

UNIVERSITE DE GRENOBLE

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE GRENOBLE
spécialité : Océan Atmosphère et hydrologie

Présentée par

Cinthya RAMALLO

Thèse dirigée par Thierry **LEBEL** et codirigée par
Jean Emmanuel **SICART** et Thomas **CONDOM**

Préparée au sein du **Laboratoire d'étude des transferts
en hydrologie et environnement** dans **Terre Univers
Environnement**

CARACTERISATION DU REGIME PLUVIOMETRIQUE ET SA RELATION A LA FONTE DU GLACIER ZONGO (CORDILLERE ROYALE)

Thèse soutenue publiquement le **12 Décembre 2013**, devant
le jury composé de :

Pierre CAMBERLIN

Professeur, Université Bourgogne, Rapporteur

Christophe BOUVIER

Directeur de Recherche, IRD, Hydrosiences, Rapporteur

Jhan Carlo ESPINOZA

Chercheur, IGP (Institute de Géophysique du Pérou), Examineur

Thierry LEBEL

Directeur de recherche à l'IRD, Grenoble, Directeur de thèse

Jean Emmanuel SICART

Chercheur IRD, Grenoble, Co-directeur de thèse

Thomas CONDOM

Chercheur IRD, Grenoble, Co-directeur de thèse

REMERCIEMENT

Je souhaite remercier en premier lieu trois personnes ; Thierry LEBEL directeur de cette thèse qui m'a accueilli et m'a transmis ses connaissances, Jean Emmanuel SICART et Thomas CONDOM, co-directeurs de thèse, qui m'ont donné leurs amitiés, encouragements, conseils et surtout leurs patiences durant la réalisation de ce travail.

Ensuite je voudrais remercier tous les membres du jury en particulier mes rapporteurs Christophe Bouvier et Pierre Camberlin d'avoir accepté de lire ma thèse.

Au personnel du LTHE, Isabella pour ses conseils et son amitié, Odette et Claire pour leur disponibilité et à tous ceux qui m'ont accueilli depuis le premier moment et à tous ceux qui m'ont permis de passer de bons moments au laboratoire. Aux thésards du laboratoire qui depuis le premier jour m'ont accueillie et montré leurs amitiés. Je voudrais remercier Ossénatou, Moussa, Matthieu, Max, Valentin, etc. La liste des copains que j'ai rencontrée et avec qui j'ai passée des bons moments durant ces années est grande, merci à tous.

En dehors du laboratoire, je ne peux pas oublier les amis avec qui j'ai partagé et avec qui j'ai connu la vie en France, Vanessa, Mayra, Silvia, Nicolas, Margaux et à toute sa famille, Carmen, Manu, Dragana, Valentina, Lucie, etc, à tous merci. En Bolivie à Benjamin, Alvaro, Florence, Maxime, Karina, etc. Avec eux j'ai eu plaisir à travailler.

A ma famille, mes parents qui depuis la Bolivie, m'ont toujours appuyé et donné de bons conseils et à qui cette thèse est dédiée.

Enfin, à Carlos pour sa patience, son appui et sa compréhension surtout durant la dernière année qui a supporté des changements constants d'humeurs. Aussi, pour ses attentes durant tous mes séjours en France, merci pour tout.

Merci à toutes et à tous

RESUME

Le contexte général de l'étude est la caractérisation des variations du régime hydrologique et glaciologique du glacier de Zongo (16°15' de latitude sud en Bolivie) à partir du régime pluviométrique. L'hypothèse de base considère que les caractéristiques et propriétés de la saison des pluies ont une forte influence sur le bilan de masse et sur le régime hydrologique du glacier.

Une base de données pluviométriques de 32 ans (données annuelles) et 19 ans (données journalières) a été compilée, critiquée et utilisée pour l'analyse de la précipitation à une échelle locale. Quatre régions climatiquement homogènes sont distinguées : l'Altiplano, la ville de La Paz, la partie haute et moyenne de la vallée du Zongo. Quatre méthodes pour l'identification des propriétés de la saison des pluies sont développées, deux basées sur l'intensité des pluies et deux basées sur l'occurrence des pluies. Finalement, six propriétés de la saison des pluies sont identifiées : la date de démarrage, la date de fin, la durée de la saison des pluies, la précipitation tombée durant cette saison, un indice de concentration et un indice d'intensités des pluies. Les résultats montrent que la variabilité interannuelle de la précipitation est contrôlée par les nombres de jours pluvieux pour le régime altiplanique, et par les intensités pour le régime amazonien (section moyenne de la vallée du Zongo). Une analyse de la variabilité interannuelle de la pluie a été comparée avec l'ENSO et les corrélations sont faibles durant les dernières 32 années entre ces deux variables.

En comparant les deux dernières décennies [1992-2000] et [2001-2009] on observe une diminution de l'occurrence et de l'intensité des pluies durant l'installation de la saison des pluies mais une augmentation des intensités durant la saison des pluies.

Dans la deuxième partie de cette étude on quantifie l'impact de la saison des pluies sur le bilan de masse et sur le régime hydrologique en tenant en compte de chaque propriété. La corrélation entre les propriétés de la saison des pluies et les débits de fonte du glacier est plus forte qu'avec les bilans de masse. De plus, on met en évidence que la date de démarrage, la durée et la quantité de précipitation tombée durant le cœur de la saison des pluies sont les caractéristiques de la saison des pluies qui expliquent le mieux la variabilité interannuelle de la fusion. Finalement, cette étude permet d'avoir des nouveaux outils d'analyse qui pourraient être mis en place dans des modèles hydrologiques appliqués sur des bassins versants englacés.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

1.- LES GLACIERS TROPICAUX	1
2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF DE LA THESE.....	2

CHAPITRE I

CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ETUDE (VALLEE DU ZONGO, VILLE DE LA PAZ ET L'ALTIPLANO)

I.1 Contexte géographique	7
I.1.1 La vallée du Zongo	8
I.1.2 La ville de La Paz	9
I.1.3 L'Altiplano	9
I-2.- Contexte climatique : La circulation atmosphérique de l'hémisphère Sud	10
I.2.1 Variation saisonnière astronomique : Equinoxes et solstices	10
I.2.2 Variations de la précipitation et la température au cours de l'année : Un zoom dans la vallée du Zongo la Ville de La Paz et l'Altiplano	11
I.2.3 Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT)	13
I.2.4 Le système de haute pression « Bolivian High »	15
I.2.5 Le système de mousson de l'Amérique du Sud (SAMS)	17
I.2.6 Phénomène « ENSO »	18
I.2.6.1 Définition de l'ENSO	18
I.2.6.2 MEI (« Multivariate Enso Index »)	20
I.2.6.3 SOI («Southern Oscillation Index»)	21
I.2.6.4 El Niño « Modoki » ou ENSO du Pacifique central	22
I.2.6.5 Anomalies liées à l'océan Atlantique	24
I.3 Relation climat – glacier – débits de fonte	27
I.3.1 Variations du bilan de masse au cours de l'année des glaciers tropicaux externes	27
I.3.2 Les flux d'énergie sur le glacier	28
I.3.3 Impact des événements 'El Niño' sur les glaciers tropicaux	30

CHAPITRE II

DISPONIBILITE ET HOMOGENISATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES, HYDROLOGIQUES ET GLACIOLOGIQUES

II.1 Les données disponibles de la zone d'étude	31
II.1.1 Echelle régionale	32
II.1.1.1 Répartition spatiale des stations météorologiques	32
II.1.1.2 Description des stations	33
II.1.1.3 Disponibilité des données météorologiques	34
II.1.2 Echelle locale au niveau du bassin versant du Zongo	36
II.1.2.1 Répartition spatiale des équipements hydro – météorologiques	36
II.1.2.2 Description des stations	38
II.1.2.3 Méthode glaciologique pour la détermination du bilan de masse.....	41
II.1.2.4 Disponibilité des données.....	42
II.2 Analyse et homogénéisation des données pluviométriques	43
II.2.1 Test de détection de ruptures selon l'ellipse de Bois.....	43
II.2.2 Plataforma est-il un pluviomètre fiable ?.....	47
II.3.- Analyse des débits de la station Tubo_4830m : Comblement et reconstitution des données journalières	53
II.3.1 Journées sans saturation ($Q \leq 0.37 \text{ m}^3/\text{s}$)	54
I.3.2 Journées avec saturation ($Q \geq 0.37 \text{ m}^3/\text{s}$).....	55
II.4.- Analyse de la température annuelle de la station Mevis (4750m)	57
II.5 Conclusion du chapitre	589

CHAPITRE III

CARACTERISATION DU REGIME PLUVIOMETRIQUE

III.1 Variabilité spatiale de la précipitation	63
III.1.1 Effets conjugués de l'altitude et des gradients Est-Ouest	63
III.1.2 Distinction des quatre régimes pluviométriques	67
III.1.2.1 Pluviomètres représentatifs de chaque région	67
III.1.2.2 Représentativité sur le glacier	69
III.1.3 Relation entre la précipitation à proximité du glacier et les autres régimes pluviométriques.....	70
III.2 Analyse du signal temporel et de sa variabilité	72
III.2.1 Le cycle saisonnier moyen sur la période 1981-2010	73
III.2.2 Distribution statistique des cumuls journaliers	75
III.2.3 Occurrences et intensités des précipitations journalières	78
III.2.3.1 Sensibilité au seuil en relation a la pluie annuelle	79
III.2.3.2 Cycle saisonnier du nombre de jours pluvieux et des intensités	82
III.3 Variabilité interannuelle	89
III.3.1 Fluctuations interannuelles des cumuls annuels (1973-2010)	90
III.3.2 Fluctuation interannuelle du nombre de jours pluvieux	92
III.3.3 Variabilité liée aux anomalies climatiques de l'océan Pacifique et l'océan Atlantique tropical	94
III.3.3.1 Influence de l'ENSO et de l'océan Atlantique tropical sur la pluie annuelle	94
III.3.3.2 Analyse à l'échelle trimestrielle	96
III.3.3.3 Cycle saisonnier des Evénements « ENSO»	98
III.3.4 Cycle saisonnier des années humides et des années sèches	101
III.4 Variabilité décennale	103
III.4.1 Variabilité des cumuls annuels sur la période 1950-2010	103
III.4.2 Variabilité du cycle saisonnier durant les dernières 3 décennies	104
III.4.3 Variation de la distribution de la pluie journalière sur les deux dernières décennies	106
III.4.4 Variation d'échelle décennale du cycle saisonnier	107
III.V Conclusion du chapitre	109

