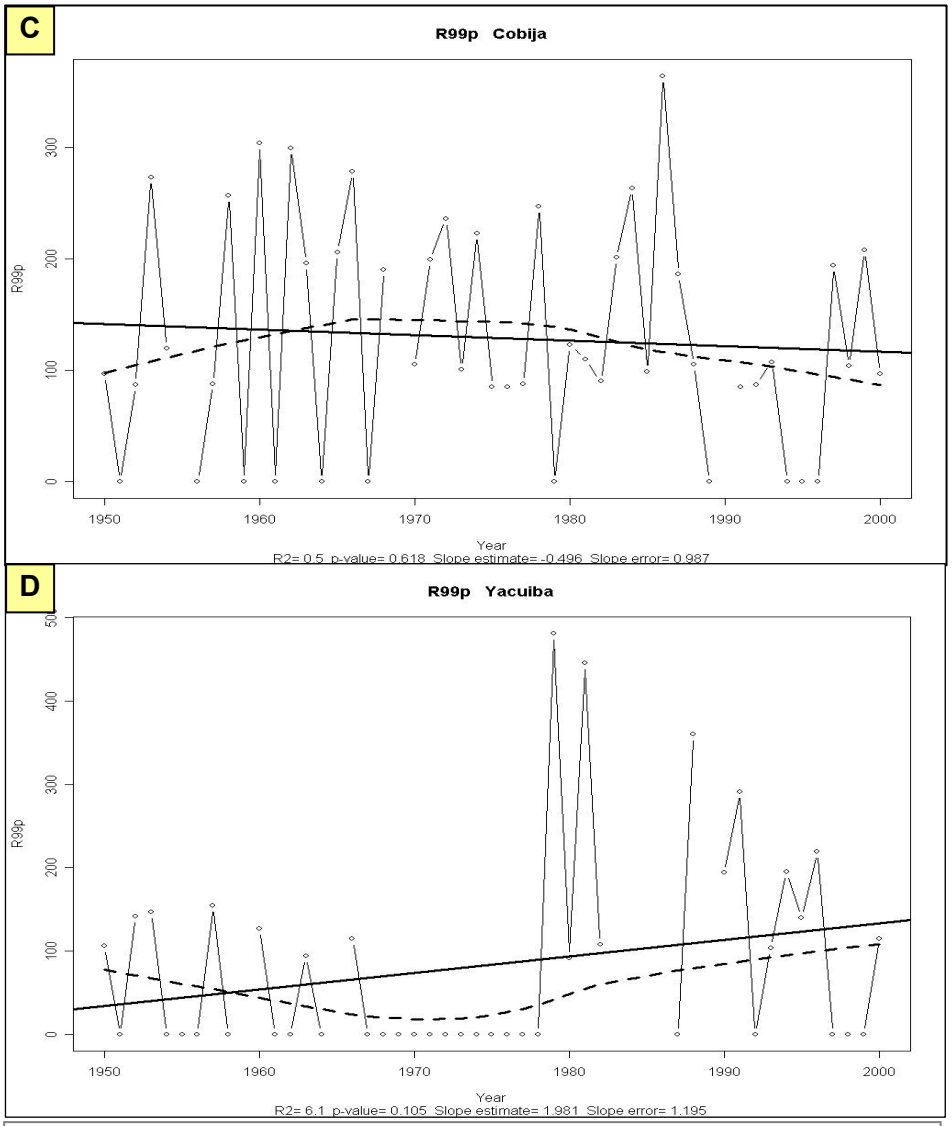


Figure 42: Variation annuelle et tendance linéaire (ligne pleine) et évolution non linéaire (ligne tiretée) entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R99p sur les stations *Cobija* et *Yacuiba*

La ***figure 43*** suivante présente les tendances pour les 6 derniers indices. RX1day correspond à la plus forte valeur de pluies de l'année, RX5day à la valeur obtenue par la somme des 5 jours consécutifs présentant les plus fortes valeurs de l'année ; enfin CWD et CDD correspondent respectivement aux durées des plus longues séquences, respectivement humides et sèches.

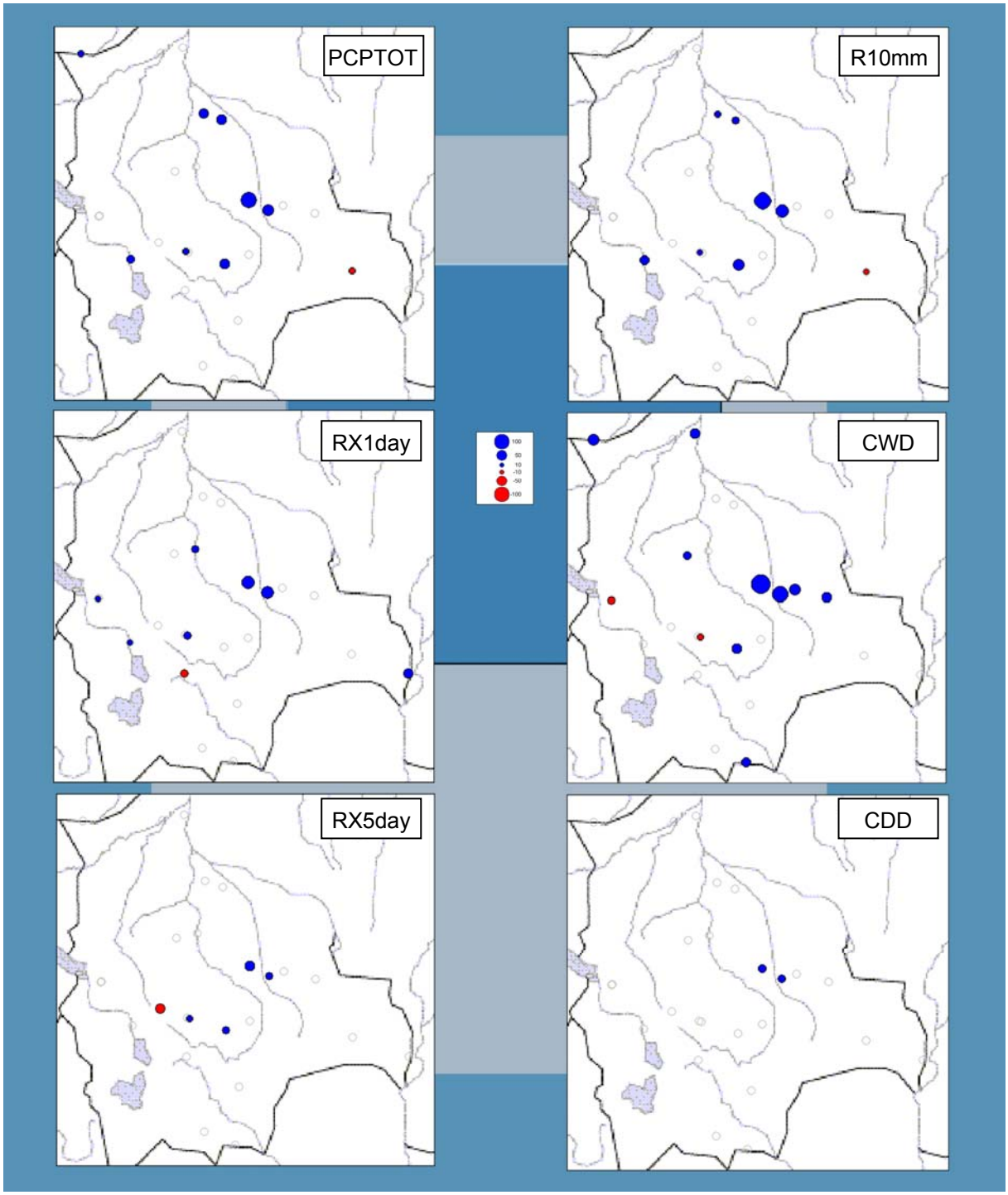


Figure 43: Signe et coefficients de détermination des tendances significatives entre 1950 et 2000 des indices PCPTOT, R10mm, RX1day, CWD, RX5day et CDD.
La <u>taille</u> est proportionelle à la valeur du coefficient de corrélation linéaire
La <u>couleur</u> indique une augmentation (bleu) ou une diminution (rouge) de l'eau.

On remarque qu'en règle générale, l'ensemble des indices présentent des tendances significatives dans les stations du centre de la plaine bolivienne. Ces tendances traduisent une augmentation de la quantité et de la fréquence des pluies et des extrêmes entre 1950 et 2000.

Trois stations présentent des tendances linéaires significatives originales entre 1950 et 2000 pour certains indices :

- La station de *Cochabamba* présente des tendances négatives pour R20mm, R95p et RX5day. Ces indices montrent ainsi une diminution cohérente de la durée et du total des pluies fortes.
- La station de *Robore* montre des tendances négatives pour PCPTOT et R10mm. Il pleut moins souvent des pluies supérieures à 10mm et en cohérence, le total annuel des pluies diminue.
- La station de *Sucre* présente des tendances négatives pour R99p et RX1day. Les valeurs de pluies extrêmes diminuent.

3.2.1.4. Remarques supplémentaires sur les moyennes et les tendances des indices pluviométriques

L'analyse de ces indices, leurs valeurs moyennes et de leurs tendances, montre qu'ils sont cohérents entre eux. Cette analyse nous a également permis de faire de nombreuses remarques :

- Les moyennes des précipitations dépendent des indices traduisant les fortes pluies. Ceci a également été montré par Haylock & al (2006) dans les autres régions de l'Amérique du sud.

- Le relief joue un rôle très important sur la distribution des totaux de pluies, de leur fréquence et des extrêmes. Les stations de plaine et celles des reliefs possèdent des valeurs très distinctes, elles sont toujours plus fortes en plaine.
- Les coordonnées terrestres jouent également un rôle sur les indices de pluies fortes et extrêmes. On distingue 4 zones présentant des valeurs analogues pour les indices des fortes pluies : 2 dans la plaine (selon la latitude : nord et sud) et 2 sur les reliefs (entre 800 et 3000m et au-delà de 3000m).

- Les tendances linéaires entre 1950 et 2000 des indices traduisent souvent une augmentation de la quantité, de la fréquence des pluies et des extrêmes dans le centre de la plaine bolivienne.

- Certaines stations montrent, comme on vient de la voir, des tendances originales : *Cochabamba*, *Robore* et *Sucre*.

- Les tendances linéaires traduisent mal la véritable évolution des pluies sur le long terme. En effet, des variations existent (et ont été montrées) sur des échelles temporelles plus courtes : décennales et pluri décennales. On observe souvent que certaines années (1970, 1980 et 1985) marquent un changement de tendance à certaines stations et pour certains indices. Celles-ci sont montrées dans l'***annexe 4*** et la partie ***4. Discussion***. C'est pourquoi nous allons recourir à des ACP afin de montrer les principaux modes faisant varier temporellement et spatialement ces indices entre 1950 et 2000.

3.2.2. La variabilité spatio-temporelle des indices pluviométriques

Nous avons remarqué dans la partie précédente que sur le long terme, les tendances linéaires expriment mal les véritables évolutions des indices pluviométriques dans le temps. De plus, les ACP sur les pluies de la Bolivie (partie ***3.2.***) entre 1950 et 2000, ont déjà montré différents modes de variations s'inversant à l'échelle pluri décennale. Nous allons regarder ce qu'il en est pour les indices sur la Bolivie entre 1950 et 2000.

Le ***tableau 4*** présente les pourcentages de variance des indices sur les deux premiers axes.

Les premiers axes factoriels présentent des pourcentages de variance faibles et disparates (F1 : maximum 34,8% pour R1mm et minimum 11, 5% pour RX1day). Un nombre important d'axes factoriels contient beaucoup d'information sur les indices pluviométriques. Néanmoins, les axes ultérieurs au second comportent une information très localisée ou dans le temps ou dans l'espace. Donc, nous limiterons l'analyse aux deux premiers axes.

% variance	F1	F2	Cumul
PCPTOT	25,4	**15,5**	40,9
CDD	24,4	9	33,4
CWD	22,6	13,6	36,2
R1mm	**34,8**	13,4	**48,2**
R10mm	24,5	12,7	37,2
R20mm	18,4	11,2	29,6
R95p	13,4	10,7	24,1
R99p	12,3	10,6	22,9
RX1day	**11,5**	**8,6**	**20,1**
RX5day	12,8	11	23,8
SDII	18,8	10,3	29,1

Tableau 4: Pourcentages de variance et variances cumulées des axes factoriels F1 et F2 pour chaque indice.

La disparité des variances associées aux axes F1 et F2 incite à penser qu'ils ne correspondent pas, pour tous les indices, aux mêmes modes de variabilité. L'analyse des corrélations temporelles entre ces axes montre en effet des liens entre certains indices, mais pas entre d'autres. Les ***tableaux 5 et 6*** présentent les coefficients de corrélation obtenus par l'analyse de corrélation de Bravais-Pearson entre indices et entre indice et le MEI qui mesure la variabilité des phénomènes atmosphériques et océaniques du Pacifique équatorial :

Légende		Explication
	1	corrélation parfaite
	[0,70 ; 1 [	très fortement corrélés de façon très significative pour un risque d'erreur de 5%
	[0,50 ; 0,70 [	fortement corrélés de façon très significative pour un risque d'erreur de 5%
	[0,27 ; 0,50 [	faiblement corrélés de façon significative pour un risque d'erreur de 5%
	[0 ; 0,27 [	pas de corrélation

F1	PCPTOT	CDD	CWD	R1	R10	R20	R95p	R99p	RX1d	RX5d	SDII	MEI
PCPTOT	1	-0,27	+0,67	+0,77	+0,98	+0,92	+0,78	+0,50	+0,46	+0,61	-0,20	+0,12
CDD	-0,27	1	-0,12	-0,28	-0,22	-0,28	-0,20	-0,11	-0,19	-0,10	+0,17	-0,46
CWD	+0,67	-0,12	1	+0,83	+0,68	+0,59	+0,57	+0,54	+0,56	+0,68	-0,57	+0,17
R1mm	+0,77	-0,28	+0,83	1	+0,78	+0,71	+0,62	+0,62	+0,63	+0,69	-0,73	+0,15
R10mm	+0,98	-0,22	+0,68	+0,78	1	+0,91	+0,71	+0,48	+0,44	+0,60	-0,24	+0,09
R20mm	+0,92	-0,28	+0,59	+0,71	+0,91	1	+0,78	+0,49	+0,48	+0,63	-0,15	+0,17
R95p	+0,78	-0,20	+0,57	+0,62	+0,71	+0,78	1	+0,77	+0,66	+0,77	-0,20	+0,28
R99p	+0,50	-0,11	+0,54	+0,62	+0,48	+0,49	+0,77	1	+0,82	+0,77	-0,44	+0,36
RX1d	+0,46	-0,19	+0,56	+0,63	+0,44	+0,48	+0,66	+0,82	1	+0,73	-0,52	+0,38
RX5d	+0,61	-0,10	+0,68	+0,69	+0,60	+0,63	+0,77	+0,77	+0,73	1	-0,38	+0,33
SDII	-0,20	+0,17	-0,57	-0,73	-0,24	-0,15	-0,20	-0,44	-0,52	-0,38	1	-0,27
MEI	+0,12	-0,46	+0,17	+0,15	+0,09	+0,17	+0,28	+0,36	+0,38	+0,33	-0,27	1

Tableau 5: Coefficients de corrélation de Pearson –r- entre coordonnées temporelles sur les axes F1 des différents indices. Pour un degré de liberté de 49 (ddl= 51années-2), la valeur seuil de r, pour un risque d'erreur de 5%, vaut 0,27

F2	PCPTOT	CDD	CWD	R1mm	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RX1d	RX5d	SDII	MEI
PCPTOT	1	+0,05	-0,55	-0,74	-0,91	-0,84	-0,67	-0,26	-0,00	-0,63	+0,02	+0,49
CDD	+0,05	1	-0,01	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03	+0,01	-0,07	+0,17	-0,01	+0,05
CWD	-0,55	-0,01	1	+0,63	+0,53	+0,59	+0,59	+0,18	+0,13	+0,49	+0,02	-0,51
R1mm	-0,74	-0,03	+0,63	1	+0,68	+0,61	+0,58	+0,12	+0,10	+0,50	+0,19	-0,42
R10mm	-0,91	-0,05	+0,53	+0,68	1	+0,85	+0,53	+0,24	-0,03	+0,53	+0,13	-0,4
R20mm	-0,84	-0,04	+0,59	+0,61	+0,85	1	+0,74	+0,33	+0,08	+0,68	+0,19	-0,43
R95p	-0,67	-0,03	+0,59	+0,58	+0,53	+0,74	1	+0,39	+0,19	+0,80	+0,14	-0,41
R99p	-0,26	+0,01	+0,18	+0,12	+0,24	+0,33	+0,39	1	+0,25	+0,49	+0,06	-0,13
RX1d	-0,00	-0,07	+0,13	+0,10	-0,03	+0,08	+0,19	+0,25	1	+0,20	+0,26	+0,26
RX5d	-0,63	+0,17	+0,49	+0,50	+0,53	+0,68	+0,80	+0,49	+0,20	1	+0,26	-0,26
SDII	+0,02	-0,01	+0,02	+0,19	+0,13	+0,19	+0,14	+0,06	+0,26	+0,26	1	+0,14
MEI	+0,49	+0,05	-0,51	-0,42	-0,4	-0,43	-0,41	-0,13	+0,26	-0,26	+0,14	1

Tableau 6: Coefficients de corrélation de Pearson –r- entre coordonnées temporelles sur les axes F2. Pour un degré de liberté de 49 (ddl= 51années-2), la valeur seuil de r, pour un risque d'erreur de 5%, vaut 0,27

Ces tableaux vont nous aider à regrouper les analyses des ACP afin d'éviter des répétitions dans le rapport. Nous pouvons faire les remarques suivantes :

- Les variations temporelles de CDD (nombre de jours secs consécutifs) ne sont jamais liées à celles des autres indices, sur aucun axe, ni entre les axes. Ainsi, nous pouvons dire que les variations sur le long terme du nombre de jours secs consécutifs sont conduites par des facteurs indépendants de la quantité et la fréquence des pluies. Il sera analysé individuellement.
- Les axes factoriels de PCPTOT (totaux annuels de pluies), R1mm, R10mm et R20mm (nombre de jours dont les précipitations excèdent respectivement 1, 10 et 20mm) sont toujours très fortement corrélés. La moyenne annuelle varie selon la fréquence et l'intensité des pluies. On remarque que la corrélation avec PCPTOT est particulièrement forte pour les pluies supérieures à 10mm. Elle l'est un peu moins lorsque les précipitations dépassent 20mm. Nous remarquons que les modes de variations des indices traduisant les pluies les plus extrêmes (R99p, RX1day et RX5day) sont un peu différents. Les pluies extrêmes, qui participent évidemment à la moyenne annuelle, varient selon des modes différents de ceux des pluies « moyennes ». Les pluies extrêmes semblent correspondre à des phénomènes qui suivent leurs propres règles.
- Les 2 premiers axes factoriels de CWD (séquence maximale de pluies) sont particulièrement liés à ceux de R1mm. Lorsque le nombre de jours pluvieux augmente (diminue) les séquences de pluies sont plus longues (courtes). Nous remarquons que les corrélations sont plus faibles avec R10mm et encore plus avec R20mm. Ainsi les séquences pluvieuses dépendent surtout de précipitations faibles (<10mm).