CHAPITRE IV

CARACTERISATION DE LA SAISON DES PLUIES

IV.1 Notion d'année climatique	1122
IV.2 Limites et durée de la saison des pluies : Aspects méthodologiques	1133
IV.2.1 Méthode des pentades	1144
IV.2.1.1 Mise en œuvre de la méthode et représentation du cycle saisonnier.....	1155
IV.2.1.2 Seuils et critères pour déterminer la durée de la saison de pluie	1166
IV.2.1.3 Identification de la date de démarrage des pluies (DDP)	1177
IV.2.1.4 Identification de la date de fin de la saison des pluies (DFP)	11818
IV.2.1.5 Durée de la saison des pluies	1200
IV.2.1.6 Synthèse de la méthode	1211
IV.2.2 Méthode de points d'interception sur le cumul annuelle (PIC)	1233
IV.2.2.1 Mise en œuvre de la méthode et représentation du cycle saison ..	1233
IV.2.2.2 Identification de la date de démarrage des pluies (DDP)	1244
IV.2.2.3 Identification de la date de fin de la saison des pluies (DFP)	1266
IV.2.2.4 Durée de la saison des pluies	1277
IV.2.2.5 Synthèse de la méthode	12828
IV.2.3 Méthode du Nombre de Jours Pluvieux (NJP)	1300
IV.2.3.1 Cycle saisonnier caractérisé par la méthode de nombre de jours pluvieux	1300
IV.2.3.2 Seuils et critères pour déterminer la durée de la saison de pluie ..	1322
IV.2.3.3 Date de démarrage des pluies (DDP)	1333
IV.2.3.4 Date de fin de saison des pluies	1344

IV.2.3.5	Durée de la saison des pluies	1355
IV.2.3.6	Synthèse de la méthode	1366
IV.2.4	Méthode du nombre de jours pluvieux consécutifs	13838
IV.2.4.1	Mise en œuvre de la méthode ; caractérisation du cycle saisonnier	13838
IV.2.4.2	Seuils et critères pour identifier la DDP et la DFP	1400
IV.2.4.3	Identification de la Date de démarrage de la saison des pluies	1412
IV.2.4.4	Date de la fin de la saison des pluies (DFP)	1433
IV.2.4.5	Durée de la saison des pluies (DFP)	1444
IV.2.4.6	Synthèse de la méthode du nombre de jours pluvieux consécutifs	1455
IV.3	Synthèse des méthodes	1477
IV.3.1.-	Comparaison des méthodes	1477
IV.3.1.1	Variations de la DDP et de la DFP selon la méthode et selon la station pour le cycle annuel moyen	14848
IV.3.1.2	Variation interannuelle de la durée de la saison des pluies (1992-2010)	1500
IV.4	Analyse climatologique	1533
IV.4.1	Relations entre le cumul annuel, d'une part, et les cumuls de la phase d'installation et du cœur de la saison des pluies, d'autre part	1533
IV.4.2	Analyse de tendance de la durée et du cœur de la saison des pluies sur la période 1992-2010 (19 ans)	1555
IV.5	Années sèche et années humides	15858
IV.5.1	Cas des années typiquement humides (1997 et 2001)	15858
IV.5.2	Cas des années typiquement sèches (1992 ; 2002 et 2005)	1600
IV.6	Conclusions du chapitre	1633

CHAPITRE V

ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LES PROPRIETES DE LA SAISON DES PLUIES ET LE DEBIT DE FONTE ET LE BILAN DE MASSE GLACIAIRES

V.1.-	Calcul des débits de fonte glacier	1666
V.2-	Description du cycle moyen saisonnier	16868
V.3	Analyse interannuelle de la durée et du volume de fonte écoulé de la période de la plus forte fusion	1700
V.3.1	Synthèse de la durée des périodes 1 et 2 des débits	1744
V.4	Relations interannuelles entre les variables climatiques (précipitations et températures) et les variables glaciologiques (débits de fonte, bilan de masse et ligne d'équilibre)	1755
V.4.1.	Variation interannuelle du débit de fonte	1755
V.4.2	Cycles moyens saisonniers des années de forte (1998,1999 et 2010) et de faible fusion (1993,2001 et 2003)	17979
V.4.2.1	Années avec une forte fusion (1998,1999 et 2010)	1811
V.4.2.2	Années avec une faible fusion (1993,2001 et 2003)	1866
V.5	Fluctuation décennale du cycle saisonnier [1992-2000] [2001-2009]	1900
V.6	Relation interannuelle de la date de démarrage des pluies avec le pic maximum des débits	1911
V.7	Relation entre les propriétés de la saison des pluies, les débits de fonte et le bilan de masse du glacier	1933
V.8	Conclusions	2011

CHAPITRE VI

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

VI.-1.	Caractérisation du régime pluviométrique	204
VI.1.1	Variations interannuelles de la précipitation	204
VI.1.2	Caractéristiques du cycle moyen pluviométrique de l'Altiplano et de la vallée du Zongo	205
VI.1.3	Variabilité interannuelle et décennale	205
VI.1.4	Perspectives	206
VI.2	Cycle saisonnier et cœur de la saison des pluies.	207
VI.2.1	Relation de la durée de la saison des pluies avec la climatologie locale ...	207

VI.2.2 Perspectives	208
VI.-3. Analyse du débit de fonte et ses relations avec la saison des pluies.....	209
VI.3.1 Variabilité interannuelle des débits de fonte et lien avec l'ENSO	209
VI.3.2 Relation entre le climat local et le glacier	209
VI.3.3 Perspectives	210

ANNEXES

ANNEXE 1 : Reconstitution des données	212
Données des débits journaliers reconstitués de la station Tubo_4830m	
Données pluviométriques journalières reconstituées de Plataforma	
ANNEXE 2 : Cercles de corrélation trimestrielle entre le phénomène ENSO et la précipitation	217
ANNEXE 3 : Dates correspondants aux Pentades (A) et dates correspondant aux nombre de jours (B) pour l'année hydrologique août – juillet	220
ANNEXE 4 : Sensibilité de seuils pour déterminer la date de démarrage des pluies (DDP) et la date de fin des pluies (DFP)	222
Méthode de Pentades	
Méthode de nombre de jours pluvieux consécutifs (NJP consécutifs)	
ANNEXE 5 : Cycle saisonnier de chaque année selon la méthode NJP consécutifs.....	231
ANNEXE 6 : Corrélations entre les propriétés de la saison des pluies et les débits de fonte de la station Tubo 4830m (1992-2010)	243
Date de démarrage des pluies (DDP) – Débits de fonte (Qf)	
Date de fin de saison des pluies (DFP) – débit de fonte (QF)	
Durée de la saison des pluies – débits de fonte (Qf)	

BIBLIOGRAPHIE	249
----------------------------	-----

LISTE DE FIGURES

Figure 1: Distribution des surfaces glaciaires dans la zone intertropicale, selon les différentes régions [Kaser,G, 1996]	1
Figure 2.- Différences entre les glaciers Alpains et tropicaux pour les périodes d'ablation et accumulation du bilan de masse. [Kaser.G, 1999]	2
Figure 3.- Valeurs centrées réduites de la précipitation annuelle en mm (Plataforma) et débits de la fonte du glacier en m ³ s (station Tubo_4830m). Début de l'année hydrologique le 1 ^{er} septembre	3
Figure 4.- Moyennes mobiles sur 11 jours de la moyenne de la pluie à Plataforma sur la période du 1992-2010 (en Orange) et de la moyenne des écoulements de la fonte du glacier à la station Tubo_4830(m) sur la période du 1992-2010 (en bleu)	4

CHAPITRE I

Figure I 1.- Situation géographique de la zone d'étude avec l'Amazonie et l'Altiplano. Le zoom à droite permet de localiser la vallée du Zongo, la ville de La Paz, l'Altiplano et le glacier du Zongo	8
Figure I 2.- Schéma descriptif de l'organisation des aménagements hydrauliques pour la production d'électricité dans la vallée du Zongo.....	9
Figure I 3.- Position de la Terre sur son orbite autour du Soleil, ce qui marque des alternances de saisons	11
Figure I 4.- Précipitations et températures mensuelles moyennes pour l'Altiplano, la ville de La Paz et la vallée du Zongo	12
Figure I 5.- Représentation schématique de la circulation troposphérique dans les cellules méridiennes de Hadley (suivant une coupe méridienne avec la ZCIT située à environ 5° au Nord de l'Equateur)	14
Figure I 6.- Déplacement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). En haut durant le moins de janvier et en bas durant le moins de juillet	15
Figure I 7.- Position de la « Bolivian High » sur une carte des régimes des vents à 200 hPa. a) flux de vent en juillet (hiver) b) flux de vent en janvier (été)	16
Figure I 8.- Description de la mousson sud Américaine. Déplacement des vents (m.s ⁻¹) à 900- hPa (a) Moyenne annuelle (b) Janvier moins la moyenne annuelle. (c) Juillet moins la moyenne annuelle	18
Figure I 9.- Caractéristiques principales du phénomène ENSO	20
Figure I 10.- Données normalisées de l'Indice MEI (« Multivariate Enso Index »)	21
Figure I 11.- Données normalisées du SOI (« Southern Oscillation Index »)	22
Figure I 12.- Données normalisées de la PDO (« Pacific decadal oscillation »)	253
Figure I 13.- Carte des anomalies de températures composites d'un phénomène El Niño conventionnel (en haut) et du phénomène Modoki (en bas)	234
Figure I 14.- Fluctuation standardisée de l'EMI (El Niño Modoki Index), pour les données HadISST depuis l'année 1900.....	25
Figure I 15.- Fluctuation mensuelle de données normalisées a) NATL (« Northern Tropical Atlantic ») et b) SATL (« Southern tropical Atlantic »)	27
Figure I 16.- Régime typique des périodes d'accumulation et d'ablation sur les glaciers des tropiques externes (Ex. Glacier du Zongo)	27
Figure I 17.- En haut les débits horaires et journaliers. Précipitation journalière de la station de Plataforma à 4750m. En bas l'albédo à pas de temps journalier	30
Figure I 18.- Bilan de masse annuel des glaciers Zongo, Chacaltaya et Charquini entre 1992 et 2009	31

CHAPITRE II

Figure II 1- Distribution spatiale des pluviomètres journaliers sur un MNT à 90m de résolution	33
Figure II 2.- . Station météorologique typique de l'Altiplano, de la ville de La Paz. et de la vallée du Zongo	34

Figure II 3.- En haut : carte de disposition des stations météorologiques dans le bassin versant du Zongo. En bas, : Distribution spatiale des stations hydrologiques dans le bassin versant	38
Figure II 4.- Pluviomètre totalisateur	39
Figure II 5.- Centrale d'acquisition type «Limni 92» (A gauche). A droite la station limnigraphique à 4830 m	39
Figure II 6.- Station météorologique Mevis (4750m)	41
Figure II 7.- Graphiques des ellipses de bois sur 5 stations. Ayo Ayo, San calixto El Alto, Chuquiaguillo et P8.	46
Figure II 8.- Ellipse de Bois de Plataforma comparée à Botijlaca (1979-2010), Zongo (2000-2010), et P3 (1995-2010).	50
Figure II 9.- Nuage de points entre Plataforma avec Botijlaca, Zongo et P3. Chaque point correspond à un mois compris entre novembre et avril.	51
Figure II 10.- Nuage de points entre la station Tubo_Cobee et la station Tubo_4830.	54
Figure II 11.- En haut, données mensuelles de la station 4830 (reconstituées et mesurées) et en bas données journalière (reconstituées et mesurées)	56
Figure II 12.- Matrice de corrélations entre les stations de température les plus proches du glacier	57
Figure II 13.- Variation interannuelle de la température des stations El Alto, Mevis et Hobo	58

CHAPITRE III

Figure III 1.- Carte des isohyètes de la région d'étude, composée à partir des données GPCC (« Global Precipitation Climatology Centre »)	64
Figure III 2.- Relations entre pluies annuelles et latitude (a), longitude (b) altitude (c).	67
Figure III 3.- Coefficient de détermination entre P4, P5 et les pluviomètres représentatifs de chaque région.	71
Figure III 4.- Cycle saisonnier moyen de la pluie journalière sur 19 ans (1992-2010)	75
Figure III 5.- a) Distribution de la pluie journalière en mm (1992-2010) exprimée comme la fonction du pourcentage de la pluie annuelle. b) Fonction de répartition de la pluie [1992-10]	78
Figure III 6.- Coefficient de détermination de la moyenne interannuelle entre la pluie, le nombre de jours pluvieux (en bleu) de l'année et l'intensité (en noir)	80
Figure III 7.- Cycles moyens du Nombre de jours pluvieux à 1mm (a) et 5mm (b), de l'intensité (mm/j) et de la pluie journalière (mm)	84
Figure III 8.- Fluctuation interannuelle de la pluie représentée en indices pluviométriques $i = (P_i - P) / \text{sur}$ (1973-2010).	91
Figure III 9.- Fluctuation interannuelle de nombre de jours pluvieux pour des intensités de 1 ; 2 et 5 mm/j.	93
Figure III 10.- Cercles de corrélation (r) entre l'ENSO (SOI, Modoki, MEI) et la pluie moyenne	97
Figure III 11.- Cumuls des années cataloguées comme les Niño les plus forts : 1983, 1992, 1998 et cumul moyen de la période	100
Figure III 12.- Cycles saisonniers des composites secs (1992, 1998, 2005), composites humides (1997, 2001) et de la moyenne des 19 ans (1992-2010).	102
Figure III 13.- Indice pluviométrique $I_i = (P_i - P) / \text{à}$, calculé à partir de la moyenne de chaque décennie depuis 1950	103
Figure III 14.- Cumuls journaliers de a) Patacamaya pour les décennies 1981-90, 1991-00, 2001-10 b) San Calixto : Périodes 1981-90, 1991-00, 2001-10 c) Plataforma : période 1992-00, 2001-09 d) Harca : période 1992-00, 2001-09. En abscisse la Pluie journalière en mm et en ordonnée le nombre de jours depuis le début de l'année hydrologique au 1 ^{er} septembre (Jour 1)	105
Figure III 15.- Composites sur deux périodes 1992-00 et 2001-09. En abscisses la pluie journalière et en ordonnées la fréquence empirique a) Patacamaya. b) San Calixto c) Plataforma d) Harca.	107
Figure III 16.- Moyenne glissante sur 11 jours à Ayo Ayo, Patacamaya et San Calixto. Cycles moyens sur 3 décennies : 1950-69, 1970-89 et 1990-09.	108

CHAPITRE IV

Figure IV 1.- Moyenne mensuelle des précipitations en pourcentage du total annuel. sur une période de 37 ans (1973-2010).....	113
Figure IV 2.- Cycles saisonniers moyens des pluies (1992-2010) formés à partir des pentades.....	115
Figure IV 3.- Histogrammes de la date de démarrage des pluies (DDP) obtenue par la méthode des 'pentades' sur une période de 19 années (1992-2010)	118
Figure IV 4.- Histogrammes de la date de fin de saison des pluies (DFP) obtenus par la méthode des 'pentades'	119
Figure IV 5.- Boîtes à moustache de la durée de la saison des pluies (1992-2010) obtenues selon la méthode des « Pentades ».....	121
Figure IV 6.- Cumuls moyens des pluies sur 19 ans (1992-2010).....	124
Figure IV 7.- Histogrammes de la date de démarrage des pluies sur une période de 19 ans, selon la méthode PIC	125
Figure IV 8.- Histogrammes de la date de démarrage de la saison des pluies sur une période de 19 ans, selon la méthode PIC.	126
Figure IV 9.- Boîtes à moustache de la durée interannuelle de la saison des pluies (1992-2010) obtenues selon la méthode PIC	128
Figure IV 10.- Cycles saisonniers sur la moyenne de 19 ans (1992-2010) du nombre de jours pluvieux (NJP) calculés à partir d'un seuil de 1 mm/j	131
Figure IV 11.- Histogrammes de la date de démarrage des pluies selon la méthode de NJP (1992-2010).....	133
Figure IV 12.- - Histogrammes de la date de fin de saison des pluies (DFP) selon la méthode NJP (1992-2010)	134
Figure IV 13.- Boîte à moustache de la durée de la saison des pluies (1992-2010) obtenues selon la méthode « NJP »	136
Figure IV 14.- Cycles saisonniers sur la moyenne de 19 ans (1992-2010) du nombre de jours pluvieux consécutifs calculés à partir de 1 mm /j	140
Figure IV 15.- Histogrammes de la date de démarrage de saison des pluies (DDP) selon la méthode NJP consécutifs (1992-2010)	142
Figure IV 16.- Histogrammes de la date de fin de saison des pluies (DFP) selon la méthode NJP consécutifs.(1992-2010)	143
Figure IV 17.- Boîte à moustache de la durée de la saison des pluies (1992-2010) obtenues selon la méthode « NJP consécutifs».	145
Figure IV 18.- Fluctuation interannuelle de la durée de la saison des pluies selon les méthodes de pentades, PIC, NJP et NJP consécutifs.....	152
Figure IV 19.- Tendances linéaires de la durée de la saison des pluies selon les méthodes de Pentades (en haut) et NJP (en bas)	156
Figure IV 20.- Tendances linéaires interannuelles de la pluie durant de la saison des pluies selon les méthodes de Pentades et NJP (1992-2010).	157
Figure IV 21.- Durée cumulée des années humides : 1997 (en haut) et 2001 (en bas). selon la méthode des pentades (bleu clair) et la méthode NJP (bleu foncé :)	159
Figure IV 22.- Durée cumulée des années sèches: 1992 (en haut), 2002 (au milieu) et 2001 (en bas) selon la méthode des pentades (bleu clair) et la méthode NJP.	161

CHAPITRE V

Figure V 1.- Cycle moyen des débits de fonte calculés avec un $C_e=0.5$ [Lejeune, 2010], $C_e=0.8$ [Ribstein, 1995] et débits de la station 4830 [$Q_f+Q_{morraine}$].....	168
Figure V 2.- En haut le cycle moyen de débits de fonte (1992-2010). En bas, le cumul du volume de fonte du cycle moyen	169
Figure V 3.- Fluctuation interannuelle du pourcentage de débits cumulée durant la période 1 (du 1 août jusqu'au pic maximum de chaque année) par rapport au volume total d'eau annuel.	172
Figure V 4.- En haut : relations du débit annuel cumulé avec le débit cumulé de la période 1 et la durée de cette période. En bas : relations du débit annuel cumulé avec le débit cumulé de la période 2 et la durée de la période 2	173
Figure V 5.- Variabilité interannuelle des débits de fonte entre 1992 et 2010	176
Figure V 6.- Matrice de corrélations entre la précipitation (P), la température (T), les débits de fonte (Qf), le bilan de masse (BM) et l'ELA sur la période (1992-2010).	177

Figure V 7.- Fluctuation saisonnière de la moyenne des trois années qui présentent les débits les plus forts (1998, 1999 et 2010), et de la moyenne des trois années avec les plus faibles débits (1993, 2001 et 2003).	180
Figure V 8.- Fluctuations saisonnières de chaque année caractérisée comme une années de forts débits (1998,1999 et 2010).	182
Figure V 9.- Cycle saisonnier de la précipitation, des volumes d'eau écoulés de fonte (centrée réduits) et en valeurs absolues du bilan de masse mensuel des années 1992, 1998 et 2010....	185
Figure V 10.- Fluctuations saisonnières de chaque année caractérisée comme une années de faible débit (1993,2001 et 2003)	187
Figure V 11.- Cycle saisonnier de la précipitation, des volumes d'eau écoulés de fonte (centrée réduits) et en valeurs absolues du bilan de masse mensuel des années 1993, 2001 et 2003. ...	189
Figure V 12.- Variation du cycle saisonnier moyen des débits de fonte durant les deux dernières décennies (1992-2000; 2001-2009).	191
Figure V 13.- En haut la fluctuation interannuelle de la date de débits maximums et de la DDP, selon la méthode de pentades	193
Figure V 14.- Corrélations exprimées en valeurs centrées réduites (CR) pour les couples des valeurs suivantes : Débits (Qf) - Durée, Bilan de masse (BM)- Durée, Débit (Qf)- P saison des pluies (Psp) et Bilan de masse (BM) - P saison des pluies (Psp). Pour chaque caractéristique, la méthode la plus représentative a été choisie.	199

LISTE DE TABLEAUX

CHAPITRE II

Tableau II 1.- Présentation des stations de pluviométrie (a) et température (b)	35
Tableau II 2.- Evolution de la taille de la surface du glacier et de la partie non glacier (moraine)	36
Tableau II 3.- Disponibilité des données hydrologiques, pluviométriques et météorologiques dans le bassin versant du Zongo.	43
Tableau II 4.- Valeurs mensuelles originales et corrigés pour les stations ChuquiagUILlo, Ayo Ayo et P8. a) reconstitution annuelle b) reconstitution mensuelle.	47
Tableau II 5.- a) Coefficients de détermination entre Plataforma et les pluviomètres avec la même taille de captation (22cm) ; Botijlaca, ChuquiagUILlo, El Alto et Zongo divisée selon deux périodes : 1981-2010 et 2000-2010. b) Coefficients de détermination entre Plataforma et les totalisateurs (1994-2010)	49
Tableau II 6.- Valeurs mensuelles sans corrections (brutes) et valeurs corrigées pour le pluviomètre de Plataforma.	53
Tableau II 7.- Synthèse des données utilisées dans la présente étude a) Précipitation b) débits et c) température.	60