Les regroupements suivants sont proposés pour analyser les ACP, les indices graissés correspondant à ceux qui seront détaillés :

- PCPTOT, R1mm, **R10mm** et R20mm
- R95p **R99p**, **RX1day** et RX5day
- **CWD**
- **CDD**

3.2.2.1. R10mm

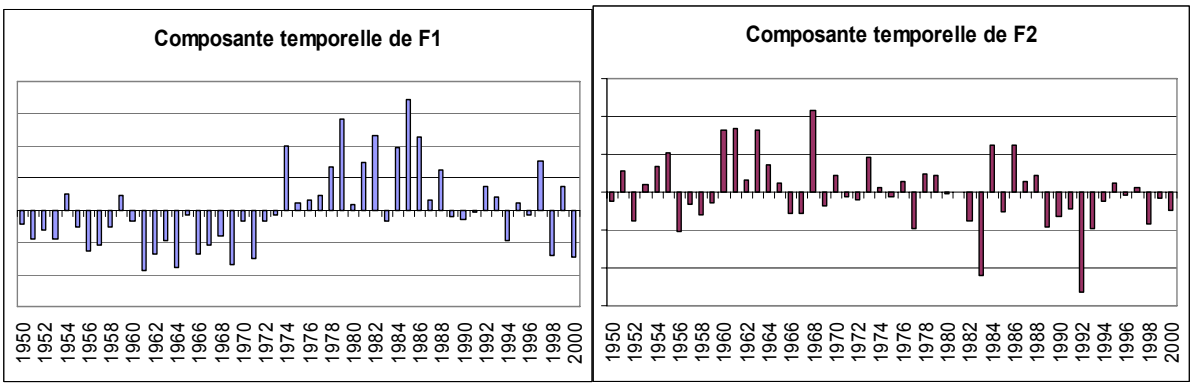


Figure 44: Coordonnées des individus entre 1950 et 2000 de R10mm selon F1 et F2.

Sur cette page, nous pouvons voir comment l'indice R10mm (nombre de jours de pluies dont le total est supérieur ou égal à 10mm) varie dans le temps entre 1950 et 2000 (***figure 44***) et dans l'espace bolivien (***figure 45***), selon les deux premiers axes factoriels.

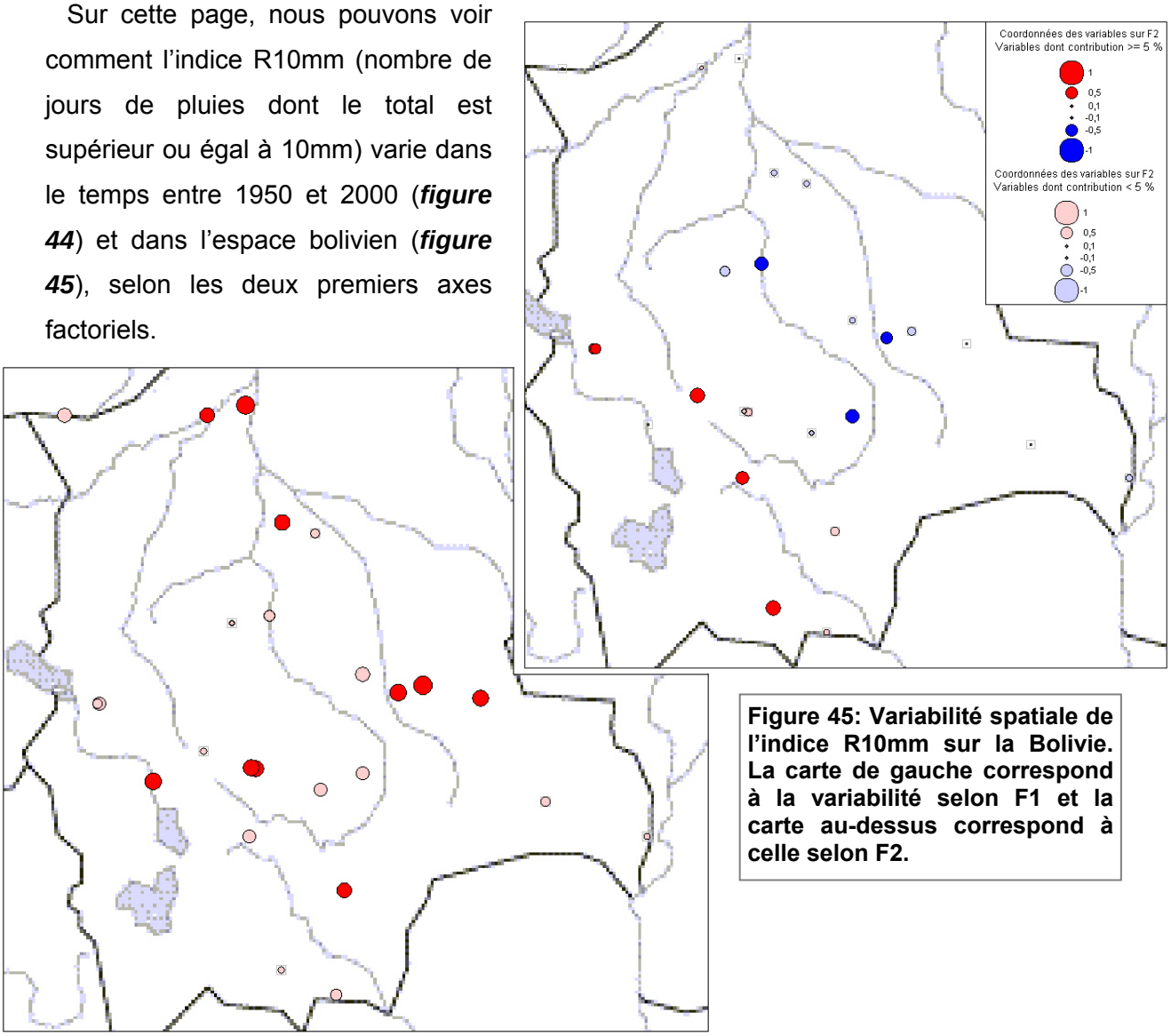


Figure 45: Variabilité spatiale de l'indice R10mm sur la Bolivie. La carte de gauche correspond à la variabilité selon F1 et la carte au-dessus correspond à celle selon F2.

La variation temporelle sur l'axe F1 est bi décennale entre 1950 et 1988, changeant de sens en 1974, puis elle devient plus interannuelle à partir de 1989. Ce mode de variabilité touche de la même façon les stations andines et celles du nord et du centre de la plaine. Dans ces stations il est tombé plus souvent des précipitations dépassant 10mm entre 1974 et 1988.

La variation temporelle sur l'axe F2 est d'ordre interannuel entre 1950 et 2000. Nous remarquons les années de forts El Niño : 1983, 1992, et des années de forts La Nina : 1960-64 et 1968. L'analyse de corrélation (non montrée) détermine un faible lien mais significatif entre les variations temporelles selon F2 et les variations de l'indice MEI. Dans l'espace nous pouvons noter des comportements inverses dans les Andes et la plaine centrale.

Nous observons la même variabilité spatiale et temporelle pour R10mm que pour les pluies annuelles en Bolivie (partie ***3.2.1)***. Les axes F1 et F2 des indices PCPTOT, R1mm, R10mm et R20mm correspondent aux mêmes modes de variabilité que ceux déjà analysés pour les pluies annuelles moyennées entre 1950 et 2000 en Bolivie (qui correspondent à PCPTOT). F1 serait en relation avec les températures de surface de l'Atlantique nord. Entre 1970 et 1988, l'augmentation des pluies en Bolivie correspondrait à l'augmentation du flux de mousson circulant sur l'Amazonie (figure 5 et partie ***3.1***). La fréquence et la quantité de pluies seraient alors principalement influencées par l'intensité du flux de mousson. F2 correspondrait à la variabilité des évènements ENSO, associés à un autre ou d'autres phénomène(s). On remarque que les lien significatif entre MEI et R20mm et plus fort que celui liant MEI à R1mm et à R10mm. Ainsi, dans la plaine, en années El Niño, il y a plus de pluies fortes, tandis que dans les Andes le même phénomène est observé en années La Nina.

3.2.2.2. **R99p**

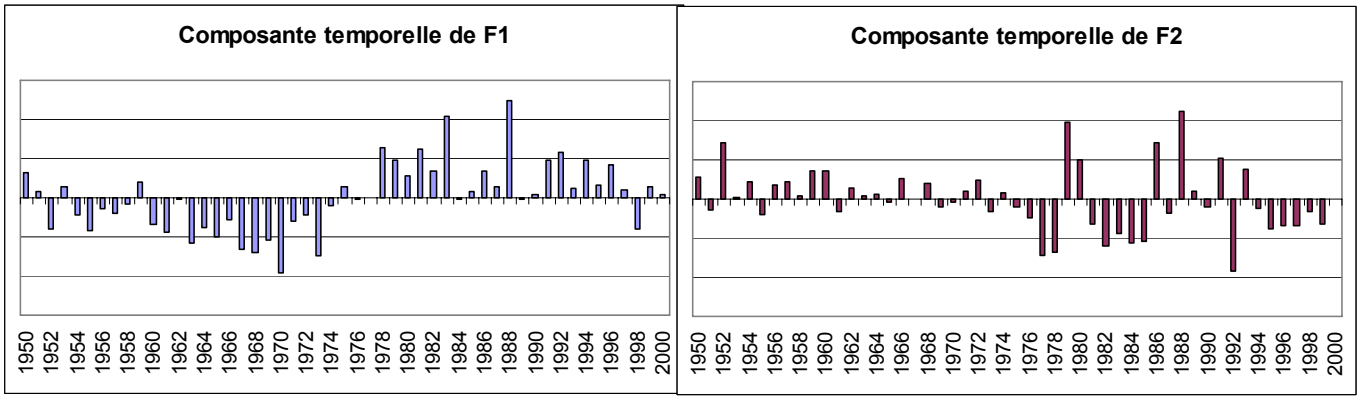
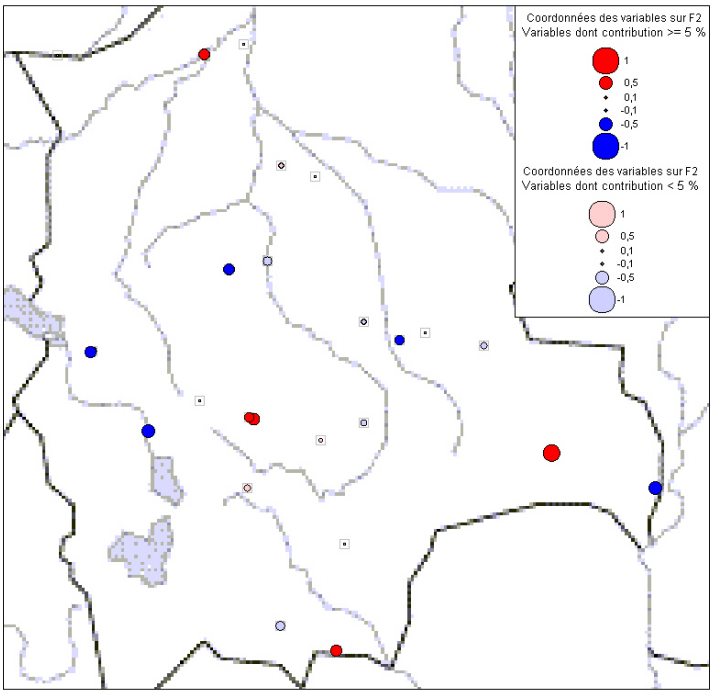


Figure 46: Coordonnées des individus de R99p entre 1950 et 2000 selon F1 et F2.

Rappelons que l'indice R99p correspond à la somme annuelle des valeurs de pluies dépassant le 99ième percentile calculé sur toutes les pluies quotidiennes entre 1950 et 2000. Il traduit donc les pluies extrêmes.



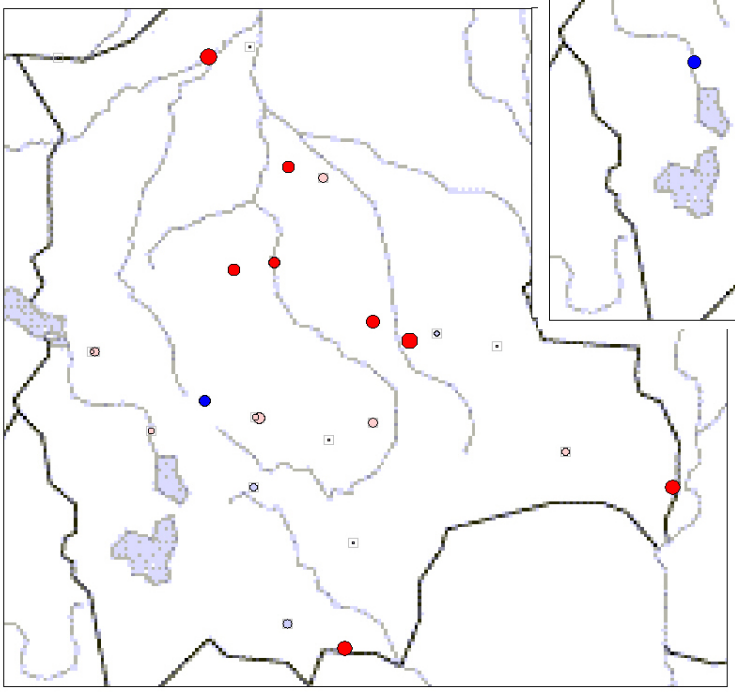


Figure 47: Variabilité spatiale de l'indice R99p sur la Bolivie. La carte de gauche correspond à la variabilité selon F1 et la carte au dessus correspond à celle selon F2.

Sur F1, nous observons une variabilité pluri décennale changeant de signe en 1975 (**figure 46**). Il touche en particulier les stations situées dans la moitié nord de la plaine, mais également des stations andines et au sud de la plaine (***figure 47***). Les extrêmes de pluies sont plus importants depuis 1975 dans ces stations. Trois stations dans les vallées ont un comportement opposé (Cochabamba de façon très affirmée, Sucre et Tarija de façon moins importante).

Sur F2, nous remarquons une variabilité interannuelle qui peut durer quelques années (4 à 6 ans). Notons également que cette variabilité interannuelle devient très forte à partir de 1976 (***figure 46***). À partir de 1976, certaines années possèdent un nombre important de jours de pluies extrêmes. Cette forte variabilité interannuelle à partir des années 70 est en correspondance avec Callède et al (2004) qui remarquent une forte augmentation de la variabilité des débits à Obidos à partir de 1970. Nous remarquons une variabilité spatiale complexe (***figure 47***). Elle influe sur les stations de hautes altitudes (*Oruro, La Paz et El Alto*) de la même façon que dans le centre de la plaine, alors que les stations des vallées andines varient à l'opposé.

Nous avons remarqué que les deux principaux modes de variabilité des extrêmes de pluies changeaient dans le milieu des années 70. Nous pouvons remarquer sur le ***tableau 5*** que F1 est mieux corrélé aux évènements ENSO que le deuxième axe. Nous avions distingué l'inverse pour les fréquences et quantités de pluies. Nous allons regarder ce qu'il en est pour un autre indice se rapportant aux extrêmes de pluies.

3.2.2.3. RX1day

L'indice RX1day correspond à la valeur maximale de pluies chaque année. Il correspond donc à un autre indice de pluies extrêmes.

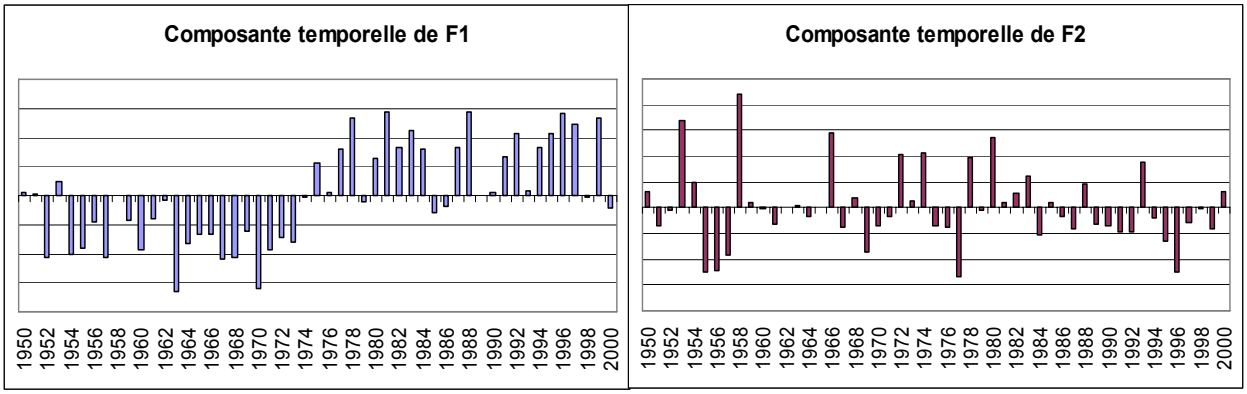


Figure 48: Coordonnées des individus de RX1day entre 1950 et 2000 selon F1 et F2.

Nous remarquons (***figure 48***) sur F1, une variabilité temporelle d'échelle pluri décennale sur le long terme qui change de sens en 1973. Sur F2, nous observons une variabilité interannuelle avec des séquences qui peuvent durer jusqu'à 6 ans. Des valeurs très fortes sont observées en particulier dans les années 50, mais aussi entre 1960 et 1980.

La ***figure 49*** présente les variabilités spatiales déterminées par F1 et F2 pour l'indice RX1day. 9 stations contribuent significativement au mode de variabilité F1. Elles sont principalement localisées dans le centre de la plaine, mais également sur l'Altiplano. Ces stations présentent après 1973 de plus forts maximums extrêmes de pluies. Une seule station montre une réaction inverse aux autres: la station *Sucre ou les maximums extrêmes sont plus faibles après 1973.* On remarque que la station *Tarija*, au sud des Andes suit les variations de *Sucre* mais beaucoup plus faiblement. Sur F2, les stations du nord de la plaine et 3 stations andines suivent la même variation. Les stations du centre de la plaine ont une variabilité inverse et moins forte.

Le mode F1 est fortement corrélé à celui de R99p, mais pas F2 qui n'est corrélé au mode d'aucun indice. F2 correspond à un mode de variabilité interannuel à part.

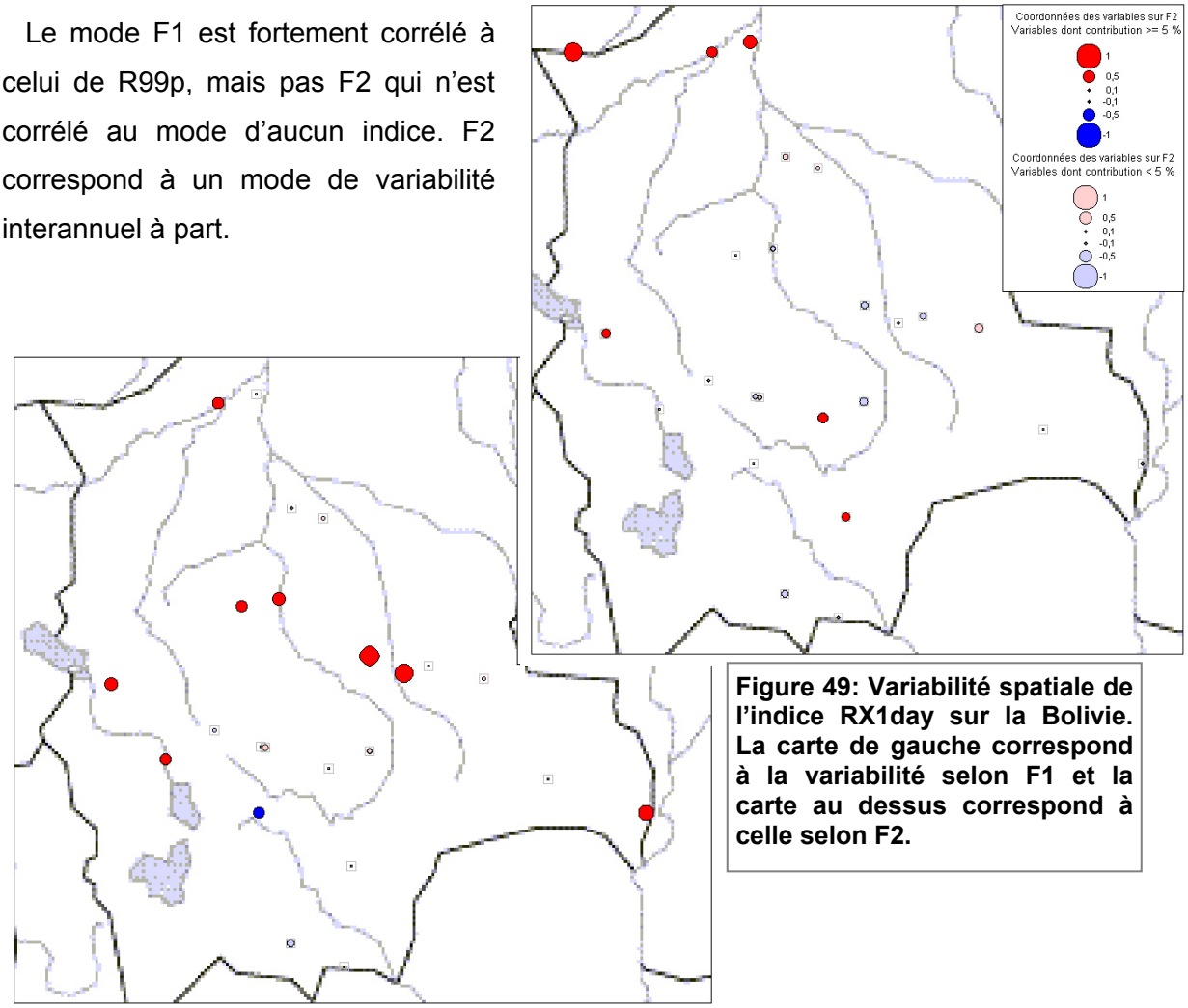


Figure 49: Variabilité spatiale de l'indice RX1day sur la Bolivie. La carte de gauche correspond à la variabilité selon F1 et la carte au dessus correspond à celle selon F2.

Il n'est pas très étonnant de mettre en évidence des variabilités singulières pour cette variable qui est elle-même singulière, puisqu'elle est calculée toutes les années.

3.2.2.4. CWD

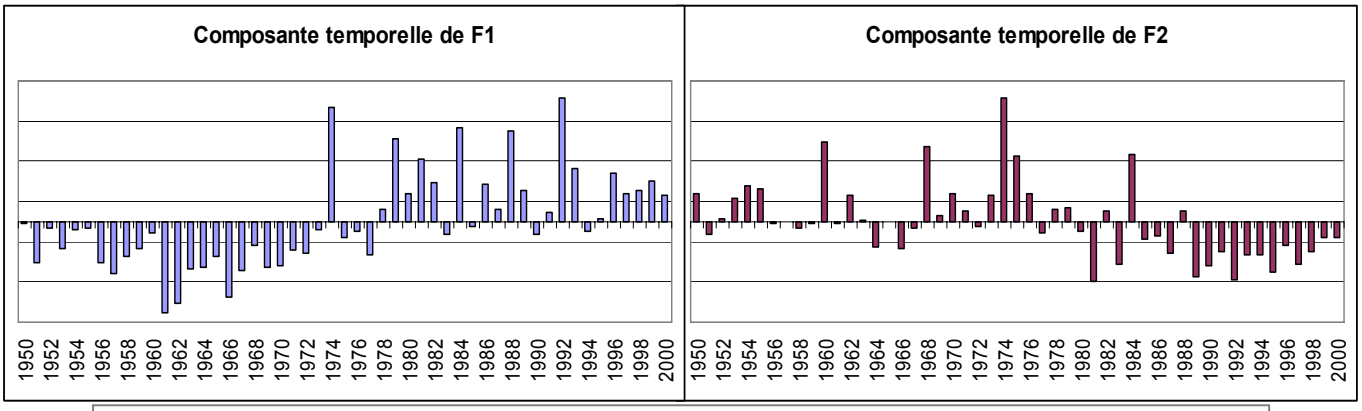
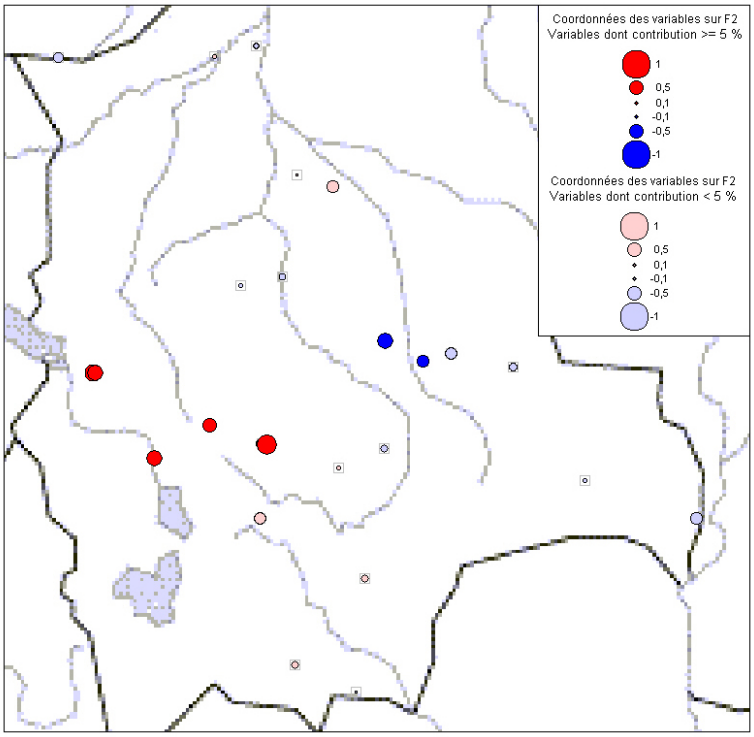


Figure 50: Coordonnées des individus de l'indice CWD entre 1950 et 2000 selon F1 et F2

Ces figures présentent les variabilités de l'indice CWD (nombre maximal de jours pluvieux consécutifs : plus longue séquence de pluies) entre 1950 et 2000 (***figure 50***) dans l'espace bolivien (***figure 51***), selon les deux premiers axes factoriels.



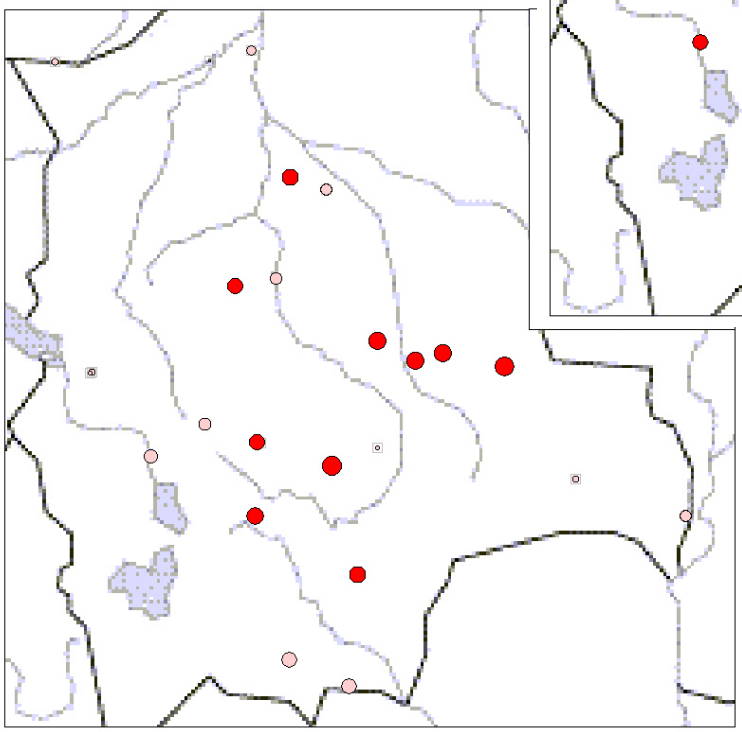


Figure 41: Variabilité spatiale de l'indice CWD en Bolivie. La carte de gauche correspond à la variabilité selon F1 et la carte au-dessus correspond à celle selon F2.

Par F1, nous pouvons observer une variabilité pluri décennale amorçant un changement de sens en 1974, qui se confirme en 1978 (***figure 50***). Elle s'opère de la même façon dans la plupart des stations, mais en particulier dans la grande moitié sud de la plaine, de même que les stations de vallées andines du centre (***figure 51***). Le mode F1 engendre des séquences de pluies plus longues à partir de 1974 sur une grande part de la Bolivie. Bien qu'elle montre la même cassure en 1974 que les indices des pluies extrêmes, elle est mieux corrélée avec la variabilité de la fréquence des pluies faibles et moyennes.

Le mode F2 varie sur le long terme à l'échelle interannuelle jusqu'en 1985. Après 1985, jusqu'en 2000, il ne varie plus (***figure 50***). Il touche différemment les stations dans le nord des Andes et celles du centre de la plaine (***figure 51***). Entre 1950 et 1985, les valeurs de CWD sont, sur plusieurs années, supérieures (inférieures) ou égales à la normale dans la moitié nord des Andes (le centre de la plaine). Après 1985, dans les stations du centre de la

plaine, les séquences de pluies sont plus longues et inversement dans les stations andines. Ce mode est lié au second mode de variabilité des pluies totales et à leur fréquence.

3.2.2.5. CDD

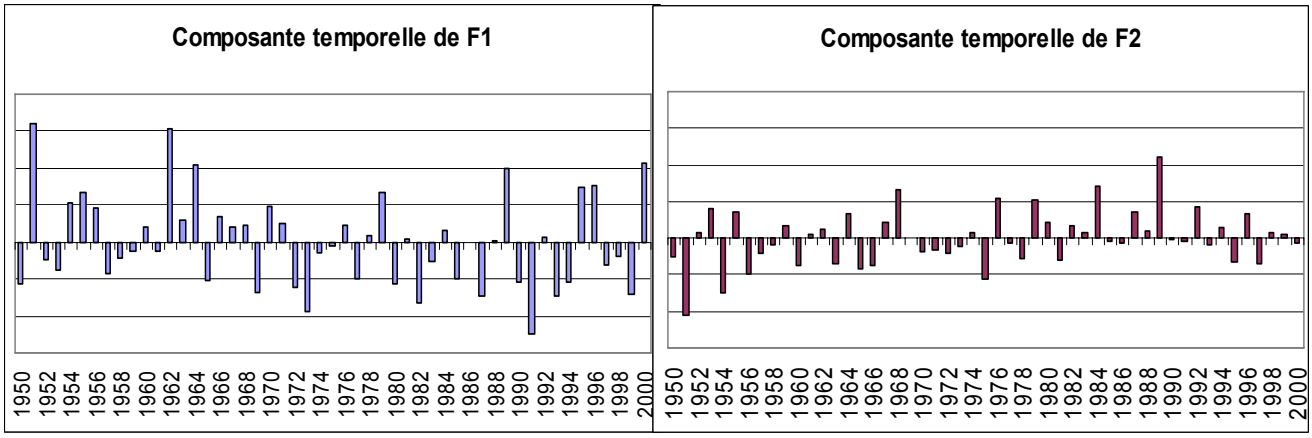


Figure 52: Coordonnées des individus de CDD entre 1950 et 2000 selon F1 et F2.

L'indice CDD correspond à la plus longue séquence sèche enregistrée sur une année. Ses deux premiers modes varient inter annuellement (***figure 52***).

Nous observons par F1 une variabilité spatiale très proche de celle observée pour CWD selon le 1^{ier} axe (***figure 50***). Ce mode touche de la même façon de nombreuses stations, en particulier dans le centre (Andes et plaine confondues) de la Bolivie (***figure 53***). Selon F2, nous remarquons, pour quelques stations, une opposition spatiale entre les Andes et la plaine.

Les deux premiers modes de CDD ne sont corrélés à ceux d'aucun autre indice. Toutefois, le mode F1 est significativement corrélé à l'indice MEI (***tableau 5***).

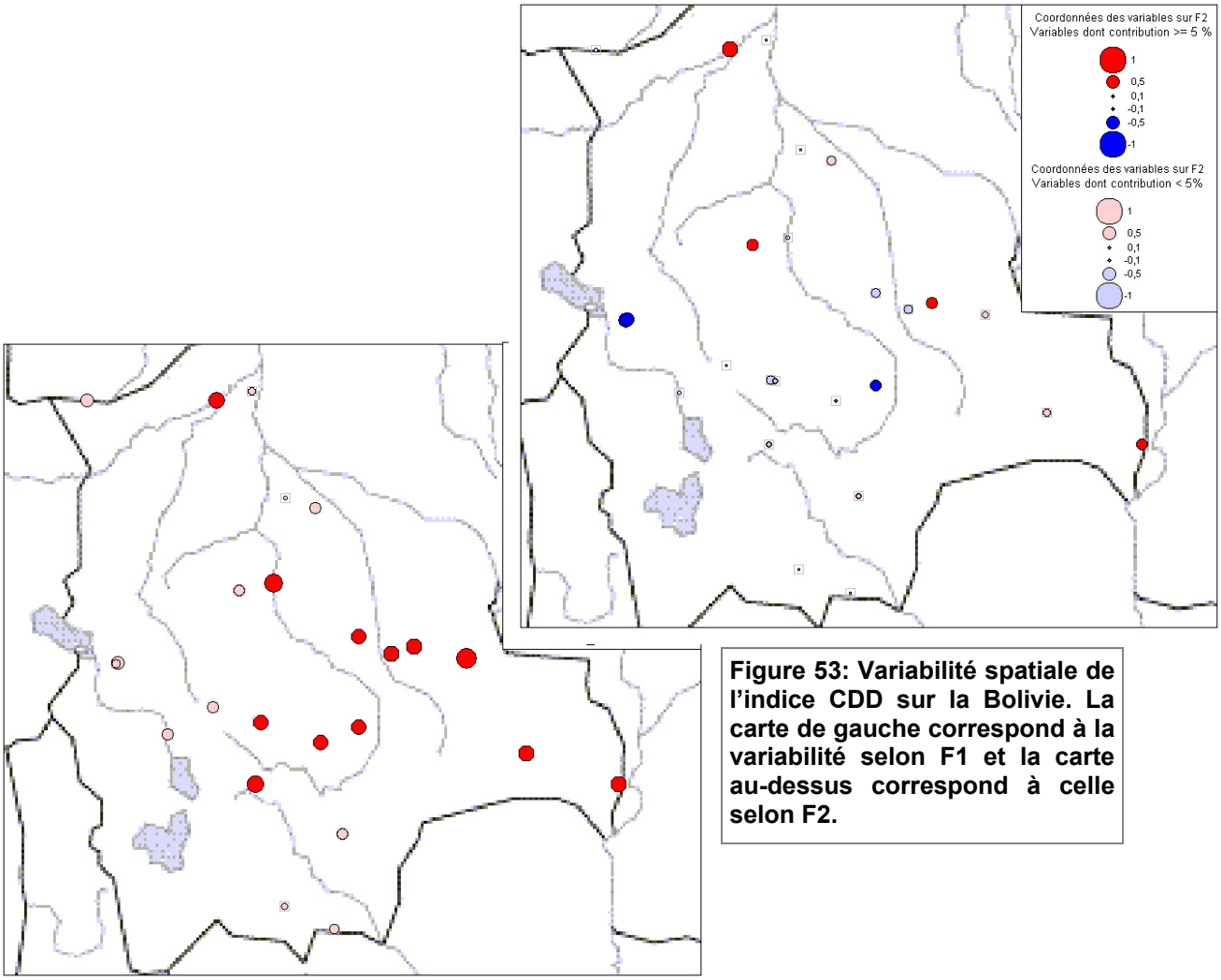


Figure 53: Variabilité spatiale de l'indice CDD sur la Bolivie. La carte de gauche correspond à la variabilité selon F1 et la carte au-dessus correspond à celle selon F2.

3.2.3 Analyse de l'intensité journalière des pluies

L'indice SDII traduit l'intensité journalière moyenne des pluies (en mm/j), calculée pour chaque année :

$$\textbf{SDII} = \frac{PCPTOT}{R1mm}$$

Cet indice est analysé de 1950 à 2000, sur la Bolivie. Il est assez complexe à analyser car il dépend à la fois des valeurs de l'indice PCPTOT (totaux annuels de pluies) et R1mm (fréquence des pluies), qui, comme il a été montré avant, ont des comportements un peu différents. C'est en partie pour cette raison qu'il lui est consacré une partie du rapport. Son analyse permettra également de vérifier si l'augmentation des crues observée à partir de 1970 dans le bassin du Madeira, qui draine l'Amazonie bolivienne (***figure 17***), est liée à une intensification des pluies ou à une autre modalité.

En premier lieu, on regardera, pour cet indice, les valeurs moyennes obtenues entre 1950 et 2000. On comparera les valeurs moyennes obtenues avant et après 1970 pour tester l'hypothèse d'un lien avec l'augmentation observée des crues.

On montrera ensuite comment il évolue entre 1950 et 2000. On regardera les tendances suivies par cet indice sur la période 1950-2000. Puis, comme il a été fait pour les autres indices, des ACP seront réalisées afin de montrer la variabilité spatio-temporelle de cet indice.

Pour finir, une analyse mensuelle est proposée. On montrera quels sont les mois qui présentent les plus fortes intensités de pluies. Enfin, on analysera la variabilité spatio-temporelle des mois qui précèdent la crue annuelle du Madeira.

3.2.3.1. Les valeurs moyennes de l'intensité journalière des pluies

La ***figure 53*** présente les valeurs de l'indice SDII (en couleur), moyennées entre 1950 et 2000. Cette carte montre une nette différence d'intensité entre la plaine et le relief andin (excepté la station *Yacuiba*). L'intensité des pluies est particulièrement faible dans les 3 stations de l'Altiplano (5 à 6 mm/jour), et elle particulièrement forte dans le centre de la plaine (16,7 à 20 mm/jour).

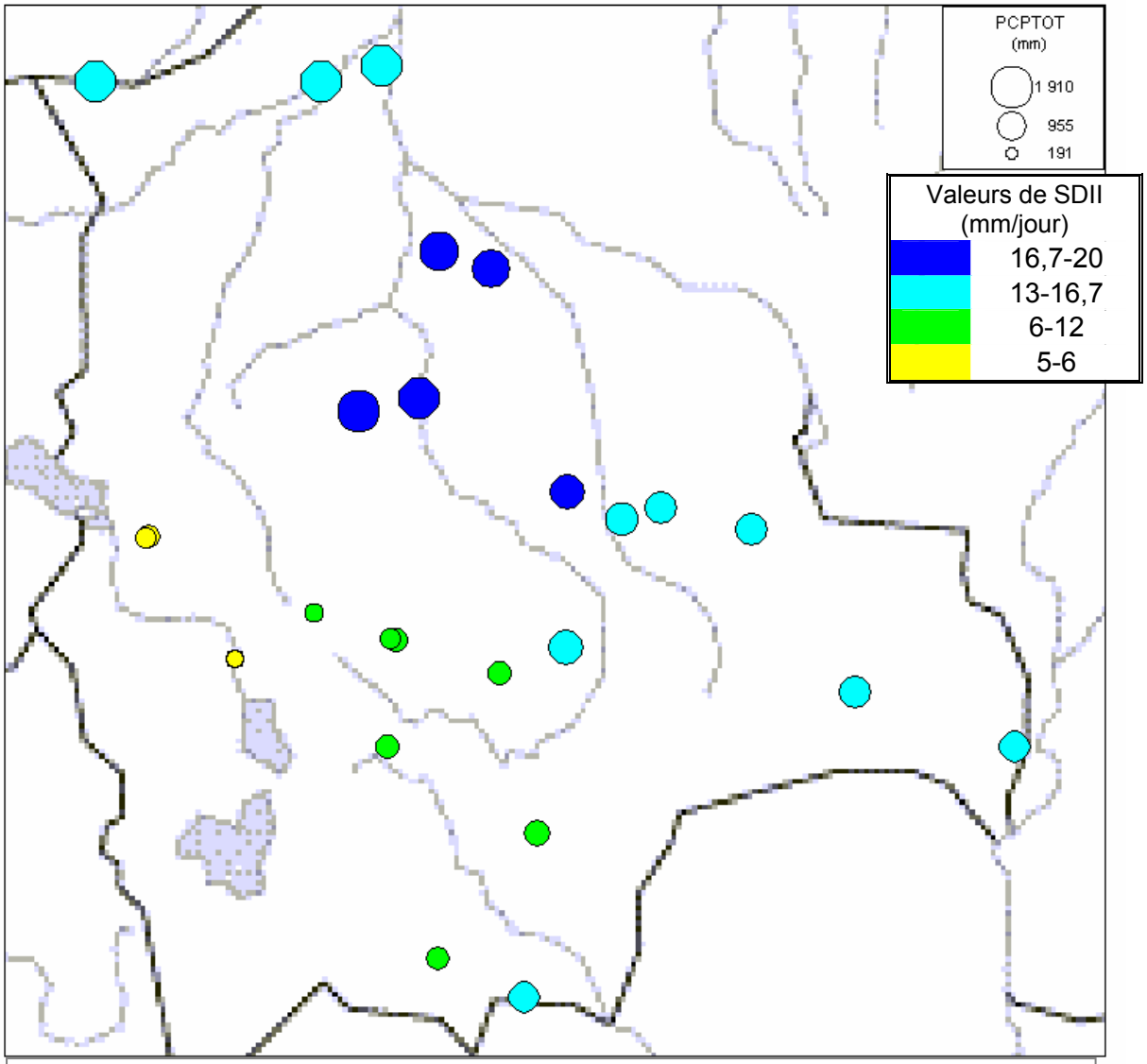


Figure 54: Valeurs moyennes de PCPTOT associées à celles de SDII, obtenues entre 1950 et 2000 pour les 25 stations boliviennes

Sur la carte (***figure 54***), les valeurs moyennes de l'indice SDII ont été associées à celles de l'indice PCPTOT. On peut remarquer que l'organisation spatiale des valeurs de cet indice ne correspond pas tout à fait à celui des indices PCPTOT et R1mm, notamment les plus fortes intensités (au centre de la plaine) ne sont pas là où sont mesurées les plus fortes pluies annuelles (au nord de la plaine) (***figure 26***).