CHAPITRE III

Tableau III 1.- Synthèse des données pluviométriques utilisées pour ce chapitre.	62
Tableau III 2.- Pluie moyenne annuelle de 1973 à 2010 pour 28 stations	66
Tableau III 3.- Coefficient de variation (CV) et coefficient de corrélation (r) entre les pluviomètres à pas de temps annuel et la station fictive obtenue avec la méthode du vecteur régional.	69
Tableau III 4.- Coefficient de variation (CV) et de détermination (r^2) entre la station fictive du vecteur régional et les pluviomètres totalisateurs autour du glacier du Zongo (1991 – 2009).	70
Tableau III 5.- Nombre de jours du cycle moyen (1992-2010) qui sont au-dessus de seuils à 1, 2 et 5 mm/j. Pourcentage de la pluie annuelle qui correspond à chaque seuil.	79
Tableau III 6.- Statistiques interannuelles de la pluie, du Nombre de jours pluvieux annuel (NJP*) et de l'intensité moyenne de la pluie journalière (I*)	81
Tableau III 7.- Relation entre fluctuations de la pluie journalière et fluctuations de NJP, d'une part, fluctuations de l'intensité, d'autre part, au seuil de 1mm.: a) Phase d'installation de la saison de pluie b) cœur de la saison, c) saison sèche	86
Tableau III 8.- Relation entre fluctuations de la pluie journalière et fluctuations de NJP, d'une part, fluctuations de l'intensité, d'autre part, au seuil de 5mm.: a) Phase d'installation de la saison de pluie b) cœur de la saison c) saison sèche.	88
Tableau III 9.- Statistiques des valeurs annuelles entre 1973-2010.	92

Tableau III 10.- Matrice de coefficients de détermination annuels (r^2) entre Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca.	92
Tableau III 11.- Statistiques de Nombre de jours pluvieux à 1, 2 et 5 mm.	94
Tableau III 12.- Coefficient de corrélation (r) entre la pluie annuelle (Août-juillet) et la moyenne des mois DJF (Décembre, janvier, février) des indices SOI, Niño Modoki, MEI 1973 à 2010 (38 points), NATL et SATL. (1983-2010) (28 points).	95

CHAPITRE IV

Tableau IV.- 1.- Seuils pour déterminer la date de démarrage (DDP) et la fin (DFP) de la saison des pluies, avec la méthode de Pentades (moyenne sur 5 jours).	116
Tableau IV.- 2.- Coefficient de détermination (r^2) de la durée avec les dates de démarrage (DDP) et de fin de la saison des pluies (DFP) et de la DDP avec la DFP.	122
Tableau IV.- 3.- Moyennes et écart types représentés en jours, de la date de démarrage des pluies (DDP) et la date de fin de saison (DFP) selon la méthode des 'pentades',	122
Tableau IV.- 4.- Coefficients de détermination (r^2) entre la durée de la saison des pluies et la Date de démarrage des pluies (DDP) et la date de la fin de saison des pluies (DFP).	129
Tableau IV.- 5.- Moyennes et écart types représentés en jours, de la date de démarrage des pluies (DDP) et la date de fin de saison (DFP) selon la méthode PIC.	130
Tableau IV.- 6.- Seuils pour déterminer le démarrage (DDP) et la fin (DFP) de la saison de pluies, avec la méthode de NJP (Nombre de jours pluvieux).	132
Tableau IV.- 7.- Coefficient de détermination entre la durée avec la date de démarrage des pluies (DDP) et avec la date de fin de saison des pluies (DFP). Coefficient de détermination entre la DDP- DFP 137	137
Tableau IV.- 8.- Moyennes et écarts annuelles de la date de démarrage des pluies (DDP) et la date de fin de saison (DFP) selon la méthode NJP 138	138
Tableau IV.- 9 Seuils en nombre de jours pluvieux (NJP) utilisés pour le calcul de la DDP et la DFP par la méthode NJP consécutifs..... 141	141
Tableau IV.- 10 Coefficient de détermination entre la durée et la date de démarrage des pluies (DDP) et avec la date de fin de saison des pluies (DFP). Coefficient de détermination entre la DDP- DFP 146	146
Tableau IV.- 11 Moyenne annuelle et écart type de la Date de Démarrage des Pluies (DDP) et de la date de fin de saison des pluies (DFP) selon la méthode de NJP consécutifs,..... 147	147
Tableau IV.- 12 . a) Date de démarrage de pluie (DDP) et b) date de fin de saison de pluie (DFP), sur le cycle moyen de 19 ans, selon les méthodes de pentades, PIC, NJP et NJP consécutifs. .. 149	149
Tableau IV.- 13 Moyennes et écarts types de la durée selon la méthode de Pentades, PIC, NJP et NJP consécutifs sur la moyenne interannuelle de 1992 - 2010..... 151	151
Tableau IV.- 14 Coefficients de détermination (r^2) calculés entre le cumul de pluie de la saison d'installation de pluies et le cumul annuel selon les méthodes de Pentades et NJP. 153	153
Tableau IV.- 15 Coefficient de déterminations (r^2) entre le cumul du cœur de la saison des pluies et le cumul annuel pour chaque méthode 154	154
Tableau IV.- 16 Pourcentage de la précipitation durant le cœur de la saison des pluies par rapport à la pluie annuelle selon les méthodes Pentades et NJP. 154	154

CHAPITRE V

Tableau V 1.- Statistiques du cycle moyen de débits de fonte (moyenne de 1992-2010).	170
Tableau V 2.- Durée interannuelle de la période 1, valeurs obtenues avec la méthode de Pentades. Moyenne = 134.7 j, écart type = 0.04 j..... 171	171
Tableau V 3. Résumé des débits journaliers (sur la période 1992- 2010) : durée de la période 1 en jours, débit moyen sur la période 1 (du 1er août au débit maximum), débit moyen sur la période 2, débit maximum dans l'année, et débits annuel..... 175	175
Tableau V 4.- Statistiques de la fluctuation interannuelle du débit de fonte sur la moyenne de 19 ans [1992-2010]..... 176	176
Tableau V 5. Valeurs annuelles du bilan de masse, la ligne d'équilibre (ELA), le débit de fonte (Qf), la précipitation (P) et la Température (T)..... 178	178
Tableau V 6.- Volumes écoulés pour chaque année, moyenne du volume annuel de 19 ans et le pourcentage du total de 3 années avec la plus faible fusion (en bleu) et du total de 4 années avec la plus forte fusion (en rouge) par rapport au volume total de 19 ans (1992-2010) 181	181
Tableau V 7.- Résumé des années des forts débits (1998, 1999 et 2010) et de la moyenne de 19 ans. Débits de fonte (Qf), précipitation (P), bilan de masse (BM), et DDP selon la méthode de	

Pentades et selon la méthode de NJP, jour de la fin de la période de plus forte fusion (Date Q max)

.....
18585

Tableau V 8.- Résumé des années des faibles débits (1993, 2001 et 2003) et de la moyenne de 19 ans. Débits de fonte (Qf), précipitation (P), bilan de masse (BM), et DDP selon la méthode de Pentades et selon la méthode de NJP, jour de la fin de la période de plus forte fusion (Date Q max)..... 190

Tableau V 9.- Fluctuation interannuelle des indices d'intensités (Ii) et de concentration (Ic). En gras et italique la moyenne et l'écart type des derniers 19 ans (1992-2010)..... 195

Tableau V 10.- Coefficients de corrélations (1992-2010) d'une part entre les valeurs annuelles de débit (Qf), et de bilan de masse (BM) et d'autre part les caractéristiques de la saison des pluies obtenues selon les méthodes de Pentades et NJP. Les variables comparées : DDP (Date de démarrage de pluie), DFP (Date de fin de saison de pluie), durée de la saison des pluies, Ic (Indice de concentration), Ii (indice d'intensité) et la pluie saisonnière (P saison des pluies). En rouge les corrélations les plus fortes pour chaque variable. En souligné et italique les corrélations non significatives à un niveau de confiance de 0.05 197

INTRODUCTION

1.- LES GLACIERS TROPICAUX

Les glaciers tropicaux se situent entre le tropique du Cancer et le tropique du Capricorne, de part et d'autre de l'équateur. Plus de 90% de la surface de ces glaciers se trouve dans la région andine centrale (Fig.-1). Les glaciers des tropiques humides internes proches de l'Equateur et des tropiques externes se trouvent dans les limites intertropicales, (10° et 23° S), zone intermédiaire entre les tropiques et les latitudes sèches subtropicales.

La grande majorité des glaciers tropicaux sont dans les tropiques externes : 71 % de la surface de ces glaciers sont situés au Pérou et 20 % en Bolivie. Cette région est caractérisée par une saisonnalité marquée par des précipitations et une unique saison des pluies en été austral ainsi qu'une saison sèche en hiver. La superficie des glaciers situés dans les tropiques « internes » se répartit de la manière suivante : 5 % en Equateur, Venezuela et Colombie ; 0.5 % en Afrique de l'est et en Nouvelle Guinée. A la différence des tropiques externes, cette région est caractérisée par un climat constamment humide [Kaser.G, 1999]

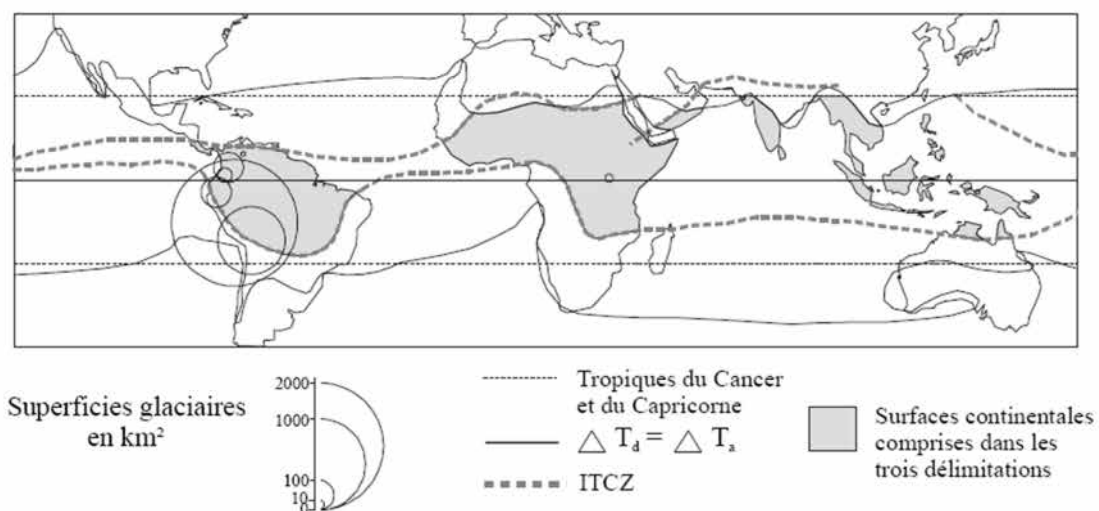


Figure 1: Distribution des surfaces glaciaires dans la zone intertropicale, selon les différentes régions [Kaser,G, 1996]

L'influence de la latitude sur les glaciers

La répartition dans l'année des périodes d'ablation et d'accumulation pour les glaciers tropicaux est différente de celle des glaciers des moyennes latitudes tels que les glaciers alpins. La Fig. 2 schématise les comportements du bilan de masse des glaciers qui se trouvent sous différentes latitudes. Dans les Alpes, la période d'accumulation (gain de masse des glaciers) se produit pendant l'hiver (période froide) et la période d'ablation (perte de masse) pendant l'été (période chaude). Aux latitudes tropicales comme au Pérou ou en Bolivie, l'ablation se produit tout au

long de l'année, avec un pic positif durant l'été, période qui se caractérise également par une forte accumulation de neige [Kaser.G, 1999].