Alors qu'il ne montre aucune corrélation avec les valeurs de R1mm, SDII est fortement corrélé à PCPTOT (r = 0,88). Il est également très dépendant des valeurs fortes et extrêmes de pluies. De ce fait, il possède de très robustes liens avec les indices traduisant des pluies fortes : R99p (r = 0,86), et encore plus avec R20mm (r = 0,92). En fait, comme les R1mm montrent une tendance linéaire (positive) entre 1950 et 2000 pour la plupart des stations, les évolutions de SDII dépendent particulièrement de celles de PCPTOT qui varie beaucoup dans le temps et selon les stations.

Sur le long terme, SDII présente des tendances linéaires significatives pour un grand nombre de stations (14 sur 25) entre 1950 et 2000 (***figure 55***).

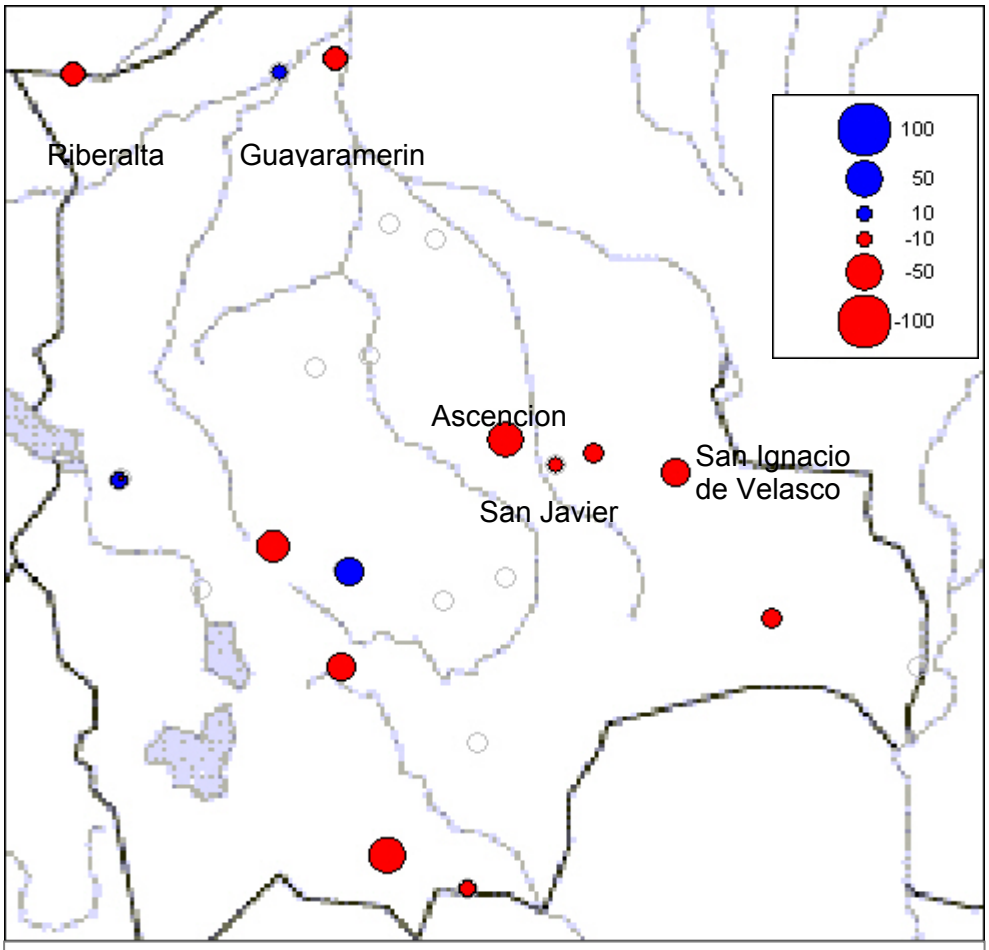


Figure 55: Signe et coefficient de détermination des tendances linéaires significatives de l'indice SDII entre 1950 et 2000

Sur les 14 stations montrant des tendances significatives de SDII, 11 présentent des tendances négatives et 3 seulement des tendances positives. On va regarder dans le détail les variations des valeurs de SDII dans le temps pour certaines stations.

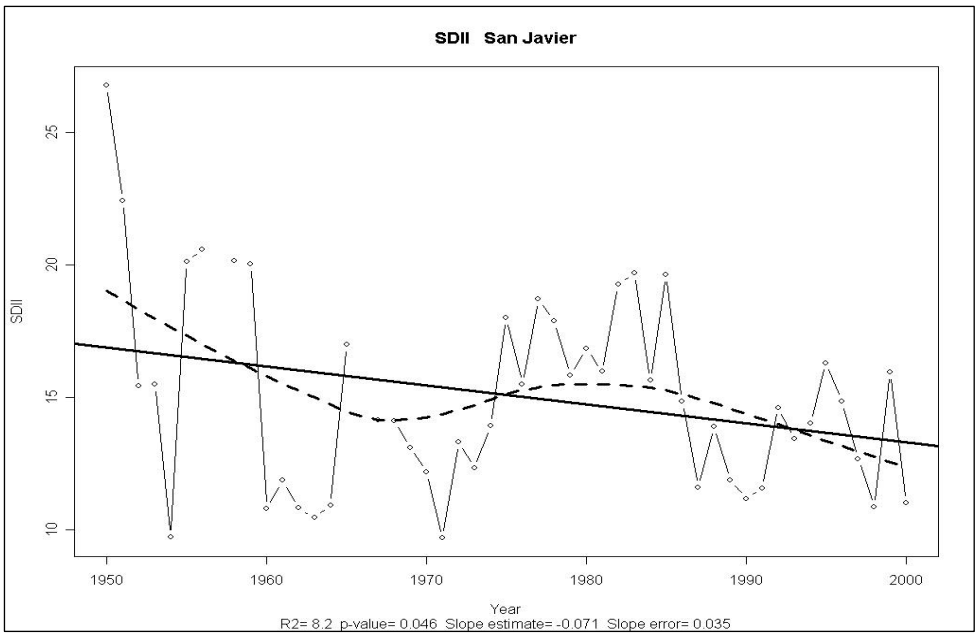


Figure 56: Variation annuelle et tendance entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice SDII sur la station de *San Javier*

La station de *San Javier* a été prise en exemple pour montrer les tendances de chaque indice. Ces indices montrent tous une tendance significative : positive pour R1mm, R20mm et R99p, mais négative pour SDII. SDII tend à diminuer significativement entre 1950 et 2000, pourtant quand nous regardons dans le détail, on remarque une succession de tendances à l'échelle décennale (1950-70, 70-80, 80-2000, ***figure 56***). Ces variations sont cohérentes avec les évolutions détaillées de PCPTOT et R1mm. Le schéma explicatif des tendances observées de SDII est présenté sur la ***figure 57***. Ici, il a été choisi de parler de R20mm à la place de PCPTOT, simplement car ces indices sont presque parfaitement corrélés et que nous n'avons analysé et montré dans le détail que les valeurs associées à R20mm

Sur le schéma (figure 57), on remarque trois périodes : 1950-70, 1970-80 et 1980-2000. Par exemple, sur la première période, R20mm (PCPTOT) reste relativement stable alors que R1mm, le dénominateur, devient plus fort. Ainsi, SDII (PCPTOT/R1mm) diminue. Ainsi, SDII diminue car PCPTOT augmente moins que R1mm, c'est ce qui est remarqué en général.

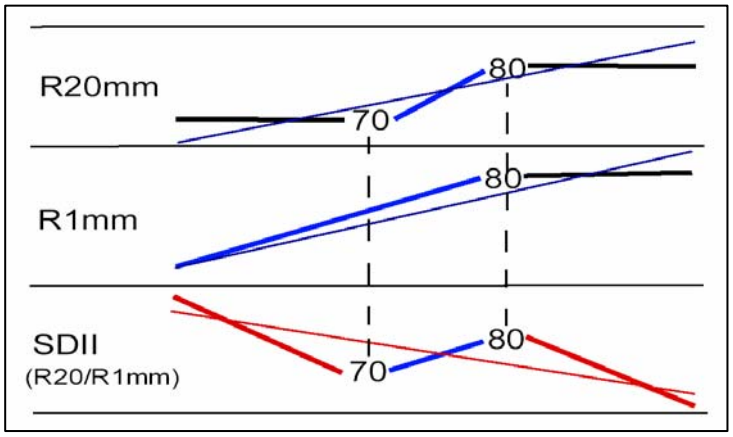


Figure 57: Explication des variations de SDII entre 1950 et 2000 à San Javier par les tendances observées de R20 et R1mm.

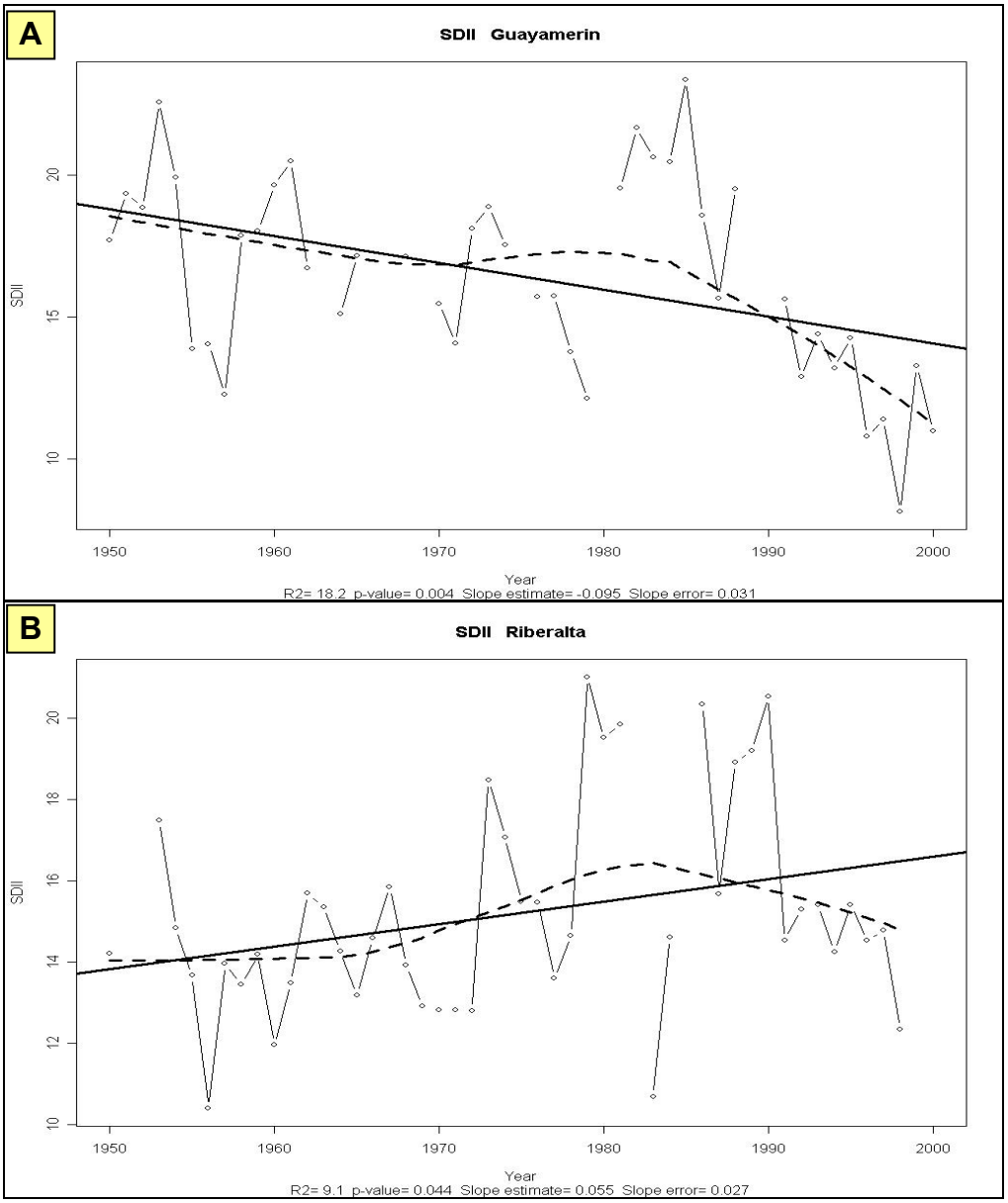


Figure 58: Variation annuelle et tendance linéaire entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice SDII sur des stations voisines : *Guayamerin* et *Riberalta*

Bien que les stations *Riberalta* et *Guayamerin* soient voisines (distance : 80Km, dans le nord de la plaine bolivienne), elles présentent pour SDII des tendances opposées entre 1950 et 2000. Les évolutions particulières observées pour SDII (***figure 58***) peuvent être expliquées de la même façon que pour San Javier (***figure 57***) :

- À *Guayamerin* (***figure 58A***) :

  - R20mm ne présente pas de tendance linéaire entre 1950 et 2000 (***figure 38C***). On y observe en fait deux sous-tendances distinctes : augmentation jusqu'en 1980 puis diminution.

  - R1mm (non montré) présente une tendance significative strictement positive.

  - Ainsi, SDII diminue mais faiblement jusque vers 1980 (augmentation des valeurs de R1 plus déterminante que celle de R20mm), puis diminue franchement après.

- À la station *Riberalta* (***figure 58B***), nous observons quelque chose de différent. Alors que les valeurs de R1mm ne présentent aucune tendance linéaire significative entre 1950 et 2000 (***figure 29***), SDII suit exactement les évolutions particulières à R20mm (non montré).

SDII présente des tendances significatives pour un grand nombre de stations. Son évolution dépend de celles de R1mm et PCPTOT (par l'intermédiaire de R20mm ici) sur le long terme, qui se trouve être des variables indépendantes. Ainsi un grand nombre de possibilités existent pour faire varier les tendances de l'intensité journalière des pluies.

Les valeurs de l'intensité journalière moyennées sur différentes périodes (1950-1969, 1970-1988, 1989-2000) sont présentées pour toutes les stations sur la ***figure 59***. Les périodes choisies correspondent à celles que l'on a observées (partie ***3.1.***) et elles sont aussi remarquées par Callède et al (2004) et Ronchail et al (2006).

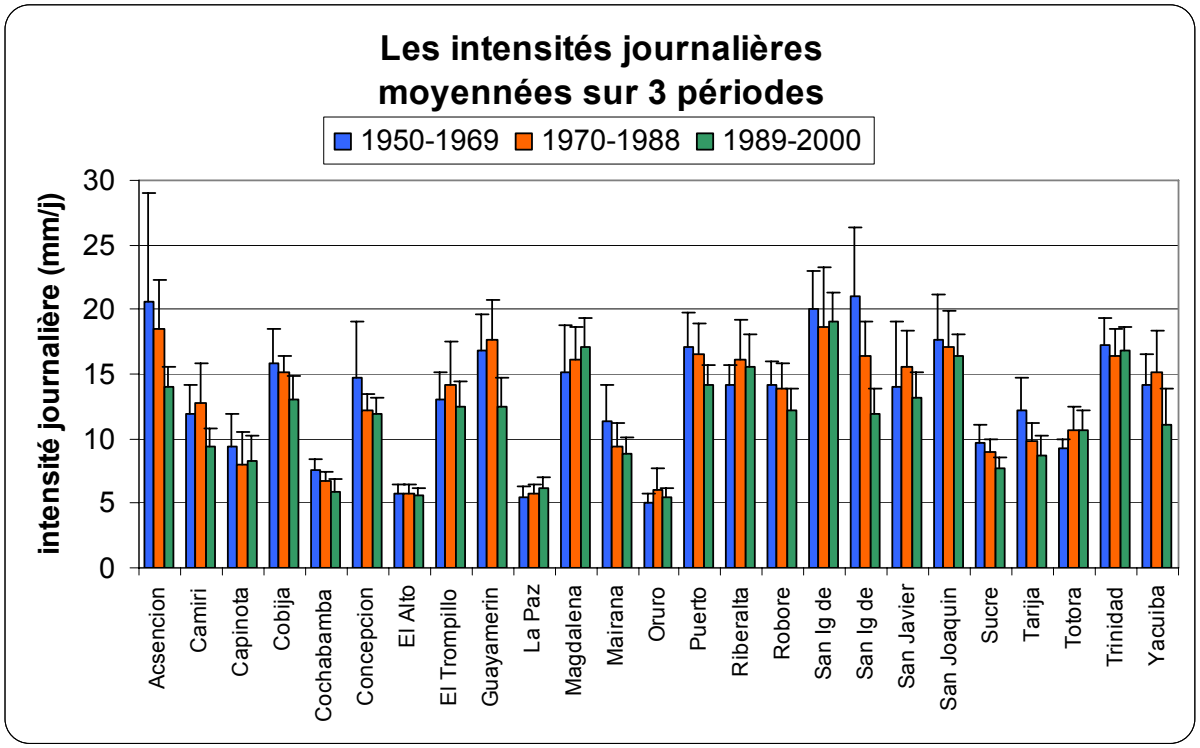


Figure 59: Comparaison entre les moyennes de l'intensité journalière obtenues sur différentes périodes pour toutes les stations

On observe qu'avant et après 1970, les moyennes de l'intensité journalière ont peu varié. Elles sont souvent plus fortes avant 1970, en cohérence avec les tendances négatives observées de cet indice dans le temps pour un grand nombre de stations. On ne remarque que deux stations présentant une très forte variation de l'intensité entre la première et la dernière période : *Ascencion* (plus de 5mm/j de différence) et *San Ignacio de Velasco* (second 'San Ig de' sur la ***figure 59***, varie de presque 10mm/j). Sur ces stations l'intensité journalière diminue de 1970 à 2000. Cela vient du fait qu'elles montrent une tendance linéaire négative très significative et un fort coefficient de détermination (***figure 55***).

Comme on l'a montré précédemment, un grand nombre de possibilités existent pour faire varier les tendances de SDII. De plus les tendances linéaires ne représentent pas toujours l'évolution dans le temps et l'espace de cet indice. C'est pourquoi l'analyse de la variabilité spatio-temporelle réalisée par des ACP s'impose.

3.2.3.2. La variabilité spatio-temporelle de SDII

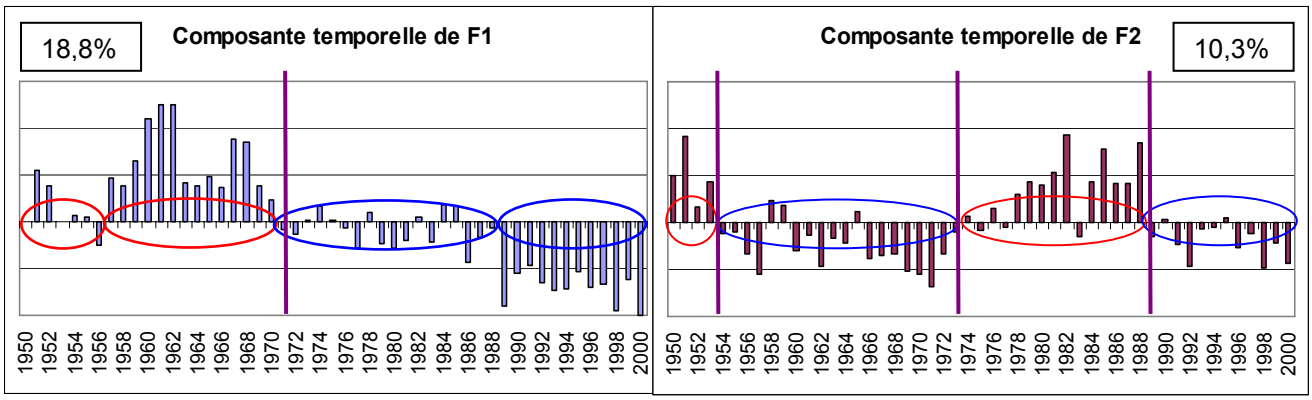


Figure 60: Coordonnées des individus de l'indice SDII entre 1950 et 2000 selon F1 et F2. Cerclées de rouges, les coordonnées supérieures à la normale. Cerclées de bleu, les coordonnées inférieures à la normale. Les pourcentages de variance associés à chaque axe sont notés en haut. La ligne mauve indique un changement de signe des anomalies.

Nous remarquons sur la ***figure 60*** des variabilités temporelles différentes, mais présentant similitudes au niveau des dates de changements, entre F1 et F2. Selon F1, on note que les valeurs de SDII sont positives avant 1970 (très fortement de 1956 à 1970) et qu'elles sont négatives après 1970 (particulièrement de 1989 à 2000). Sur F2 on passe d'anomalies positives à négatives sur des échelles de temps pluriannuelles à pluri décennales (1950-53, 1954-73, 1974-88 et 1989-2000).

Sur la ***figure 61***, on observe la variabilité spatiale déterminée par F1. Ce sont beaucoup de stations de la moitié sud de la Bolivie qui sont concernées, alors que ce sont des stations différentes qui contribuent fortement au mode F2 (excepté *Cochabamba*, au centre, bien décrite par les deux modes). Par F1, dans la moitié sud du pays, les pluies sont moins intenses à partir de 1970 et en particulier à partir de 1989.. Par F2, les stations concernées (***figure 62***) présentent une plus forte intensité entre 1974 et 1988.

Il est difficile de décrire ce qui se passe sur l'ensemble du pays à partir de ces deux principaux modes de variabilité. Cependant, pour toutes les stations contribuant à F1 et F2, durant la période 1989-2000, l'intensité journalière des pluies est faible.

Nous ne pouvons pas raccorder ce phénomène avec les évènements de forts débits de crue, car cet indice est moyenné sur l'année entière (voir partie ***4. Discussion***).

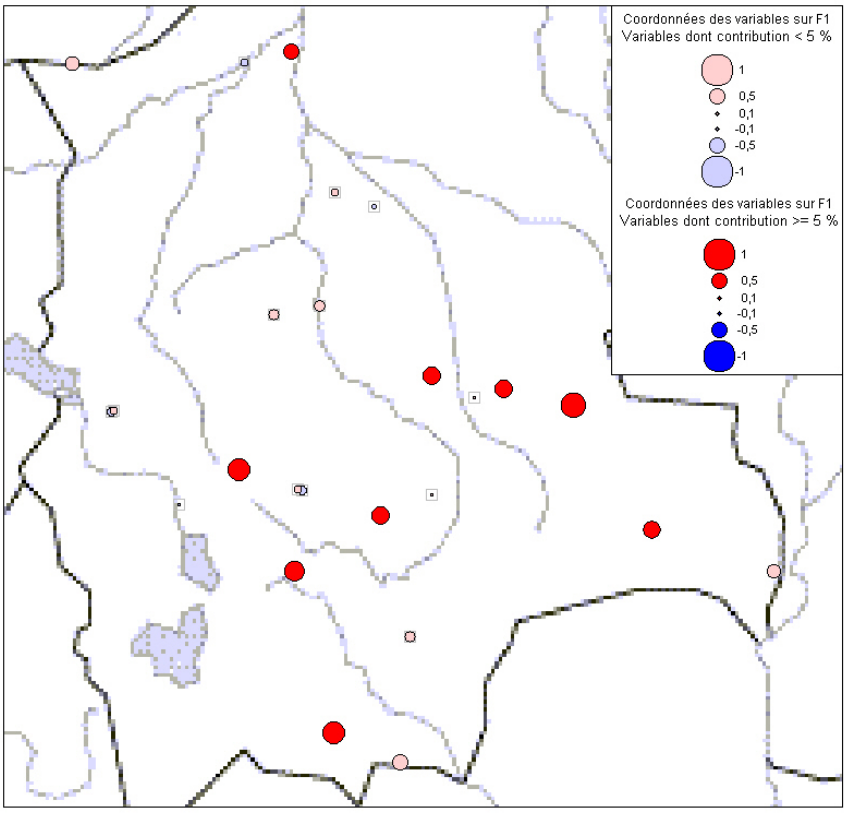


Figure 61: Variabilité spatiale de SDII décrite par F1

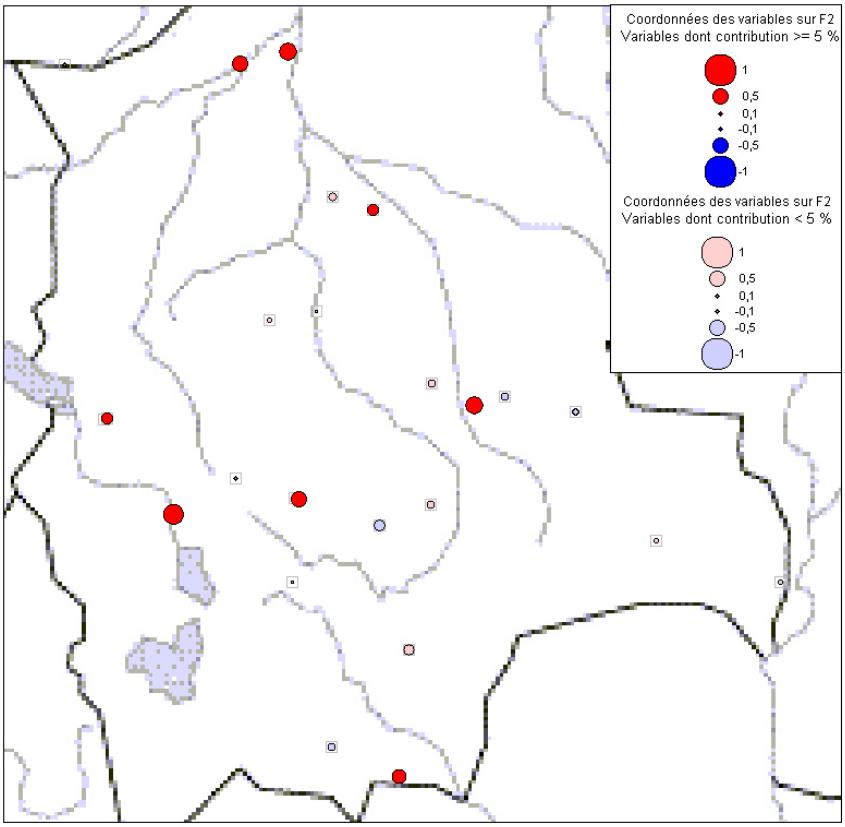


Figure 62: Variabilité spatiale de SDII décrite par F2

3.2.3.3. Analyse mensuelle de l'intensité journalière des pluies

Afin de pourvoir parler des crues, nous avons recalculé SDII au pas de temps mensuel. Nous pourrons alors voir quels mois présentent de fortes intensités. Nous regarderons les cycles moyens annuels (***figure 63***). Nous les montrons pour trois stations de plaine et trois stations localisées sur les reliefs.

Dans la plaine l'intensité des pluies est forte toute l'année, variant de 8 mm/jour à une vingtaine de mm/jour. Il est remarquable que cette intensité soit plus forte en novembre au début de la saison des pluies, peut-être parce que les orages sont plus violents quand la température est la plus élevée de l'année. Lors de la saison « sèche », quelques averses violentes liées aux perturbations extra-tropicales (fronts froids) donnent des averses assez intenses en juin, juillet et août.

Dans les Andes au contraire, la variabilité saisonnière de l'intensité des pluies est importante, plus cohérente avec les totaux mensuels. Les valeurs les plus fortes sont calculées au cœur de la saison des pluies, la période précédent la saison des pluies n'étant pas « surchauffée » comme elle l'est dans la plaine. On observe enfin nettement une progression de l'intensité des pluies du nord vers le sud, au fur et à mesure de l'augmentation de l'échauffement saisonnier ou simplement parce que l'altitude des stations montrées diminue vers le sud: 7,2 mm/jour en janvier à *La Paz*, 8,7 mm/jour à C*ochabamba* et 12,8 mm/jour à *Tarija*.

Un mois sépare le début de la saison des pluies (septembre) et le début de l'année hydrologique (octobre), du fait de la recharge souterraine. Ainsi, alors que les pluies sont les plus fortes en janvier, c'est en février ou en mars que la recharge souterraine est pleine et que les crues risquent plus vraisemblablement de se produire. C'est pourquoi, nous allons analyser la variabilité de SDII durant ces deux mois en procédant à de nouvelles ACP afin de vérifier si à la fin de l'été, quand les débits maximaux sont mesurés, l'intensité des pluies a augmenté.

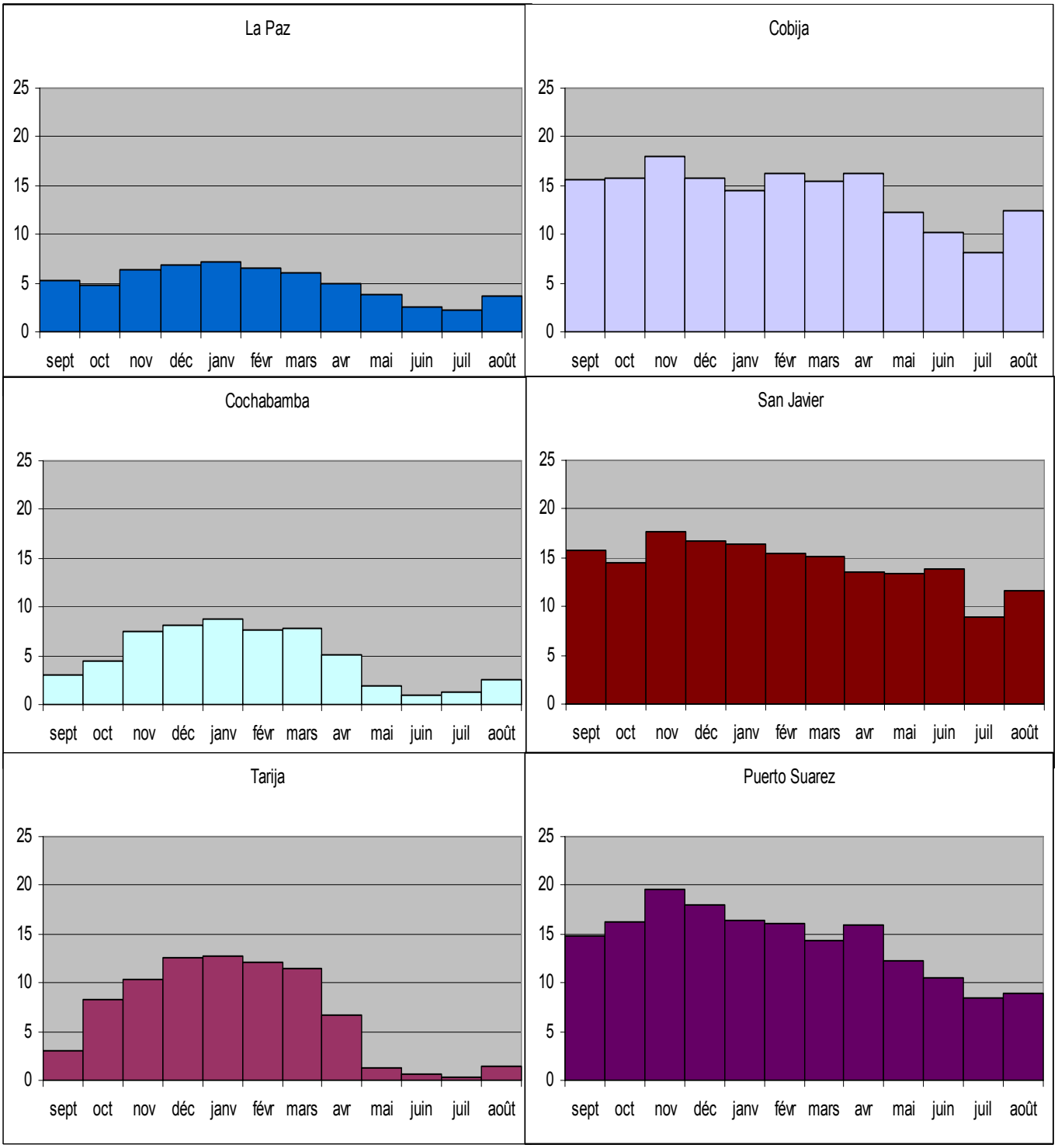


Figure 63 : Intensité journalière (en mm/jour) moyennée pour chaque mois au niveau de six stations : 3 de plaine et 3 sur les reliefs.

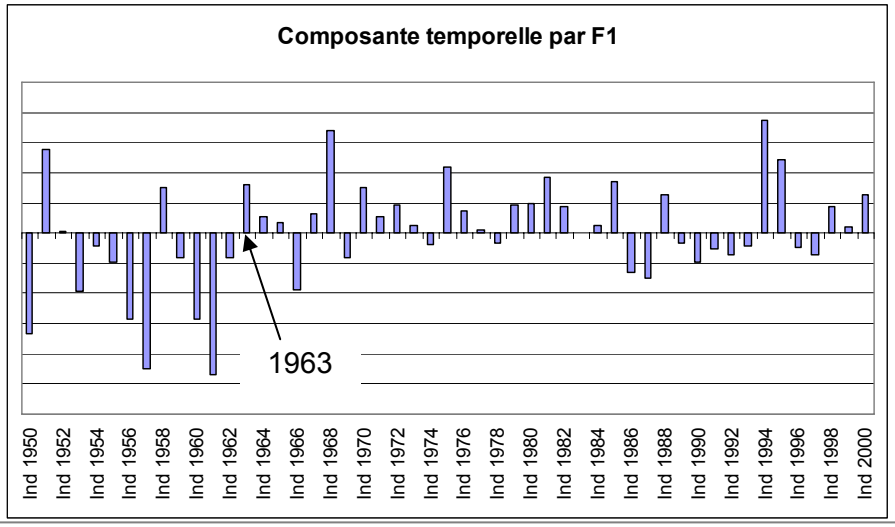


Figure 64: Coordonnées des individus de l'indice SDII moyenné sur les mois de février et mars selon F1

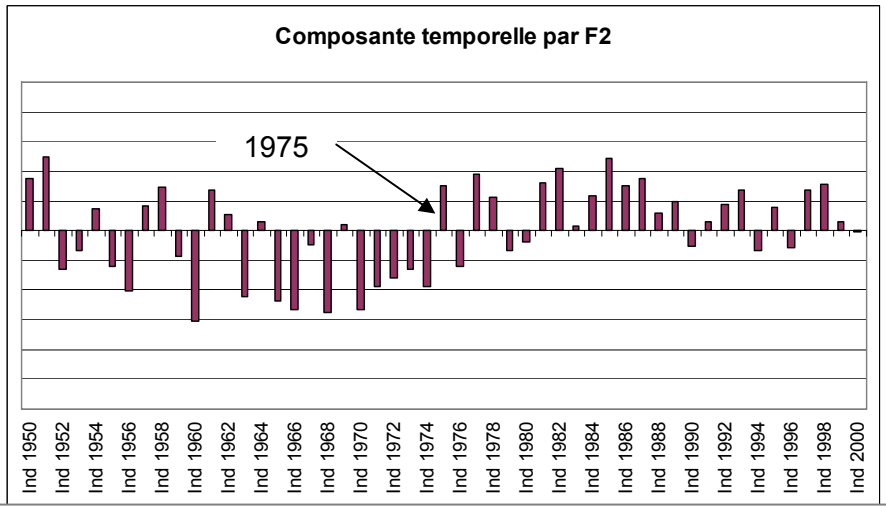


Figure 65: Coordonnées des individus de l'indice SDII moyenné sur les mois de février et mars selon F2

Les deux principaux modes de variation de l'intensité pour les mois de février et mars sont très variables inter annuellement. Sur le long terme, ils sont généralement plus souvent positifs après 1963 selon F1 et après 1975 selon F2 (***figures 64 et 65***).

12,1% de la variance totale est expliquée par le mode F1. Généralement il touche de façon opposée les stations de la plaine et des Andes (***figure 66***). Ce sont les stations andines qui après 1963 présentent alors plus souvent de plus fortes intensités durant les mois de février et de mars.

Le second mode exprime 9% de la variance totale. C'est en particulier le centre et le nord de la Bolivie qui sont touchées par ce mode (***figure 67***). De ce fait, ces stations présentent une plus forte intensité à partir du milieu des années 70.