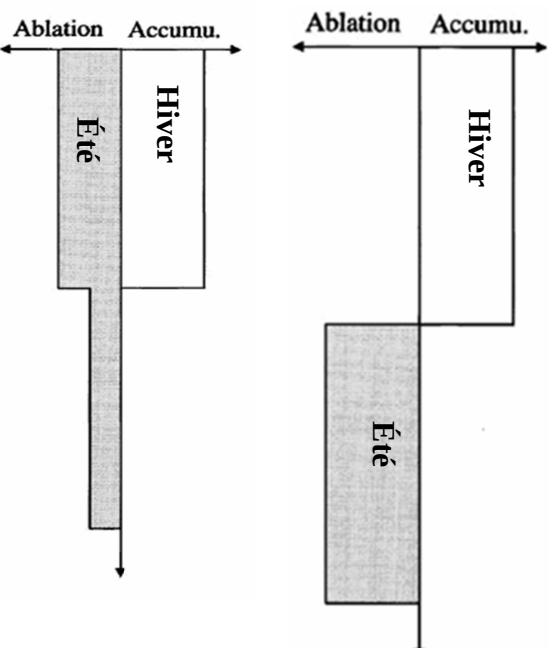


Figure 2.- Différences entre les glaciers Alpains (en haut) et tropicaux (en bas) durant les périodes d'ablation et d'accumulation. [Kaser.G, 1999]

Les glaciers tropicaux sont relativement petits, le plus souvent avec une surface inférieures à 5 km². Les facteurs explicatifs de leurs tailles sont la basse latitude qui induit de forts rayonnements et des températures élevées qui ne permettent pas aux glaciers tropicaux d'exister en dessous de 5000 m d'altitude environ. Malgré les hautes altitudes de la cordillère centrale des Andes (qui peut atteindre 6000 m), les précipitations neigeuses en dehors de la zone d'ablation et d'accumulation ne résistent que peu de temps à la fonte intense des neiges. Les précipitations neigeuses ont généralement lieu durant la nuit, puis cette neige fond, ensuite, rapidement au cours de la journée.

2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF DE LA THESE

La Fig. 3 montre une relation opposée entre les précipitations annuelles mesurées à proximité de l'exutoire du bassin du glacier Zongo et le débit de fonte sur 19 années (voir chapitre II.3, pour la description détaillée des stations). Cette relation est typique des bassins versants fortement englacés (environ 70% pour le Zongo). Les années plutôt déficitaires en précipitations (essentiellement solides aux hautes altitudes du bassin du Zongo) présentent un fort débit de fonte par rapport à la moyenne, et inversement. Le coefficient de détermination (r^2) montre que la précipitation explique environ 59% de la variance du débit annuel, facteur important pour les bassins versants englacés.

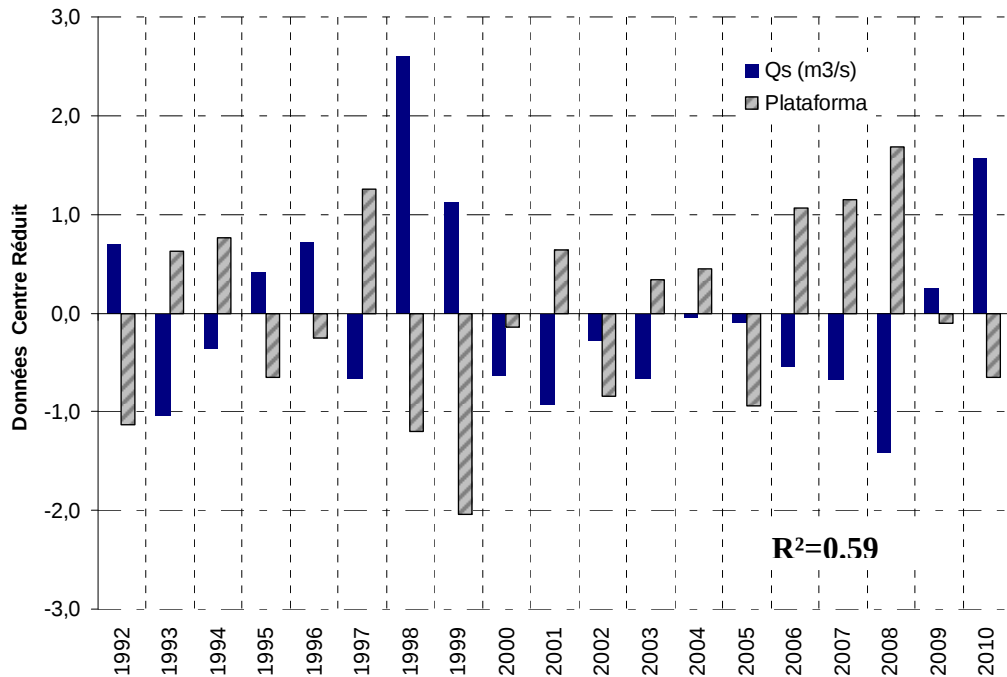


Figure 3.- Données centrées réduites de la précipitation annuelle en mm (Plataforma) et des débits de fonte du glacier en m³/s (Qs à la station Tubo_4830), calculées sur l'année hydrologique : de Septembre àAoût.

Pour mieux comprendre la variation interannuelle du débit et aussi le bilan de masse du glacier, il est donc important d'étudier les fluctuations du régime pluviométrique à différentes échelles temporelles. Ainsi nous mettons en évidence leur impact sur le régime hydrologique glaciaire.

Les processus les plus importants concernant la fusion du glacier, apparaissent durant la saison des pluies (septembre à mars). Une description plus détaillée de ces processus au niveau saisonnier est faite dans la section I.3. Des études récentes ont mis en évidence que la variation de débit de fonte au cours de l'année est reliée à l'arrivée de la saison des pluies [Sicart, 2002]. La variation du démarrage de la saison des pluies peut ainsi faire augmenter ou diminuer l'ablation et donc l'écoulement à l'aval du glacier [Ribstein et al., 1995 ; Sicart et al., 2003]

Les mois du début de l'été austral (octobre-décembre), précédant l'arrivée des précipitations les plus fréquentes, sont des mois où les débits sont les plus forts (ablation maximale) de l'année (Fig.4). Durant cette période les précipitations ne sont pas très fréquentes, provoquant un faible albédo du glacier et laissant le glacier sans protection aux rayonnements solaires qui est proche du maximum du solstice d'été (décembre). De janvier à mars (période la plus pluvieuse de l'année) les fréquentes chutes de neige et les nuages vont protéger le glacier de la fonte, par réduction du rayonnement solaire incident et par effet d'albédo de la neige fraîche. On notera que les débits de fonte atteignent leur maximum de manière presque simultanément avec le démarrage du « cœur » de la saison des pluies (début décembre), (voir la brusque augmentation de la précipitation sur la Fig. 4),

lorsque qu'interviennent des chutes de neige qui protègent le glacier. A partir du mois mars se met en place une diminution progressive de la précipitation et des débits, jusqu'au mois de mai où débute un étiage pluviométrique qui dure jusqu'au mois d'août.

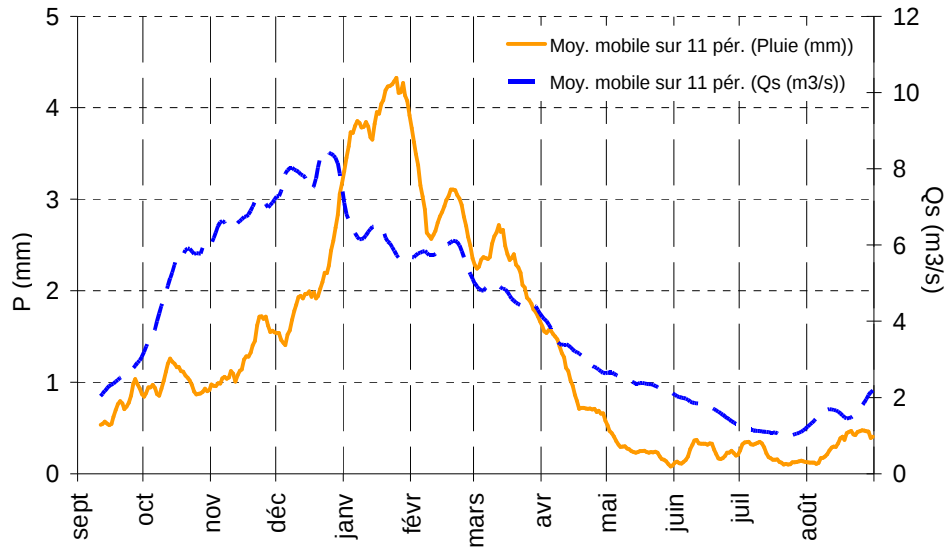


Figure 4.- Moyennes mobiles sur 11 jours de la moyenne de la précipitation de Plataforma sur la période du 1992-2010 (en Orange) et de la moyenne des écoulements de la fonte du glacier a la station Tubo_4830(m) sur la période du 1992-2010 (en bleu).