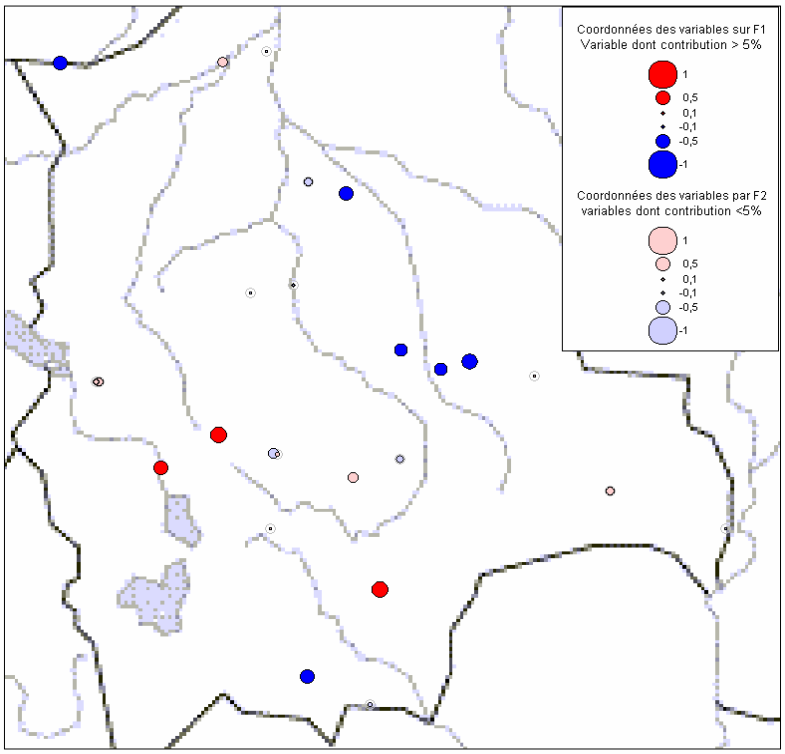


Figure 66: Variabilité spatiale de SDII moyenné pour les mois de février et mars sur la Bolivie selon F1

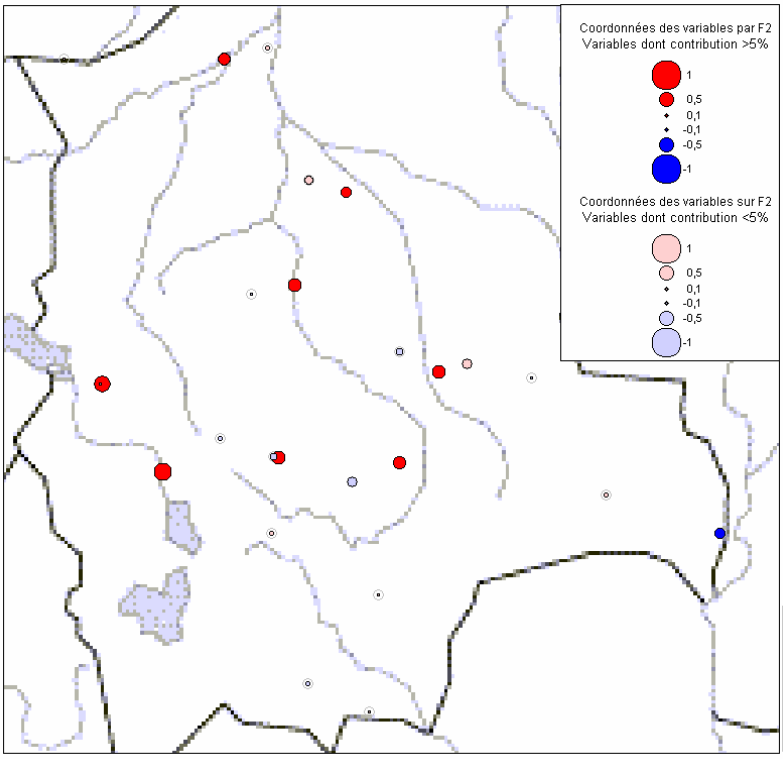


Figure 67: Variabilité spatiale de SDII moyenné pour les mois de février et mars sur la Bolivie selon F2

On remarque une augmentation de l'intensité des pluies dans les parties amont des bassins à partir de 1963 et plus généralement dans les bassins du centre et du nord (ceux qui donnent de l'eau à l'Amazonie) au milieu des années 1970. Cette augmentation des intensités de février-mars et celle des valeurs extrêmes au niveau annuel, contribuent probablement à expliquer l'augmentation des débits de crues.

4. CONCLUSION

Au cours de cette étude on a cherché à montrer comment varient les pluies, leurs fréquences, leurs extrêmes et leurs intensités grâce à une série d'indices pluviométriques calculés à partir des données quotidiennes de pluies sur la Bolivie entre 1950 et 2000. Nous avons bénéficié pour cela, grâce au projet HYBAM (Hydrogéodynamique du Bassin Amazonien, partenariat entre l'Institut de Recherche pour le Développement et le Servicio Nacional de Meteorologia y Hidrologia de Bolivie), d'une base de données des pluies quotidiennes en Bolivie inédite. Des indices pluviométriques n'avaient jusqu'alors jamais été calculés à partir de données quotidiennes en Bolivie. Pour replacer l'analyse des fréquences, des extrêmes et des intensités de pluie dans un contexte plus général, on s'est d'abord intéressé aux pluies annuelles en Bolivie, mais également dans le bassin amazonien afin de montrer comment leur variabilité en Bolivie s'intègre dans celle du bassin hydrographique principal de l'Amérique du sud tropicale.

Dans le bassin amazonien, le principal mode de variabilité des pluies est observé à l'échelle pluri-décennale : il change de signe en 1976 et oppose spatialement le sud (principalement la plaine bolivienne) et le nord du bassin. Il est lié à la variabilité à long terme de l'oscillation australe du Pacifique (ENSO) qui, en phase Nino, génère une inversion de la circulation de Walker entre l'est du Pacifique et le nord du bassin amazonien et des pluies moins abondantes dans le nord, et le contraire en phase Nina. L'inverse est observé dans le sud du bassin, avec plus de pluie en phase Nino par renforcement des perturbations extra-tropicales, et moins de pluie en phase Nina. Le second mode de variabilité se présente également à long terme avec deux coupures, au début des années 1970 et en 1989. Il touche de la même façon les stations pluviométriques placées sur la trajectoire du flux de mousson sud-américaine. Il est lié aux variations des températures de l'océan Atlantique nord et par conséquence à l'intensité du flux de mousson sud-américaine. Entre 1970 et 1989, les températures de surface de l'océan Atlantique nord sont plus froides, la pression de surface plus forte et de ce fait les alizés donnant lieu au flux de mousson sont renforcés. C'est l'inverse qui se produit avant et après cette période.

En recadrant l'étude sur la Bolivie, on observe que les pluies annuelles diminuent du nord au sud d'une part et vers les Andes d'autre part. Ceci s'explique par le fait que le flux de mousson gagne moins longtemps et plus aléatoirement le sud de la plaine et les Andes que le nord de la plaine. Le principal mode de variabilité des pluies annuelles est pluri décennal

et il concerne l'ensemble du pays. Il est équivalent au second mode de variabilité des pluies en Amazonie et indique que les pluies sont abondantes entre le début des années 70 et la fin des années 80 alors qu'elles sont plus faibles avant et après. Le second mode présente une variabilité à l'échelle interannuelle et oppose les stations des Andes à celles de la plaine dont les anomalies de pluies sont en général opposées pendant les deux phases de l'ENSO. Ce mode est, en effet, partiellement lié à la variabilité interannuelle de l'ENSO. Durant les évènements El Niño (La Nina), les stations de plaine (andines) reçoivent généralement plus de précipitations.

Entre 1950 et 2000, les principaux modes de variation qui se font ressentir au niveau des pluies annuelles de l'Amazonie (Bolivie incluse) semblent démontrer une forte implication des phénomènes ENSO et de la variabilité d'intensité du flux de la mousson sud-américaine. ENSO contribue particulièrement à la variabilité des totaux de pluie à grande échelle (bassin amazonien), tandis que l'intensité du flux de mousson se fait sentir plus régionalement (sud du bassin amazonien brésilien et Bolivie).

Onze indices mesurant la fréquence, l'intensité et les extrêmes de pluies ont été calculés selon une méthodologie et des outils mis au point par Haylock et al. (2006) pour l'ensemble de l'Amérique du Sud. La mise en forme des données très abondantes et l'adaptation des outils afin de respecter le cycle hydrologique a nécessité néanmoins de longues heures de calculs. De nombreux résultats ont été mis en valeur au cours de cette étude.

Les pluies sont plus fréquentes dans le nord de la plaine et les Yungas (vallées humides au nord). Cette fréquence diminue vers le sud de la plaine (de 126 jours à 70 jours de pluies par an) comme les totaux annuels. Sur les reliefs, il se produit quelque chose de remarquable : les pluies sont peu fréquentes dans les vallées jusqu'à environ 1800m (moins de 70 jours de pluie par an), puis au-delà de cette altitude elles deviennent plus fréquentes, notamment sur le nord de l'Altiplano (une centaine de jours par an). Les stations de *La Paz* et *El Alto* ont des pluies fréquentes mais ce ne sont pratiquement que des pluies faibles (< 20mm). La fréquence des pluies fortes (≥ 20mm) se distribue de la même façon que le total des précipitations : elles diminuent du nord au sud et selon l'altitude. Ainsi, même si les fréquences de pluies totales augmentent à partir de 1800m, les pluies très fortes sont rares (2 à 4 jours au-delà de 3000m). Les totaux annuels de pluies sont très fortement liés à la fréquence des pluies fortes. Les pluies extrêmes, rares car dépassées seulement dans 1% des cas, varient selon le même schéma spatial, et valent de 70 mm dans le nord de la plaine à une vingtaine de millimètres dans le nord de l'Altiplano.

Les indices pluviométriques varient principalement, sur le long terme, de la même façon que les totaux annuels : les fréquences de pluie et les pluies fortes à extrêmes sont plus importantes entre le début des années 1970 et la fin des années 80, parfois même jusqu'à la fin de la période étudiée (R99p). De plus l'analyse des séquences (sèches et humides) est cohérente avec ces résultats : dans le courant des années 70, les séquences pluvieuses deviennent plus longues (sur l'ensemble : 6 jours avant 1970 et 8 jours après 1970) et les séquences sèches tendent à être plus courtes (sur l'ensemble : 60 jours avant 1970 et 52 jours après). Cela apparaît dans le centre de la plaine en particulier, mais parfois aussi dans l'ensemble des stations (PCPTOT, R1mm, R20mm) ou dans une région qui va du centre de la plaine vers les Andes (RX1day, CWD).

À cette variabilité à long terme s'ajoute une variabilité interannuelle liée à l'ENSO, à l'image de ce qui est observé pour les pluies annuelles. Elle oppose les Andes et la plaine. Ceci est net pour la fréquence des pluies faibles à fortes mais beaucoup moins clair pour les indices de pluies extrêmes.

Quelques stations de vallées andines en particulier (Cochabamba, Sucre) ont des comportements particuliers, avec diminution après 1970 des pluies fortes à extrêmes en particulier. On se demande si des facteurs locaux (en particulier la surexploitation des eaux du lac - « cocha » en quechua- de vallée de Cochabamba, abritée, mal « ouverte » au flux de mousson, donc fortement dépendante de ce lac) ne pourrait expliquer ces phénomènes.

Dans le centre de la plaine en particulier, les valeurs extrêmes de pluie sont plus fortes en 2000 qu'au début de la période d'étude (cf. RX1day) et elles sont plus fréquentes (cf. R99p et RX5day). Ce phénomène, déterminé par le premier mode de variation, apparaît clairement vers le milieu des années 70. Les indices extrêmes présentent également, comme second mode et pour des stations éparpillées, une variabilité interannuelle qui ne correspond pas à la variabilité ENSO et qui est variable selon les indices.Les valeurs extrêmes sont très variables d'une année sur l'autre sur toute la durée de l'étude, alors que leur fréquence ne devient très fortement variable qu'à partir de 1976, dans des stations localisées un peu dans toutes les zones de Bolivie. On peut penser qu'à partir de 1976, il y a de plus grandes chances que pour certaines années les extrêmes présentent plusieurs fois des valeurs très fortes, qu'entre 1950 et 2000. Cette association particulière expliquerait facilement la grande variabilité des débits de même que l'augmentation des débits de crue qui sont observées à partir des années 1970 dans le bassin amazonien.

L'intensité journalière moyenne des pluies, qui dépend à la fois des totaux annuels et de la fréquence des pluies est maximale dans le centre-nord de la plaine, et faible dans les Andes. Son analyse révèle qu'elle traduit mal les évènements brusques (R99p) du fait qu'elle est moyennée sur l'année. En effet au cours d'une année, et même d'un mois (et en particulier les plus pluvieux de l'année), les valeurs de pluies varient beaucoup. L'analyse à un pas de temps plus court - sur les deux mois précédents les grosses crues - révèle que l'intensité journalière est en fait devenue plus forte, d'abord à partir de 1963 sur les parties amont des cours d'eau amazonien, puis (à partir de 1970) directement sur la plaine amazonienne de la Bolivie. Il faudrait procéder à son calcul sur des pas de temps beaucoup plus court : moins d'une dizaine de jours (CWD) afin de vérifier s'ils correspondent directement aux évènements observés de crue.

Les résultats des ACP sont en accord avec les calculs des tendances mais donnent des informations plus précises sur les évolutions au cours du temps. En effet, les tendances linéaires traduisent mal la véritable évolution des pluies sur le long terme. En ce sens notre travail constitue un progrès par rapport à celui de Haylock et al (2006) qui ne tenait compte que des tendances. Relevons aussi que nos résultats sont cohérents avec ceux de ces auteurs, en particulier avec ce qu'ils décrivent pour les stations voisines du nord de l'Argentine et du Paraguay.

Les résultats sur les pluies totales et leurs fréquences sont cohérents et assez bien structurés dans le temps et dans l'espace ; au contraire, les valeurs extrêmes, qui sont probablement liées à la convection locale, présentent une moins bonne structuration spatiale. Cela se remarque aussi dans les pourcentages de variances faibles (autour de 10%) résumés par les axes F1 et F2 des ACP sur les pluies extrêmes. De façon plus générale, on ne « résume » pas très bien les pluies et leurs indices avec les ACP, peut-être parce qu'on a affaire à de grands espaces, très contrastés physiquement, des espaces « charnières » entre plaine et Andes, entre latitudes inter et extratropicales. Peut-être faudrait-il analyser les différentes zones spécifiquement ?

Ce travail correspond finalement à une étude préliminaire qui pourrait servir de base à de nouvelles analyses, particulièrement à des pas de temps plus courts que l'année. Néanmoins, il apporte de nombreuses informations là où jusqu'alors il n'y en avait aucune.

BIBLIOGRAPHIE

Aceituno, P., 1988: On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part 1: Surface climate. Monthly Weather Review, 116, 505-524.

Aceituno, P., Montecinos, A., 1993. Circulation anomalies associated with dry and wet periods in the South American Altiplano. Proc. Fourth Int. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology, Hobart, Australia. Am. Meteor. Soc., pp.330^331.

Beltrando, G., 2004: Les climats: processus, variabilité et risques. Armand Colin, Collection U, Géographie, 267 pages.

Brunet-Moret Y. 1979. Homogénéisation des précipitations. Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie 16: 3-4.

Callède et al. 2004: Evolution du débit de l'Amazone à Obidos de 1903 à 1999. Hydrological Sciences Journal, 49 (1), 85-97.

Callède J., J. Ronchail et J.L.. Guyot 2007. Déboisement amazonien: son influence sur le débit de l'Amazone à Obidos (Brésil). Accepté par La Revue des Sciences de l'Eau.

Carvalho, L. M. V. et al., 2004: The South Atlantic convergence zone: Intensity, from, persistence, and relationships with interseasonal to interannual activity and extreme rainfall. Journal of Climate, 17, 88-108.

Chapel, A. et al. 1996: Océans et Atmosphère, science de l'univers. Hachette, Collection Synapses, 159 pages.

Collischonn et al 2001: Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change. Journal of Hydrology 245. p 218-238.

D'Almeida C, Vörösmarty CJ, Hurtt GC, Marengo JA, Dingman SL, Keim BD. 2007. The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. International Journal of Climatology 27: 633 – 647.

Enfield, D.B., A.M. Mestas-Nunez, and P.J. Trimble, 2001: The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S., Geophys. Res. Lett., 28: 2077-2080

Espinoza Villar J. C. et al. 2006: Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador).

Espinoza Villar J.C. et al. 2007: Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin.

Garreaud R. et al., 2003: The climate of the Altiplano: observed currents conditions and mechanisms of the past changes. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 194, 5-22.

Genta J, Perez-Iribarren G, Mechoso G. 1998. A recent increasing trend in streamflow of rivers in southern South America. Journal of Climate 11: 2858 – 2862.

Grimm, A. M. et al., 2000: climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. Journal of Climate, 13, 35-58.

Haylock M. R., et al., 2006: Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. Journal of Climate, 19, 1490-1512.

Hiez G. 1977. L'homogénéité des donnes pluviométriques. Cahier ORSTOM, série Hydrologie 14: 129-172.

Intergovernmental Panel on Climate Change, février 2007: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report, Summary for Policymakers, 18 pages.

Lau K.-M. et al., 2006: Detecting trends in tropical rainfall characteristics, 1979–2003. International Journal of Climatology, (in press).

LeTourneau 2004: Jusqu'au bout de la forêt. Causes et mécanismes de la déforestation en Amazonie brésileinne. M@ppemonde 75. http://mappemonde.mgm.fr/num3/articles/art04307.html

Liebmann B. et al. 2001: Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon basin. Journal of Climate, 14, 4308-4318.

Marengo J. A., 2004: Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. Theor. Appl. Climatolo, 78, 79-96.

Marie M., 2007: Conséquences sociales et économiques des fortes crues et bas étiages en Amazonie péruvienne.

Olga C. Penalba et al., 2006: Temporal variability in the length of no-rain spells in Argentina. INPE, 333-339.

R Development Core Team (2006). R version 2.4.1. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing,Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL http://www.R-project.org.

Robertson AW, Mechoso CR. 1998. Interanual an decadal cycles in river flow of southeastern of South America. Journal of Climate 11: 2570 – 2581.

Ronchail J. 1989. Advections Polaires en Bolivie: mise en évidence et caractérisation des effets climatiques. Hydrologye Continentale 4 : 49 – 56.

Ronchail J. 1996. Variabilité pluridécénale des précipitations en Bolivie. Essai de mise en relation avec les températures de surface océaniques de l'Atlantique extra-tropical. Publ. Assoc. Intern. Climat. 9: 504-511.

Ronchail J., 1998: Variabilité pluviométrique en Bolivie lors des phases extrêmes de l'oscillation australe du Pacifique (1950-1993). Bull. Inst. Fr. études andines, 27 (3), 687-698.

Ronchail J, Cochonneau G, Molinier M, Guyot JL, Goretti de Miranda Chaves A, Guimarães V, de Oliveira E. 2002. Rainfall variability in the Amazon Basin and SSTs in the tropical Pacific and Atlantic oceans. International Journal of Climatology 22: 1663-1686.

Ronchail et al. 2005: Inundations in the Mamore´ basin (south-western Amazon—Bolivia) and sea-surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans

Ronchail J. et al. 2006: Variabilité à long terme des pluies en Amérique du Sud tropicale. Les risques liés aux temps et au climat, actes du XIXe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Epernay.

Salati E., Marquez J, Molion LC. 1978. Origem e distribuiçao das chuvas na Amazônia. Interciencia 3: 200-205

Sparovek G. et al., 2007: short communication, computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil International Journal of Climatology, 27, 257–266.

Tapley, T.D. et Waylen P.R., 1990. Spatial variability of annual precipitation and ENSO events in western Peru. Jour. des Scien. Hydrol., 35, 429-446.

Trenberth KE, Hurrell JW. 1994. Decadal atmosphere – ocean variations in the Pacific. Climate Dynamics 9: 303 – 319.

Vauchel P. 2007. Hydraccess: Logiciel de gestion et traitement de données hydro-météorologiques, version 3.1. Téléchargeable sur www.mpl.ird.fr/hybam.

Vera C. et al., 2006: Toward a unified view of the American monsoon systems. Journal of Climate, 19, 4977-4995.

Xuelin Zhang et Feng Yang, 2004. RClimDex, logiciel de calcul d'indices climatiques, version1.0. http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RClimDex/rclimdex.r.

Zhou J, Lau KM. 2001: Principal modes of interannual and decadal variability of summer rainfall over South America. International journal of climatology 21: 1623 – 1644.

Liste des figures

n°	Titre	page
1	Carte de la répartition des stations utilisées pour l'étude de Haylock et al. 2006	4
2	Les reliefs de la Bolivie (explorebolivia.com)	6
3	La Bolivie dans les bassins de l'Amazone et de La Plata. Stations présentant des augmentations de débits dans ces bassins. Source : Transboundary Freshwater Dispute Database (TFDD)	8
4	Total annuel des précipitations (A) et cycles moyens annuels des pluies (B) sur l'ensemble du bassin amazonien (1964-2003). Source : J. C. Espinoza Villar 2006 et 2007	9
5	Vents et géopotentiel à 850 hPa. Trajet du flux de mousson. Source : données NCEP-NOAA, Ronchail 2002.	10
6	Les totaux annuels moyens de pluies entre 1950 et 2000 pour 22 stations boliviennes. En dessous, les cycles moyens annuels sont présentés pour 6 stations (3 de plaine à droite et 3 sur les Andes à gauche).	11
7	42 stations pluviométriques pour lesquelles nous possédons les valeurs annuelles entre 1950 et 2000.	12
8	Localisations des 27 stations boliviennes répondants aux critères du tri de la base de données 'Bolivie' (données : de 1950 à 2000 au moins, moins de 4,1% de lacunes et ayant satisfait au test d'homogénéité).	16
9	Les moyennes annuelles de pluies calculées entre 1950 et 2000 pour les 42 stations pluviométriques amazoniennes.	21
10	Valeurs propres et pourcentages cumulés de tous les axes factoriels expliquant la variabilité des pluies au dessus de l'Amazonie	22
11	Coordonnées des individus sur l'axe factoriel 1 résultant d'une ACP sur les totaux de pluies en Amazonie entre 1950 et 2000.	23
12	Variabilité spatiale des pluies en Amazonie selon l'axe factoriel F1. En rouge et bleu apparaissent les stations qui contribuent à plus de 5% à la formation de l'axe ; en rose et bleu pale, les stations qui contribuent à moins de 5%	23
13	Coordonnées des individus sur l'axe factoriel 2 résultant d'une ACP sur les totaux de pluies en Amazonie entre 1950 et 2000.	24
14	Variabilité spatiale des pluies en Amazonie selon l'axe factoriel F1. En rouge et bleu apparaissent les stations qui contribuent à plus de 5% à la formation de l'axe ; en rose et bleu pale, les stations qui contribuent à moins de 5%	25
15	Valeurs annuelles (sur l'année calendaire) du MEI (Multivariate ENSO Index) entre 1950 et 2000	26
16	Lien entre les coordonnées des individus sur F1 et le MEI entre 1950 et 2000	26
17	Stations pour lesquelles des augmentations de débits ont été enregistrées au début des années 1970	28
18	Atlantic Multidecadal Index donnant l'évolution des anomalies de températures de surface de l'Atlantique entre 0 et 70°N entre 1956 et 2005.	29

19	Extrait de Garreaud et al 2003. Représentation schématique de la circulation dans les Andes centrales. Masses d'air passant au-dessus des Andes, pour (a) des épisodes pluvieux et (b) des épisodes secs. Les flèches épaisses indiquent le sens de la circulation des niveaux supérieurs ; c'est l'écoulement à grande échelle. Les courbes pleines (à tiret) représentent le transport d'air humide (sec) par la circulation régionale au-dessus des pentes andines. Les flèches verticales minces représentent l'affaissement à grande échelle au-dessus du Pacifique subtropical qui maintient une forte inversion thermique (en trait plein).	30
20	Valeurs propres et pourcentages de variance cumulés de tous les axes factoriels expliquant la variabilité des pluies au dessus de la Bolivie.	31
21	Coordonnées des individus entre 1950 et 2000 des pluies annuelles en Bolivie selon F1	32
22	Variabilité spatiale des pluies sur la Bolivie déterminée par l'axe factoriel 1	33
23	Coordonnées des individus entre 1950 et 2000 des pluies en Bolivie selon F2	34
24	Variabilité spatiale des pluies sur la Bolivie déterminée par l'axe factoriel F2	35
25	Analyse de la corrélation linéaire entre les coordonnées des individus sur F2 et le MEI entre 1950 et 2000	35
26	Les totaux annuels des précipitations (en mm) associé au nombre moyen (annuel) de jours de pluies obtenus entre 1950 et 2000 pour les 25 stations boliviennes.	39
27	Analyse de corrélation linéaire entre les totaux annuels de pluies et les altitudes.	40
28	Analyse de corrélation des valeurs moyennes de R1mm/altitude, pour les stations > 470m d'altitude	40
29	Signes et coefficients de détermination associés aux tendances de l'indice R1mm. Les cercles transparents indiquent une absence de tendance significative	41
30	Variation annuelle et tendance entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R1mm (en jours) au niveau de Riberalta (plaine-nord)	42
31	Variation annuelle et tendance entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R1mm au niveau de San Javier (plaine-centre)	42
32	Variation annuelle et tendance entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R1mm au niveau de Puerto Suarez (plaine-sud)	43
33	Valeurs moyennes de R1mm associées à celles de R20mm, obtenues entre 1950 et 2000 pour les 25 stations boliviennes	44
34	Analyse de corrélation entre les valeurs moyennes de R20mm et la latitude. Cerclées de rouge : les stations < 800 m et cerclées de bleu : les stations ≥ 800m.	45
35	Analyse de corrélation entre les valeurs moyennes de R20mm et la longitude. Cerclées de rouge : les stations < 800 m et cerclées de bleu : les stations ≥ 800m.	45
36	Analyse de corrélation entre les moyennes de R20mm (en jours) et les moyennes de PCPTOT (en mm).	46
37	Signe et coefficient de détermination des tendances de l'indice R20mm entre 1950 et 2000, pour les stations montrant des tendances significatives	47
38	Variation annuelle et tendance entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R20mm (en jours) sur 3 stations : *Cochabamba, San Javier et Guayamerin*	48
39	Valeurs moyennes de l'indice R99p (en mm) entre 1950 et 2000. Valeurs des 99ièmes (en mm) percentiles à atteindre pour que R99p soit différent de zéro.	49
40	Signe et coefficient de détermination des tendances de l'indice R99p entre 1950 et 2000, pour les stations montrant des tendances significatives	50

41	Variation annuelle et tendance linéaire (ligne pleine) et évolution non linéaire (ligne tiretée) entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R99p sur les stations *Sucre* et *San Javier*	51
42	Variation annuelle et tendance linéaire (ligne pleine) et évolution non linéaire (ligne tiretée) entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice R99p sur les stations *Cobija* et *Yacuiba*	52
43	Signe et coefficients de détermination des tendances significatives entre 1950 et 2000 des indices PCPTOT, R10mm, RX1day, CWD, RX5day et CDD. La taille est en relation avec la valeur du coefficient de corrélation linéaire La couleur indique une augmentation (bleu) ou une diminution (rouge) de l'eau.	53
44	Coordonnées des individus entre 1950 et 2000 de R10mm selon F1 et F2.	59
45	Variabilité spatiale de l'indice R10mm sur la Bolivie. La carte de gauche correspond à la variabilité selon F1 et la carte au-dessus correspond à celle selon F2.	59
46	Coordonnées des individus de R99p entre 1950 et 2000 selon F1 et F2.	60
47	Variabilité spatiale de l'indice R99p sur la Bolivie. La carte de gauche correspond à la variabilité selon F1 et la carte au dessus correspond à celle selon F2.	61
48	Coordonnées des individus de RX1day entre 1950 et 2000 selon F1 et F2	62
49	Variabilité spatiale de l'indice RX1day sur la Bolivie. La carte de gauche correspond à la variabilité selon F1 et la carte au dessus correspond à celle selon F2.	63
50	Coordonnées des individus de l'indice CWD entre 1950 et 2000 selon F1 et F2	63
51	Variabilité spatiale de l'indice CWD en Bolivie. La carte de gauche correspond à la variabilité selon F1 et la carte au-dessus correspond à celle selon F2.	64
52	Coordonnées des individus de CDD entre 1950 et 2000 selon F1 et F2.	65
53	Variabilité spatiale de l'indice CDD sur la Bolivie. La carte de gauche correspond à la variabilité selon F1 et la carte au-dessus correspond à celle selon F2.	66
54	Valeurs moyennes de PCPTOT associées à celles de SDII, obtenues entre 1950 et 2000 pour les 25 stations boliviennes	68
55	Signe et coefficient de détermination des tendances linéaires significatives de l'indice SDII entre 1950 et 2000	69
56	Variation annuelle et tendance entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice SDII sur la station *San Javier*	70
57	Explication des variations de SDII entre 1950 et 2000 à San Javier par les tendances observées de R20 et R1mm.	71
58	Variation annuelle et tendance linéaire entre 1950 et 2000 des valeurs de l'indice SDII sur des stations voisines : *Guayamerin* et *Riberalta*	71
59	Comparaison entre les moyennes de l'intensité journalière obtenues sur différentes périodes pour toutes les stations	73
60	Coordonnées des individus de l'indice SDII entre 1950 et 2000 selon F1 et F2. Cerclées de rouges, les coordonnées supérieures à la normale. Cerclées de bleu, les coordonnées inférieures à la normale. Les pourcentages de variance associés à chaque axe sont notés en haut. La ligne mauve indique un changement de signe des anomalies.	74
61	Variabilité spatiale de SDII décrite par F1	75
62	Variabilité spatiale de SDII décrite par F2	75

63	Intensité journalière (en mm/jour) moyennée pour chaque mois au niveau de six stations : 3 de plaine et 3 sur les reliefs.	77
64	Coordonnées des individus de l'indice SDII moyenné sur les mois de février et mars selon F1	78
65	Coordonnées des individus de l'indice SDII moyenné sur les mois de février et mars selon F2	78
66	Variabilité spatiale de SDII moyenné pour les mois de février et mars sur la Bolivie selon F1	79
67	Variabilité spatiale de SDII moyenné pour les mois de février et mars sur la Bolivie selon F2	79

Liste des tableaux

n°	Titre	page
1	Superficies déboisées, de 1976 à 2003 sur le bassin amazonien limité à Óbidos. La colonne "Forêt (1976)" correspond aux résultats de l'analyse de la Carte UNESCO. Source : Callède et al. 2007	7
2	Coordonnées spatiales (latitudes, longitudes et altitudes) des stations retenues pour l'étude des pluies en Bolivie	17
3	Les indices pluviométriques calculés par le programme RClimDex, leurs définitions et unités. RR correspond à 'Rainfall Rate' (total de précipitation). Les 'Wet-days' (jours pluvieux) ont un RR ≥ 1 mm. Tous les indices sont calculés annuellement de septembre à août entre 1950 et 2000.	18
4	Pourcentages de variance et variances cumulées des axes factoriels F1 et F2 pour chaque indice	56
5	Coefficients de corrélation de Pearson entre coordonnées temporelles sur les axes F1. Pour un degré de liberté de 49 (ddl= 51années-2), la significativité, pour un risque d'erreur de 5%, se limite à 0,27	57
6	Coefficients de corrélation de Pearson entre coordonnées temporelles sur les axes F2. Pour un degré de liberté de 49 (ddl= 51années-2), la significativité, pour un risque d'erreur de 5%, se limite à 0,27	57

Liste des annexes

n°	Titre	page
1	Utilisation de RClimDex	92
2	Valeurs du MEI	93
3	Résultats obtenus par RClimDex	94
4	Graphiques de l'indice PCPTOT, pour 6 stations différentes, fournis par le programme RClimDex	98
5	Graphiques de l'indice R1mm, pour 6 stations différentes, fournis par le programme RClimDex	99

Annexe 1 : Utilisation du programme RClimDex

Pour réaliser ces calculs sur le logiciel R, grâce au programme associé RClimDex, il faudra que les données dans les stations triées (entre 1960 et 2000, satisfaisant le test d'homogénéité MVR et pour des lacunes < 4.11%) soient préalablement structurées. La base de données sera structurée sur le logiciel Excel d'une façon particulière :

La **base de données** (***tableau***) doit contenir :

- La date (année/mois/jour), représentée par des nombres, pour chaque jour. Cette information se place sur 3 colonnes.
- Les valeurs de pluies journalières (en mm). Les valeurs doivent correspondre à des nombres réels nuls ou positifs, sans décimales. Il faut remplacer toutes les valeurs manquantes par « '-99.9 ».
- Les valeurs des températures quotidiennes minimales et maximales. Il faut remplacer toutes les valeurs manquantes par « '-99.9 » (tableau suivant).

Une fois la base de données structurée, il faut l'enregistrer en format Texte (séparateur : tabulation) (*.txt) qui crée un espace entre chaque colonne permettant la lecture par R.

1960	12	27	'-99.9	'-99.9	'-99.9
1960	12	28	'-99.9	'-99.9	'-99.9
1960	12	29	23	'-99.9	'-99.9
1960	12	30	12	'-99.9	'-99.9
1960	12	31	10	'-99.9	'-99.9
1961	1	1	'-99.9	'-99.9	'-99.9
1961	1	2	5	'-99.9	'-99.9
1961	1	3	2	'-99.9	'-99.9
1961	1	4	0	'-99.9	'-99.9
1961	1	5	0	'-99.9	'-99.9
1961	1	6	26	'-99.9	'-99.9
1961	1	7	53	'-99.9	'-99.9

Tableau: Exemple de structure de la base de données sur Excel permettant le calcul des indices climatiques

Dans la console R (qui reçoit les instructions '>'), il suffit d'appeler le programme RClimDex : > rclimdex.r.

Remarque : si le fichier .txt correspondant au programme RClimDex n'est pas placé au bon endroit, un message d'erreur apparaît dans la console R (erreur : objet 'rclimdex.r' non trouvé) et il faudra redéfinir sa source : dans RGui : Fichier/Sourcer du code R...

Une fenêtre RClimDex est apparue à l'écran. Elle permet :

- Le chargement d'une base de données
- De lancer le calcul des indices

Annexe 2 : Valeurs du MEI (Multivariate ENSO Index)

YEAR	janv.	févr.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.
1950										-0,424	-1,173	-1,25
1951	-1,054	-1,201	-1,242	-0,511	-0,258	0,366	0,742	0,85	0,789	0,726	0,701	0,463
1952	0,421	0,144	0,113	0,243	-0,302	-0,675	-0,197	-0,151	0,329	0,313	-0,338	-0,106
1953	0,05	0,405	0,245	0,696	0,825	0,228	0,432	0,254	0,545	0,103	0,071	0,316
1954	-0,012	-0,047	0,075	-0,656	-1,488	-1,541	-1,414	-1,437	-1,189	-1,369	-1,1	-1,116
1955	-0,751	-0,675	-1,219	-1,666	-1,648	-2,256	-1,894	-2,001	-1,798	-1,778	-1,865	-1,87
1956	-1,435	-1,309	-1,383	-1,16	-1,355	-1,512	-1,205	-1,131	-1,359	-1,48	-1,083	-1,052
1957	-0,986	-0,436	0,087	0,388	0,886	0,755	0,958	1,104	1,138	1,091	1,106	1,188
1958	1,472	1,455	1,3	0,887	0,745	0,877	0,666	0,37	0,075	0,084	0,417	0,687
1959	0,518	0,785	0,473	0,152	0,018	-0,017	-0,21	0,065	-0,023	-0,11	-0,181	-0,255
1960	-0,285	-0,248	-0,083	-0,032	-0,345	-0,264	-0,315	-0,25	-0,515	-0,385	-0,339	-0,438
1961	-0,216	-0,236	-0,016	0,043	-0,286	-0,137	-0,262	-0,343	-0,351	-0,566	-0,389	-0,64
1962	-1,08	-1	-0,785	-1,044	-0,916	-0,817	-0,791	-0,541	-0,516	-0,671	-0,671	-0,524
1963	-0,771	-0,906	-0,684	-0,784	-0,434	-0,081	0,372	0,651	0,744	0,872	0,942	0,71
1964	0,866	0,503	-0,325	-0,663	-1,277	-1,122	-1,379	-1,542	-1,299	-1,204	-1,273	-0,952
1965	-0,562	-0,336	-0,238	0,104	0,526	0,931	1,429	1,509	1,44	1,232	1,369	1,263
1966	1,333	1,187	0,643	0,441	-0,153	-0,179	-0,113	0,161	-0,117	-0,053	0,021	-0,172
1967	-0,454	-0,889	-1,059	-1,05	-0,413	-0,29	-0,614	-0,497	-0,694	-0,723	-0,423	-0,401
1968	-0,664	-0,831	-0,693	-1,004	-1,083	-0,768	-0,495	-0,149	0,184	0,423	0,58	0,349
1969	0,649	0,803	0,392	0,594	0,721	0,797	0,432	0,283	0,219	0,505	0,683	0,374
1970	0,359	0,375	0,17	-0,045	-0,156	-0,667	-1,084	-0,998	-1,235	-1,093	-1,074	-1,212
1971	-1,181	-1,495	-1,77	-1,816	-1,446	-1,462	-1,234	-1,264	-1,462	-1,444	-1,397	-1,031
1972	-0,55	-0,376	-0,22	-0,142	0,536	1,111	1,804	1,755	1,582	1,633	1,722	1,774
1973	1,784	1,552	0,881	0,526	-0,126	-0,758	-1,067	-1,349	-1,684	-1,652	-1,462	-1,82
1974	-1,91	-1,784	-1,685	-1,58	-1	-0,655	-0,802	-0,707	-0,63	-1,01	-1,217	-0,885
1975	-0,488	-0,546	-0,859	-0,926	-0,865	-1,178	-1,505	-1,686	-1,808	-1,924	-1,744	-1,771
1976	-1,597	-1,358	-1,248	-1,173	-0,482	0,276	0,614	0,715	1,012	0,897	0,42	0,539
1977	0,484	0,287	0,186	0,558	0,37	0,491	0,855	0,707	0,777	0,991	1,003	0,883
1978	0,762	0,888	0,952	0,174	-0,357	-0,541	-0,385	-0,216	-0,349	-0,007	0,237	0,414
1979	0,622	0,395	0,036	0,318	0,424	0,476	0,379	0,623	0,806	0,709	0,758	1,03
1980	0,629	0,523	0,677	0,873	0,907	0,885	0,79	0,375	0,279	0,21	0,252	0,095
1981	-0,32	-0,213	0,422	0,641	0,077	-0,025	-0,037	-0,146	0,124	0,128	0	-0,143
1982	-0,285	-0,189	0,065	-0,083	0,443	0,987	1,599	1,76	1,803	2,023	2,454	2,451
1983	2,723	2,965	3,148	3,008	2,568	2,231	1,78	1,223	0,535	0,074	-0,13	-0,183
1984	-0,357	-0,515	0,202	0,442	0,115	-0,112	-0,185	-0,235	-0,099	0,034	-0,293	-0,573
1985	-0,56	-0,595	-0,719	-0,472	-0,741	-0,134	-0,199	-0,42	-0,536	-0,134	-0,052	-0,283
1986	-0,308	-0,235	0,04	-0,103	0,318	0,311	0,387	0,713	1,093	1,012	0,847	1,186
1987	1,262	1,193	1,687	1,875	2,127	1,931	1,833	2,012	1,911	1,661	1,229	1,292
1988	1,152	0,702	0,5	0,334	0,086	-0,627	-1,182	-1,294	-1,497	-1,344	-1,472	-1,319
1989	-1,075	-1,205	-0,978	-0,71	-0,493	-0,304	-0,475	-0,546	-0,264	-0,329	-0,055	0,153
1990	0,232	0,558	0,871	0,411	0,564	0,452	0,104	0,11	0,433	0,328	0,382	0,349
1991	0,313	0,29	0,352	0,334	0,688	1,04	1,023	1,054	0,76	1,011	1,181	1,255
1992	1,711	1,848	2,004	2,248	2,107	1,798	1,025	0,605	0,485	0,591	0,518	0,616
1993	0,632	0,918	0,953	1,377	1,98	1,57	1,136	1,064	1,022	1,051	0,835	0,608
1994	0,406	0,2	0,137	0,445	0,619	0,635	0,838	0,632	0,674	1,33	1,244	1,205
1995	1,18	0,87	0,784	0,319	0,446	0,487	0,291	0,067	-0,316	-0,408	-0,464	-0,498
1996	-0,603	-0,62	-0,264	-0,486	-0,238	0,008	-0,162	-0,253	-0,302	-0,359	-0,089	-0,347
1997	-0,427	-0,482	-0,174	0,468	1,101	2,314	2,652	2,876	2,848	2,219	2,341	2,232
1998	2,417	2,699	2,721	2,613	1,984	1,161	0,361	-0,17	-0,528	-0,776	-1,074	-0,92
1999	-0,982	-1,024	-0,896	-0,879	-0,648	-0,367	-0,521	-0,723	-0,861	-0,916	-1,031	-1,194
2000	-1,093	-1,133	-0,926	-0,339	0,028	-0,241	-0,211	-0,162	-0,219	-0,322	-0,716	-0,61

Annexe 3 : Résultats obtenus par le programme RClimDex

Après avoir lancé le calcul des indices, nous obtenons différents visuels :

- Dans le ***dossier 'Indice'*** : des fichiers textes contenant les valeurs des différents indices.
- Dans le ***dossier 'log'*** : les séries annuelles de pluies entre 1960-2000 et les fichiers .txt du QC (Contrôle de Qualité des valeurs).
- Dans le ***dossier 'plot'*** : les graphiques montrant les tendances de chaque indice. La significativité observée (p-value) par les statistiques de la tendance linéaire des indices dans le temps, ainsi que le pourcentage de détermination (R2) et la pente de la courbe de tendance linéaire sont exposés dans ce dossier.
- Dans le ***dossier 'trend'*** : nous retrouvons pour chaque indice la p-value et la pente de la tendance linéaire.