L'objectif général de cette thèse est de mieux comprendre la liaison entre la saison des pluies et les débits de fonte, en étudiant les séries temporelles de précipitations et de débits aux différentes échelles de temps (journalière, mensuelle et annuelle). Les précipitations influencent aussi fortement le bilan de masse des glaciers. Cette question fondamentale du lien entre régime pluviométrique et régime d'ablation glaciaire trouve son origine dans les études déjà menées dans la région du Zongo. Wagnon, 1999 a analysé l'influence de l'albédo sur la fusion glacier, ce travail nous a permis identifier la question de base de cette thèse. Les études proposées par Sicart, 2002 et Sicart 2007 ont montré aussi qu'une année particulière comme 1997-98 caractérisée comme « Niño » a provoqué un léger déficit des précipitations et surtout un retard de la saison des pluies entraînant un faible albédo ce qui a eu comme conséquence une très forte fusion glaciaire. La variation du climat régional a une influence sur les glaciers de la cordillère Royales (Ribstein, et al., 1995). La variation de la précipitation qui provient de l'Amazonie peut signifier aussi une variation sur le bilan de masse du glacier, car les masses d'air qui l'alimentent proviennent de cette région (Ronchail, et al 2006). Une analyse plus approfondie de la variation spatiale et temporelle entre l'Amazonie et l'Altiplano est décrite dans le chapitre III.

Au-delà de l'analyse climatologique, ce travail prétend fournir des éléments pour l'élaboration d'outils de modélisation hydrologique, à une

échelle de temps fine, concernant les hauts bassins andins soumis aux conditions particulières du climat des hautes montagnes tropicales

Il est important de considérer que la Cordillère Royale agit comme une barrière naturelle entre l'Amazonie et l'Altiplano, le travail présenté ici concerne donc la caractérisation du régime pluviométrique à différentes échelles temporelles pour 4 sous-régions (telles qu'identifiées dans le chapitre III) : l'Altiplano, la ville de La Paz et la section haute et moyenne de la vallée du Zongo.

Notre recherche s'est organisée en 4 étapes :

- Compilation et traitement des données pluviométriques (Chapitre II).- Disposant d'une base de données pluviométrique journalière de 19 ans et d'une base mensuelle de 32 ans, ces données sont traitées d'une part par une analyse de corrélation deux à deux et d'autre part avec la méthode de l'ellipse de Bois. De plus, on effectuera une analyse exhaustive annuelle, mensuelle et journalière du pluviomètre le plus proche du glacier (Plataforma) afin de trouver de possibles erreurs dans sa série. Les données des débits journaliers de la station 4830 sont, quant à elles, traitées et comblées en tenant en compte des hauteurs d'eaux des canaux Tubo_Cobbe et Alpaca.
- Caractérisations temporelle et spatiale du régime pluviométrique (Chapitre III).- Une caractérisation spatiales s'appuyant sur 28 stations est utilisée pour différencier les régimes pluviométriques qui entourent le glacier (4 au total). Ensuite, on fait une caractérisation temporelle à différentes échelles (décennale, annuelle, saisonnière et journalière), afin d'analyser les différences et similitudes qui existent entre ces quatre régions.
- Identification des propriétés de la saison des pluies (Chapitre IV). - Quatre méthodes ont été développées pour identifier les différents stades de la saison de pluie d'une année donnée (date de démarrage de la saison des pluies, date de la fin de la saison des pluies, durée et précipitation durant le cœur de la saison des pluies). Deux sont basées sur l'intensité pluviométrique : i) Méthode de la moyenne des précipitations cumulées sur cinq jours (Pentades) ii) Interception des points d'inflexion sur les cumuls journaliers. Deux méthodes sont basées sur le nombre de jours pluvieux : iii) Nombre de jours pluvieux sur une fenêtre glissante de 21 jours et iv) Nombre de jours pluvieux consécutifs sur une fenêtré glissante de 21 jours.

Analyse temporelle des débits et sa relation avec les autres variables glaciologiques (Chapitre V).- On va discriminer les débits provenant de la fonte du glacier et ceux qui proviennent de la moraine, pour pouvoir s'intéresser uniquement à ceux de la fonte. La variation temporelle des débits de fonte sera examinée aux échelles journalières, annuelle et décennale (analyse similaire à celle de la précipitation). Des années

extrêmes (forte et faible fusion) seront identifiées à titre de comparaison avec le bilan de masse et la précipitation. Ce travail permettra ensuite de relier les propriétés de la saison de pluies aux évolutions des débits de fonte, du bilan de masse et de l'altitude de la ligne d'équilibre (ELA).

Dans le cadre d'une coopération scientifique initiée en 1991 entre l'IRD et l'IHH (Instituto de Hidraulica e Hidrologia de l'Université Major, UMSA) en Bolivie, un réseau de stations a été installé pour connaître la variation des bilans de masse glaciaires en relation avec le climat et les ressources en eau en Bolivie, notamment sur les glaciers du Zongo, Charquini et Chacaltaya (disparu depuis). Ce réseau a permis de récolter des données météorologiques, pluviométriques, hydrologiques et glaciologiques sur une période de 19 ans (1992-2010). Les détails reliés au traitement de l'information pluviométrique et météorologique sont décrits dans les rapports techniques annuels, élaborés par le personnel de GREAT-ICE en coopération avec ses partenaires (<http://www.lgge.ujf-grenoble.fr/ServiceObs>). Toutes les données utilisées dans le présent travail sont décrites dans le chapitre II.

CHAPITRE I

CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ETUDE (VALLEE DU ZONGO, VILLE DE LA PAZ ET L'ALTIPLANO).

I.1 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

La zone d'étude est située entre les coordonnées 16°0.1 S - 68°20'O et 17°15'S - 67°54'O dans un rayon d'environ 140Km. Elle s'étend depuis la section moyenne de la vallée du Zongo jusqu'au côté Nord-est de l'Altiplano (Fig. I-1). Deux grandes chaînes montagneuses entourent l'Altiplano bolivien, la cordillère royale à l'est et occidentale à l'ouest qui influencent le climat de la région. Le glacier étudié est situé dans la cordillère Royale.

La cordillère Royale présente une direction NO - SE et sépare l'Amazonie de l'Altiplano, en formant une barrière orographique de flux troposphériques, qui provoque une faible humidité sur l'Altiplano [Montes de Oca, 1995 ; Ronchaill, 1995 ; Garreaud et Wallace, 1998 ; Garreaud et Aceituno 2000] Cette cordillère contient des sommets qui atteignent 6000m d'altitude. Au-dessus de 4600 m se développent de nombreux glaciers de superficies variant de 0.5 à 2.5km² [Soruco, 2008]. Le glacier du Zongo fait partie de ces glaciers avec une surface d'environ 1.8 km² [Rapport GlacioClim 2009-10]. Il est situé à 16°15'S et 68°10'W et s'étend de 4900 à 6000m d'altitude. Son exposition sud-est fait qu'il est plus protégé du rayonnement solaire que les glaciers ayant une exposition nord [Soruco, 2008].

Quatre régions climatiques se distinguent dans la zone d'étude : la vallée du Zongo (sections basses et haute), la ville de La Paz et l'Altiplano (Fig. I-1). Chacune de ces régions présente des caractéristiques pluviométriques différentes qui seront décrites dans le chapitre III.

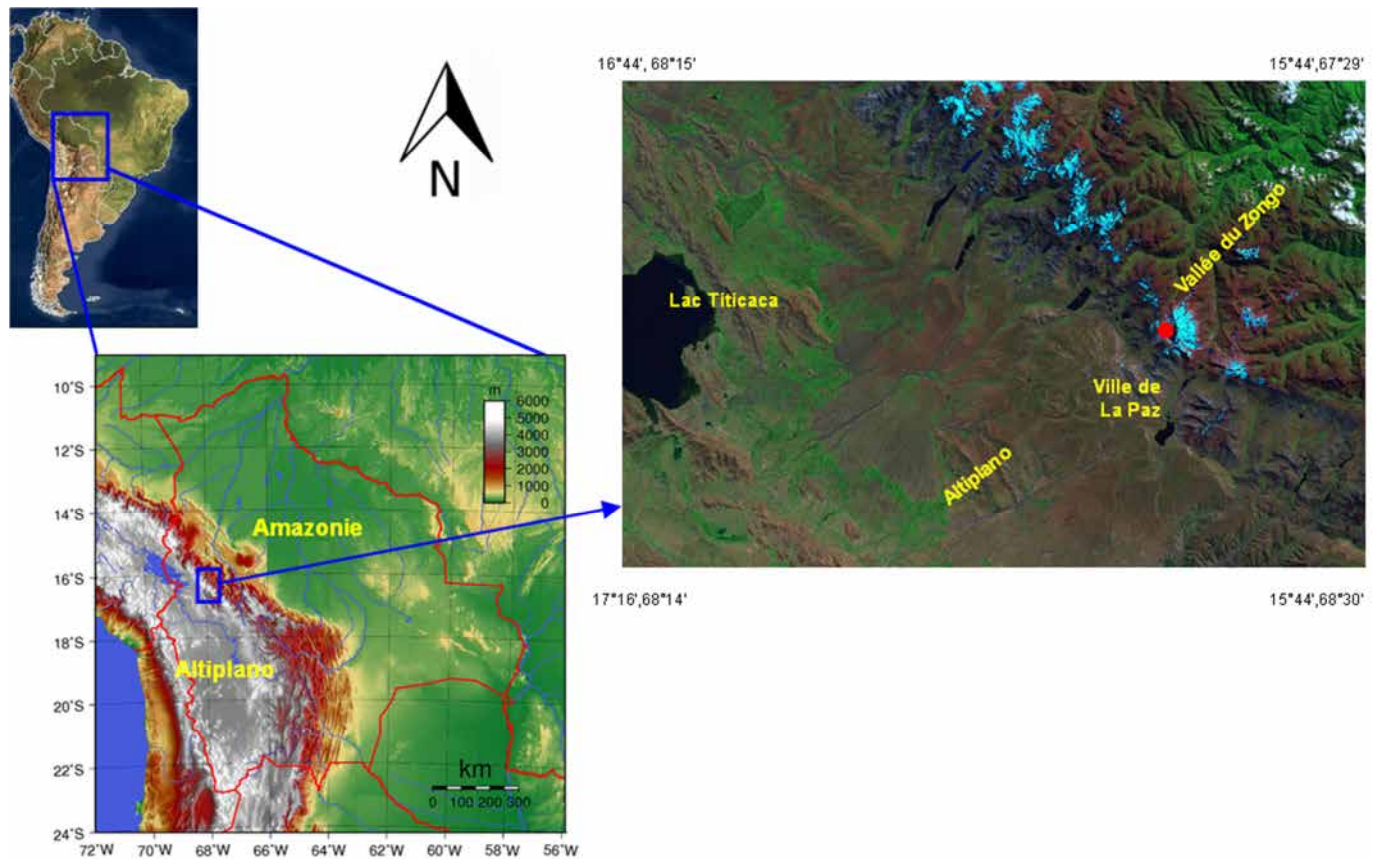


Figure I 1.- Situation géographique de la zone d'étude avec l'Amazonie et l'Altiplano séparés par la cordillère Royale. Le zoom à droite permet de localiser la vallée du Zongo, la ville de La Paz, l'Altiplano et le glacier du Zongo (point en rouge). Source : Image Landsat à 15m de résolution

I.1.1 La vallée du Zongo

La vallée du Zongo (encadrée par les coordonnées : $16^{\circ}02'S$, $68^{\circ}09'O$ et $16^{\circ}27'S$, $68^{\circ}00'O$), constitue un bassin en forme de « V » avec un fort gradient altitudinal. Elle est limitée au sud-ouest par les sommets du Huayna Potosi (6000 m) et du Charquini (5400m) et au nord-est par l'exutoire du bassin à Huaji (942m) sur une distance d'environ 40Km. La rivière du Zongo est un affluent de la rivière Coroico qui rejoint la rivière du Béni pour ensuite rejoindre la Madera, un des principaux affluents du fleuve Amazone.