Tableau présentant les indices significatifs sur la Bolivie entre 1980 et 2000, calculés sur la base de l'année hydrologique, avec le degré de significativité (R^2), la tendance de la pente et les années remarquables[i]

Nom station	Indices	Valeur si p-value [0.01, 0.05]	Valeur si p-value < 0.01	R2 (%)	Tendance de la pente	Années remarquables*
Ascencion de Guarayo	CDD	-	0,009	16,3	-	-
	CWD	-	0	71,8	+	-
	PCPTOT	-	0	56,8	+	↗ 1980 ↘
	R1mm	-	0	84,8	+	-
	R10mm	-	0	48,9	+	↗ 1980 →
	R20mm	-	0	29,1	+	↗ 1980 →
	R95p	-	0,002	22,8	+	↗ 1980 ↘
	R99p	-	0	28,1	+	→ 1967 ↗
	RX1day	-	0	36,3	+	→ 1967 ↗
	RX5day	-	0,001	23,6	+	-
	SDII	-	0	43,6	-	-
Camiri	R1mm	-	0,004	17,4	+	↘ 1970 ↗
Capinota	PCPTOT	0,05	-	8,6	+	-
	R1mm	0,01	-	14,3	+	↘ 1967 ↗
	R10mm	0,028	-	10,7	+	-
Cobija	CWD	-	0	29,5	+	-
	R1mm	-	0	38,3	+	↗ 1970 →
	R10mm	0,022	-	10,8	+	↗ 1980 ↘
	SDII	-	0,002	19,8	-	-
Cochabamba	R20mm	-	0,002	22,2	-	-
	R95p	0,029	-	11,7	-	-
	RX5day	-	0,003	20,8	-	-
	SDII	-	0	34,7	-	-
Concepcion	CWD	-	0	28	+	↗ 1982 ↘
	R1mm	-	0	36,4	+	↘ 1967 ↗
	SDII	0,011	-	14,7	-	-
El Alto	-	-	-	-		-
El Trompillo	R1mm	-	0,008	14,3	+	↘ 1970 ↗ 1985 →
	R20mm	0,032	-	9,6	+	↘ 1970 ↗ 1985 →
Guayamerin	CWD	-	0,001	23	+	-
	R1mm	-	0	35,9	+	-
	SDII	-	0,004	18,2	-	-
La Paz	CWD	0,015	-	12,1	-	↘ 1970 → 1980 ↘
	R99p	0,037	-	9,1	+	↘ 1967 ↗
	RX1day	0,044	-	8,5	+	↘ 1967 ↗
	SDII	0,019	-	11,4	+	→ 1967 ↗
Magdalena	PCPTOT	0,029	-	11,7	+	-
	R1mm	0,015	-	14,2	+	↗ 1977 ↘
	R10mm	-	0,001	24	+	-
	R20mm	0,01	-	15,7	+	-
Mairana	CWD	-	0,001	25,2	+	→ 1970 ↗ 1985 ↘
	PCPTOT	-	0	30	+	↗ 1980 ↘
	R1mm	-	0	45,7	+	↗ 1985 ↘
	R10mm	-	0,001	24,5	+	↗ 1980 →
	R20mm	-	0,001	24,2	+	↗ 1970 →
	R95p	-	0,008	15,4	+	↗ 1970 →
	RX5day	0,024	-	11,6	+	↗ 1970 →

Oruro	PCPTOT	-	0,002	18,2	+	→ 1970 ↗ 1980 →
	R1mm	-	0,003	17,2	+	-
	R10mm	-	0,003	17,2	+	→ 1970 ↗ 1980 →
	R20mm	0,042	-	8,5	+	↗ 1980 →
Puerto Suarez	R95p	0,049	-	8	+	↘ 1970 ↗ 1985 →
	R99p	-	0,002	18,4	+	→ 1970 ↗
	RX1day	-	0,001	22	+	↘ 1970 ↗
Riberalta	R20mm	0,048	-	8,8	+	→ 1970 ↗ 1985 ↘
	SDII	0,044	-	9,1	+	→ 1970 ↗ 1985 ↘
Robore	PCPTOT	0,048	-	8,4	-	↘ 1970 ↗ 1985 ↘
	R10mm	0,033	-	9,7	-	↘ 1970 → 1980 ↘
	SDII	-	0,009	14,1	-	→ 1985 ↘
San Ignacio de Moxos	CWD	-	0,008	15,7	+	↗ 1985 ↘
	R1mm	0,02	-	12,3	+	↗ 1980 ↘
San Ignacio de Velasco	CWD	-	0	23,3	+	↘ 1970 ↗
	R1mm	-	0	37,4	+	↘ 1970 ↗ 1985 →
	SDII	-	0	29,6	-	↗ 1970 ↘
San Javier	CDD	-	0,006	14,8	-	-
	CWD	-	0	51,5	+	↗ 1985 →
	PCPTOT	-	0	35,5	+	→ 1970 ↗ 1980 ↘
	R1mm	-	0	71,8	+	↗ 1985 →
	R10mm	-	0	30	+	→ 1970 ↗ 1980 →
	R20mm	-	0	25,5	+	→ 1970 ↗ 1980 →
	R95p	0,046	-	8,2	+	→ 1970 ↗ 1985 ↘
	R99p	-	0,002	18,1	+	→ 1970 ↗ 1985 →
	RX1day	-	0	31,7	+	→ 1970 ↗ 1985 ↘
	RX5day	0,01	-	13,4	+	→ 1970 ↗ 1985 ↘
	SDII	0,046	-	8,2	-	→ 1970 ↗ 1980 ↘
San Joaquin	PCPTOT	0,032	-	11,5	+	↘ 1970 ↗ 1980 ↘
	R1mm	-	0,001	27,5	+	→ 1970 ↗ 1980 ↘
	R10mm	-	0,003	21	+	↘ 1970 ↗ 1980 ↘
Sucre	R1mm	0,018	-	11,6	+	↗ 1980 ↘
	R99p	0,011	-	13,4	-	→ 1980 ↘
	RX1day	-	0,008	14,3	-	→ 1980 ↘
	SDII	-	0	28,7	-	-
Tarija	R1mm	-	0	46,3	+	↗ 1980 →
	SDII	-	0	46,2	-	→ 1970 ↘
Totora	CWD	0,037	-	10,7	-	→ 1980 ↘
	R95p	0,042	-	10,2	+	-
	RX1day	0,012	-	15,2	+	-
	RX5day	0,038	-	10,6	+	↗ 1980 ↘
	SDII	-	0	28,9	+	→ 1970 ↗
Trinidad	R1mm	-	0,008	14	+	→ 1970 ↗ 1980 →
	RX1day	0,014	-	12,2	+	→ 1970 ↗
Yacuiba	CWD	-	0,004	18,5	+	-
	R1mm	0,01	-	14,8	+	↘ 1970 ↗
	SDII	0,034	-	10,2	-	→ 1970 ↗ 1980 ↘

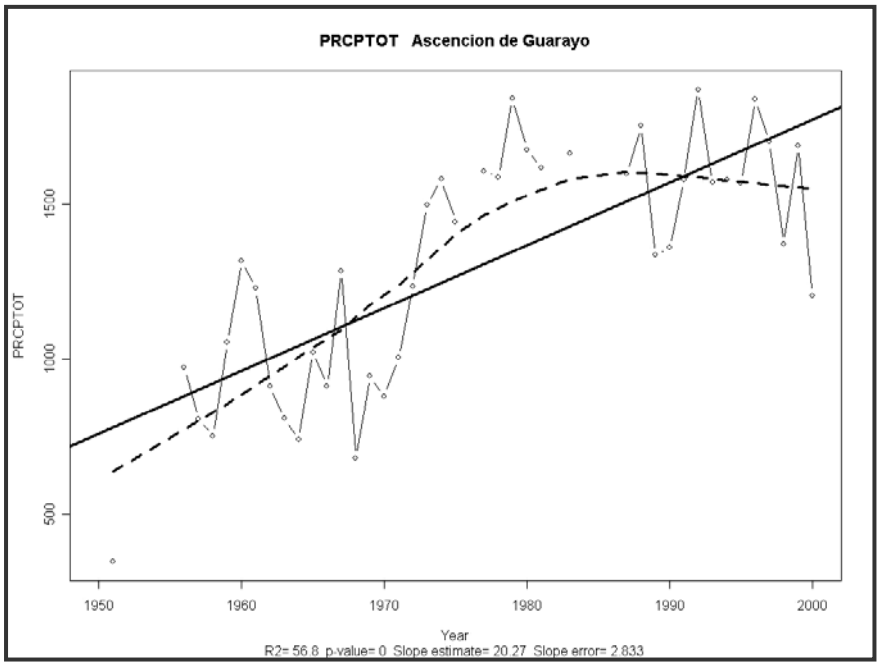
[1] Années remarquables : voir annexe suivant

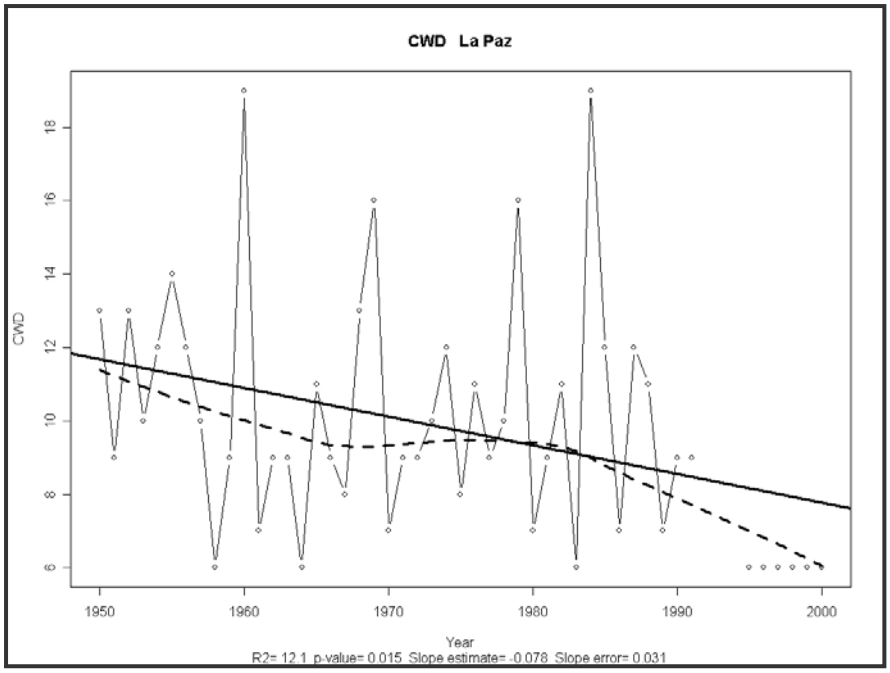
Remarque : si p-value Є [0,05 ; 0,01], il existe une tendance significative et si p-value < 0,01, il existe une tendance très significative

Les années remarquables

Elles correspondent à des années marquantes d'un changement dans le sens de la tendance, remarquables sur les « plots » en dehors de la tendance linéaire (Bravais-Pearson) : les graphiques représentants les tendances dans le temps de chaque indices pour chaque station. Voir les **exemples suivants** :

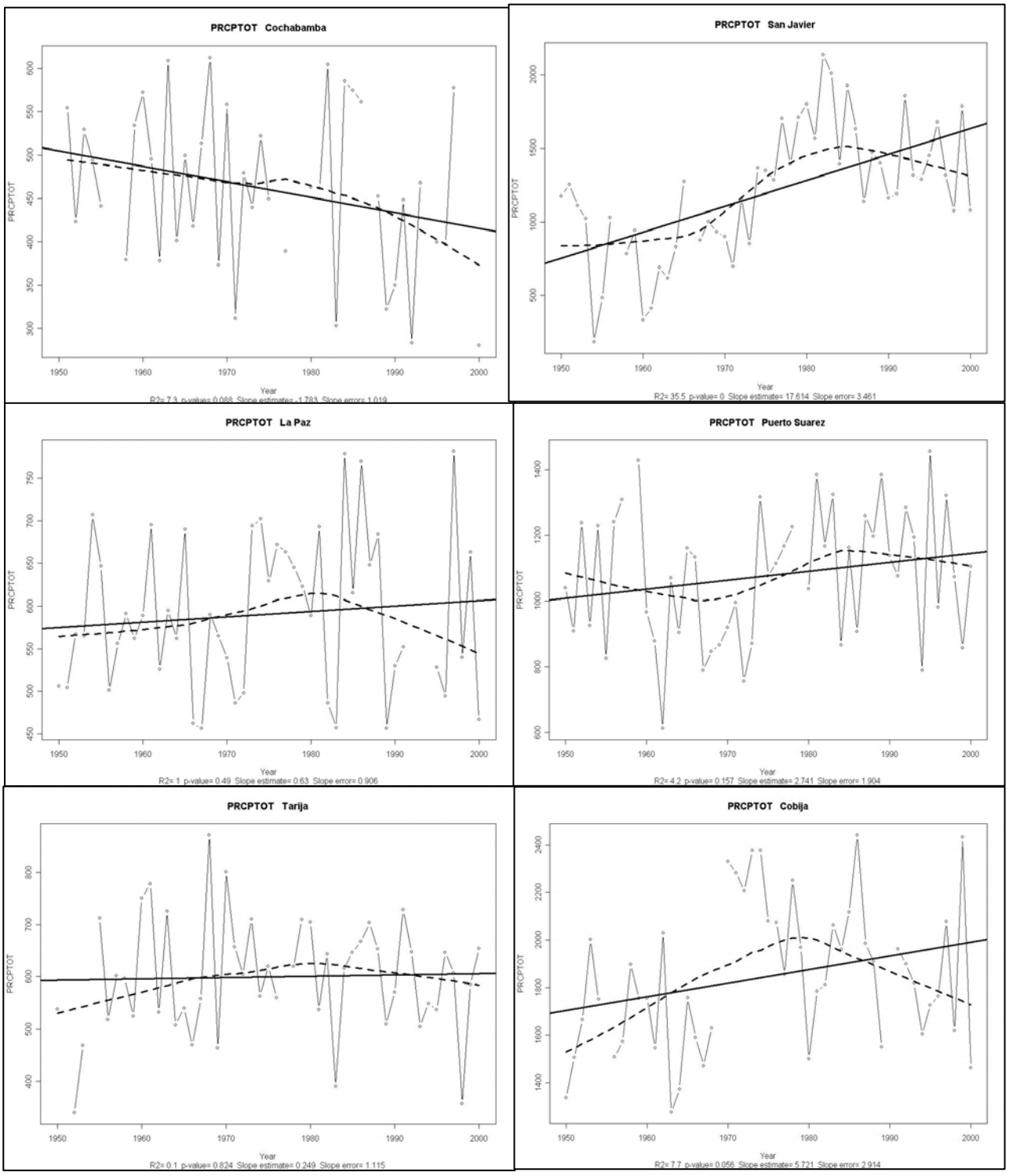
Nom station	Indices	Valeur si p-value [0.01, 0.05]	Valeur si p-value < 0.01	R2 (%)	Tendance de la pente	Années remarquables*
Ascencion de Guarayo	PCPTOT	-	0	56,8	+	↗ 1980 ↘
La Paz	CWD	0,015	-	12,1	-	↘ 1970 → 1980 ↘

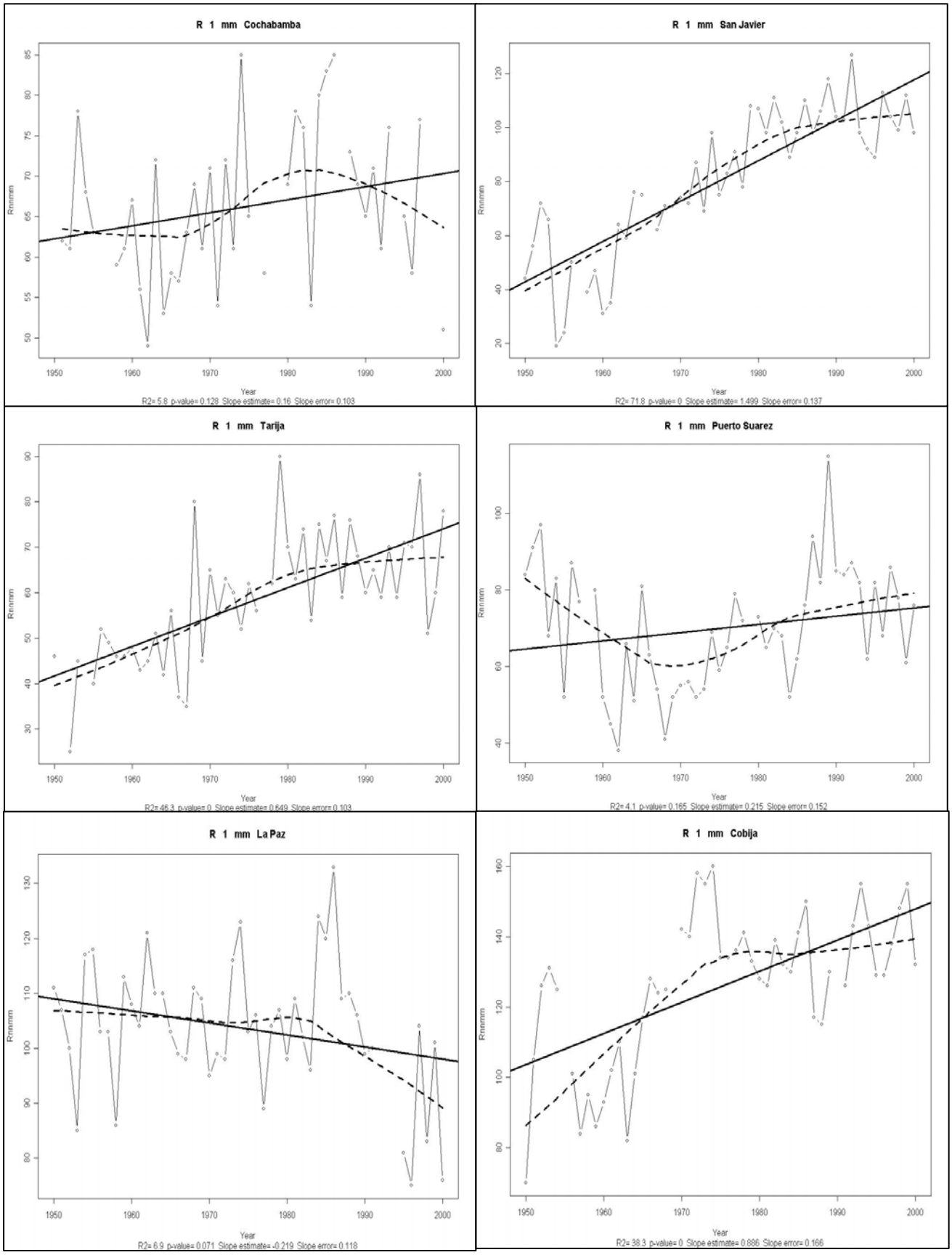




Annexe 4

Graphiques de l'indice PCPTOT, pour 6 stations différentes, fournis par le programme RClimDex



Annexe 5

Graphiques de l'indice R1mm, pour 6 stations différentes, fournis par le programme RClimDex