La vallée est fortement inclinée et relie la région des Yungas à l'Altiplano. Les fortes pentes font un lieu idéal pour la production d'énergie électrique qui alimente les Villes de La Paz et El Alto. Une dizaine d'usines hydroélectriques sont installées en cascade entre 4250m et 945m (Fig. I-2), et mettent à profit les fortes pentes de la vallée pour alimenter leurs turbines, avec des conduites forcées pouvant atteindre des hauteurs de chute de 835 m. La puissance totale du système est de 174,6 MW [Caballero, 2001].

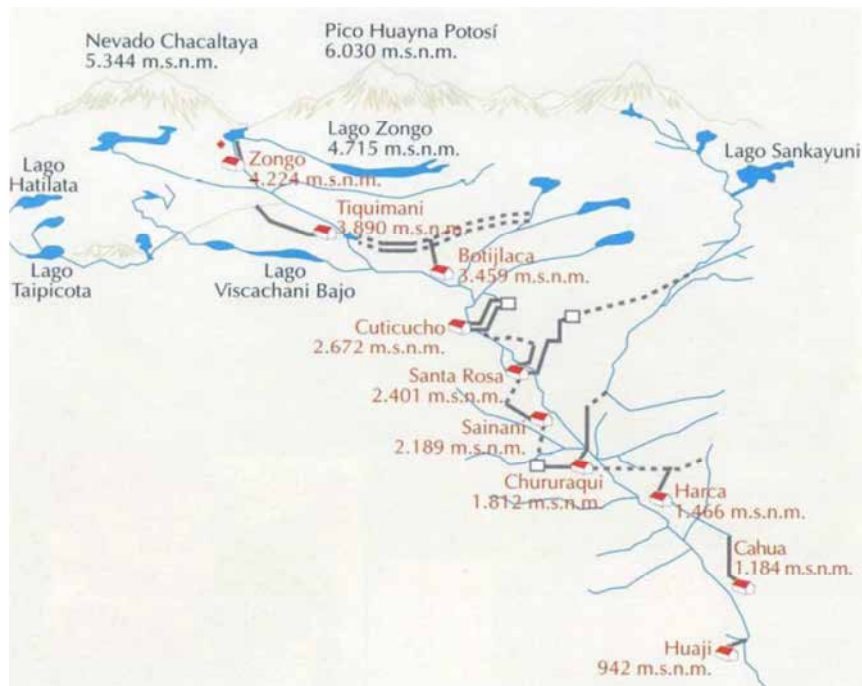


Figure I 2.- Schéma descriptif de l'organisation des aménagements hydrauliques pour la production d'électricité dans la vallée du Zongo [d'après, [Caballero, 2002]]

I.1.2 La ville de La Paz

La ville de La Paz présente une altitude moyenne de 3600 m.s.n.m au centre-ville. Elle est située au sud de la cordillère Royale et au nord-est de l'Altiplano Bolivien (Fig. I-1). La rivière « Choqueyapu » traverse la ville et prend sa source dans le massif du Chacaltaya et plus au sud prendre le nom de la rivière « La Paz ». Le climat à la ville de La Paz est plutôt lié à l'Altiplano (froid et sec) et les sources d'humidité qui génèrent les précipitations proviennent de l'Amazonie [Ronchail, et al., 2006]. La proximité au bassin amazonien fait que cette région présente une précipitation annuelle plus forte que celle de l'Altiplano sud ou nord-est.

I.1.3 L'Altiplano

L'Altiplano (Fig. I.1) constitue un grand plateau situé entre les cordillères Occidentale et Orientale avec une altitude qui varie entre 3500 et 4000 m. Il présente une surface de bassin de 136229 km² qui représente 12% du territoire de la Bolivie. L'humidité nécessaire pour développer des activités convectives sur l'Altiplano provient du côté amazonien (à l'est du plateau). Les masses d'air chargées d'humidité ont une trajectoire nord – sud, en suivant la trajectoire de la mousson sud Américaine (voir I.2.5). Le sud, où se trouvent les salars, est donc la région la plus sèche de l'Altiplano de par son éloignement des sources d'humidité essentielles pour la pluie [Montes De Oca, 1995; Ronchail, 1995]. En général, l'Altiplano est caractérisé par des faibles précipitations (<1000mm par an), des basses températures, des grandes amplitudes thermiques journalières et des épisodes de gels fréquents [Andressen, et al., 2007]. Il est aussi caractérisé par une forte radiation solaire qu'est comprise entre 600 et 1000 W m⁻²

[Aceituno, 1998 ; Hardy et al., 1998), un air sec et une forte évaporation potentielle, d'environ 4.1 mm/j (Vacher, et al., 1988).

I-2.- CONTEXTE CLIMATIQUE : LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE DE L'HEMISPHERE SUD

I.2.1 Variations saisonnières astronomiques : Equinoxes et solstices

Les variations climatiques saisonnières sont construites par un double facteur : d'une part la révolution de la Terre autour du Soleil, et d'autre part l'inclinaison de l'axe nord-sud de rotation journalière de la Terre par rapport au plan de son orbite autour du Soleil (écliptique).

En fonction de la position de la Terre par rapport au Soleil sur son orbite, la zone qui reçoit les rayons du Soleil de façon perpendiculaire change. Plus les rayons arrivent proches de la perpendiculaire (c'est-à-dire plus le Soleil est proche du zénith), plus il fait chaud.

Solstices et équinoxes correspondent à des époques et à positions remarquables de la Terre sur son orbite autour du Soleil. (Fig.-I-3). L'axe de rotation de la Terre est incliné de $23^{\circ}27'$ par rapport à la normale au plan de l'écliptique (plan de l'orbite de la Terre). Il reste parallèle à lui-même pendant la rotation de la Terre autour du Soleil. Dans le plan équatorial, ce sont les équinoxes, moments où les rayons du Soleil arrivent perpendiculairement sur l'axe de rotation de la Terre. Les rayons du Soleil sont donc parallèles à l'équateur. Cela a pour conséquence que la durée du jour et de la nuit sont égales partout sur Terre, d'où l'origine du mot équinoxe. Les plus éloignés du plan équatorial, sont les solstices ; moments où les rayons du soleil sont les plus inclinés sur l'équateur. Ci-dessous nous nommons les dates d'occurrence :

- L'équateur, vers le 20 ou 21 mars, à l'équinoxe de printemps (hémisphère nord) ou d'automne (hémisphère sud)
- Le tropique du Nord, vers le 20 ou 21 juin, au solstice d'été (hémisphère nord) ou d'hiver (hémisphère sud)
- L'équateur, de nouveau, vers le 22 ou 23 septembre, à l'équinoxe d'automne (hémisphère nord) ou de printemps (hémisphère sud)
- Le tropique du Sud, vers le 21 ou 22 décembre, au solstice d'hiver (hémisphère nord) ou d'été (hémisphère sud).

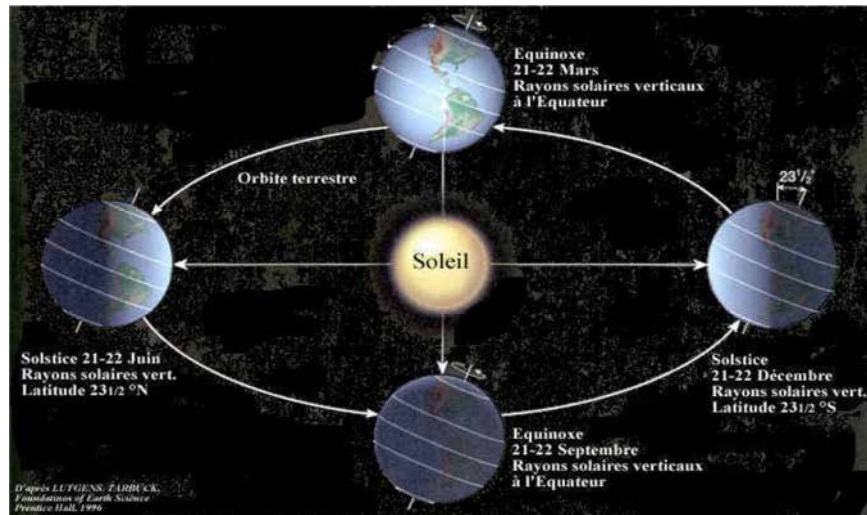


Figure I 3.- Position de la Terre sur son orbite autour du Soleil, ce qui marque des alternances de saisons [source : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/>]

I.2.2 Variation de la précipitation et la température au cours de l'année : Un zoom dans la vallée du Zongo la Ville de La Paz et l'Altiplano

Le climat saisonnier aux tropiques externes est caractérisé, d'une part par une saison humide (été austral) avec des cumuls de pluies importantes, et d'autre part une saison sèche marquée (hiver austral). Les températures quant à elles varient peu au cours de l'année. La Fig. I-4 montre les variations mensuelles moyennes de la précipitation et la température au cours de l'année sur l'Altiplano (Ayo Ayo, Patacamaya et Collana), La Paz (Villa Copacabana et San Calixto), et la section plus bas de la vallée du Zongo (Harca et Sainani) (Fig. II.1 pour voir les stations)

Sur l'Altiplano et ville de La Paz 70% de la précipitation annuelle est concentré en moyenne entre les mois de décembre et mars, par contre cette valeur change plus au nord, donc vers l'Amazonie où ces mois réunissent environ 60% de la précipitation annuelle. Sur l'Altiplano, la période plus humide (décembre à mars) est caractérisée par des événements de précipitation de type convectifs intenses [Garreaud, 1999] qui arrivent surtout pendant la nuit [Giovannettone et Barros, 2008]. La vallée du Zongo expérimente des précipitations de type orographique, à cause de son gradient altitudinal. Ensuite, une saison sèche se met en place entre le mois d'avril et août, et est caractérisée par une diminution notable de la précipitation (Fig. I-4). Une analyse plus en détail de la distribution mensuelle de la pluie de chaque pluviomètre étudié est conduite dans le chapitre IV.

En raison de la faible latitude, la variation au cours de l'année de la température est moins marquée que pour la précipitation. Le régime thermique a des caractéristiques d'une région de haute altitude et est contrôlé par les variations saisonnières de la nébulosité et de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Durant l'hiver austral, la faible nébulosité cause une

forte perte nocturne en radiation thermique, associée avec un fort refroidissement de la surface. En revanche durant l'été austral, l'augmentation de l'humidité atmosphérique et de la nébulosité fait que le refroidissement nocturne de surface est plus modéré [Aceituno, 1996]

Ainsi, les températures maximales ont lieu entre octobre et mars suivi d'une diminution progressive à partir d'avril jusqu'au mois de juillet. Au Nord - Est de l'Altiplano et à la ville de la Paz, les températures maximales mensuelles atteignent 11° et 19°C, respectivement, surtout au cours des mois de novembre et décembre. En revanche, les plus basses températures sont trouvées entre les mois de juin et juillet et peuvent descendre autour 6°C et 16°C en moyennes mensuelles respectivement (Fig. I-4). Les températures vont progressivement diminuer vers le sud de l'Altiplano, en atteignant des valeurs proches de 0°C en moyenne durant l'hiver, et d'environ 11°C durant l'été (valeurs près des salars). Les températures de la vallée du Zongo sont les plus élevées de la zone d'étude avec des valeurs mensuelles maximales de l'ordre de 22°C (octobre et novembre) et des valeurs minimums de 18°C (juin – juillet).

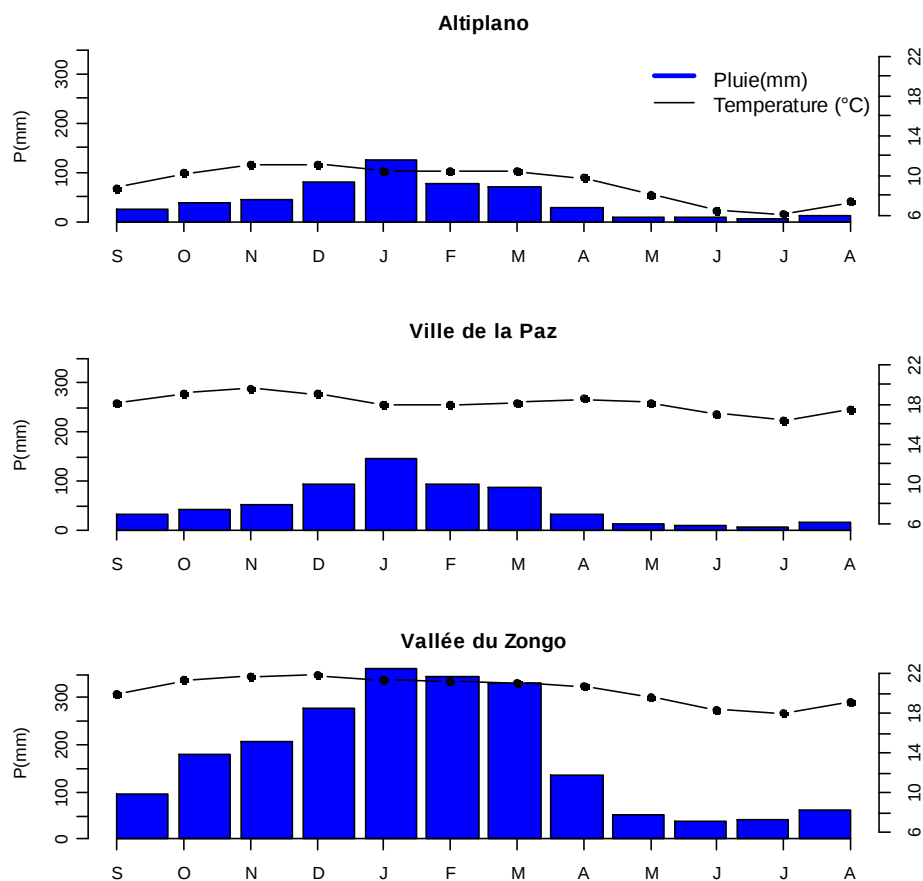


Figure I 4.- Précipitations et températures mensuelles moyennes sur une période de 32 ans pour la précipitation (1978-2010) et 20 années pour les températures (1988-2008) a) l'Altiplano (moyenne des stations Ayo Ayo, Patacamaya et Collana) b) la ville de La Paz (la précipitation est issues de la moyenne des stations de San Calixto et Villa Copacabana et la température est celle de San Calixto), et c) la vallée du Zongo (moyenne de Harca et Sainani). Début de l'année hydrologique : 1^{er} septembre

Certaines études sur les Andes montrent que durant la saison des pluies (décembre, janvier et février), la température augmente en moyenne 0.10°C par décennie entre 1950 et 1998 (Vuille et Bradley, 2000). Par rapport à la précipitation des analyses statistiques montrent une diminution entre 10 et 24% en saison humide et 18% en saison sèche [Garreaud et Minvielle, 2011 ; Seiler, 2012]. Sur cette région les modèles de circulation générale (GCM) montrent peu de modifications de la quantité de précipitation annuelle, cependant un déficit est observé durant la saison humide à une échelle régionale. A une échelle locale cette tendance n'est pas significative. Ces modèles révèlent aussi que depuis 1950 la température annuelle a une augmentation de 0.15°C (Vuille, 2000). Ces résultats généraux sont à mettre en relation avec les caractéristiques temporelles de notre zone d'étude, cela sera fait dans le chapitre III.

I.2.3 Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT)

Aux tropiques, la saisonnalité de la précipitation est liée au mouvement de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT). Cette zone est une ceinture de basses pressions qui entoure la planète. Elle est formée par la convergence des systèmes des vents alizés en provenance de deux hémisphères entre 5°N et 5°S .

La circulation méridienne de l'air intertropical dans les cellules de Hadley

Ces cellules convectives se développent depuis la surface jusqu'au sommet de la troposphère dans des plans verticaux méridiens. Elles sont régulièrement réparties de part et d'autre de la ZCIT. En régulant la circulation méridienne de l'air tropical, elles contribuent aux transports de chaleur des zones équatoriales vers les zones tempérées. Confluant dans la ZCIT, les alizés océaniques procurent à l'air intertropical, sous forme d'apports en mouvement, humidité et chaleur, l'énergie nécessaire au déclenchement de la convection humide profonde. La ZCIT est donc le lieu d'ascendances considérables qui provoquent le soulèvement en bloc de la tropopause (jusqu'à environ 16000 m au-dessus de son altitude moyenne globale) (Fig. I-5). Simultanément, l'air humide emporté dans ces ascendances se condense au fil de son ascension. La chaleur latente alors libérée entretient et accentue le processus ascensionnel. Au-dessus des océans et des forêts tropicales se développent ainsi, à très grandes échelles spatio-temporelles, d'immenses tours de nuages cumuliformes à caractère orageux.

L'air entraîné dans ces mouvements verticaux s'assèche au fil de son ascension. Il arrive donc au sommet de la troposphère doté d'énergie de mouvement. En contrepartie, il se trouve appauvri de l'énergie qu'il détenait initialement en basses couches sous forme de chaleur latente. A haute altitude, les gradients méridiens de pression sont plus marqués que les gradients zonaux, et la proximité de l'équateur limite l'accélération de Coriolis. Cela minimise l'effet de déviation zonale des trajectoires des particules d'air.

Dans la haute troposphère et dans chaque hémisphère, l'excédent d'air (sec) riche en quantité de mouvement s'évacue vers les zones subtropicales et s'écoule suivant des lignes de flux Nord-Sud faiblement descendantes (parallèles aux surfaces isobares). Une partie de ces flux d'altitude est prise dans les subsidences générées par les anticyclones subtropicaux et redescend jusqu'en basses couches pour à nouveau alimenter les alizés. L'autre partie de ces flux rejoint les latitudes tempérées et se fond progressivement dans la circulation générale d'Ouest. [D'après [Lejeune 2009]]

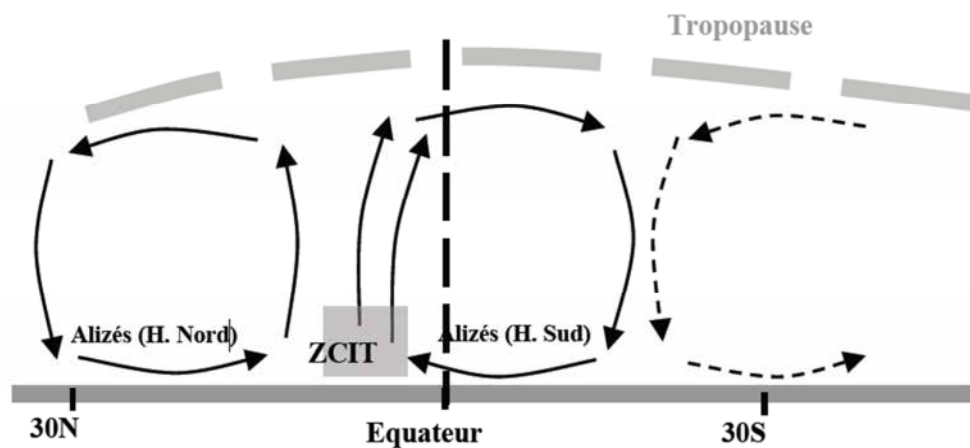


Figure I 5.- Représentation schématique de la circulation troposphérique dans les cellules méridiennes de Hadley (suivant une coupe méridienne avec la ZCIT située à environ 5° au Nord de l'Equateur) [Source [Lejeune, 2009]]

Pendant l'hiver austral de mai à août, la ZCIT se trouve au Nord de l'Equateur vers 10°N et les anticyclones tropicaux engendrent un climat froid et sec en Bolivie. Pendant l'été austral, de septembre à mars, la ZCIT descend plus au Sud, et est à l'origine d'un climat chaud et humide sur l'Altiplano (Fig. I-6). La saisonnalité des pluies est plus marquée pour les tropiques externes que pour les tropiques internes humides. Vers 15°S la saison des pluies (Décembre, Janvier et Février) concentre environ 40% de la précipitation annuelle, alors l'hiver austral, entre le moins de juin et août en concentre 10%. Plus au sud vers 17°S, la saison des pluies concentre plus du 60% du total annuel et la saison sèche seulement 10% [Jaffrain, et al., 2008]

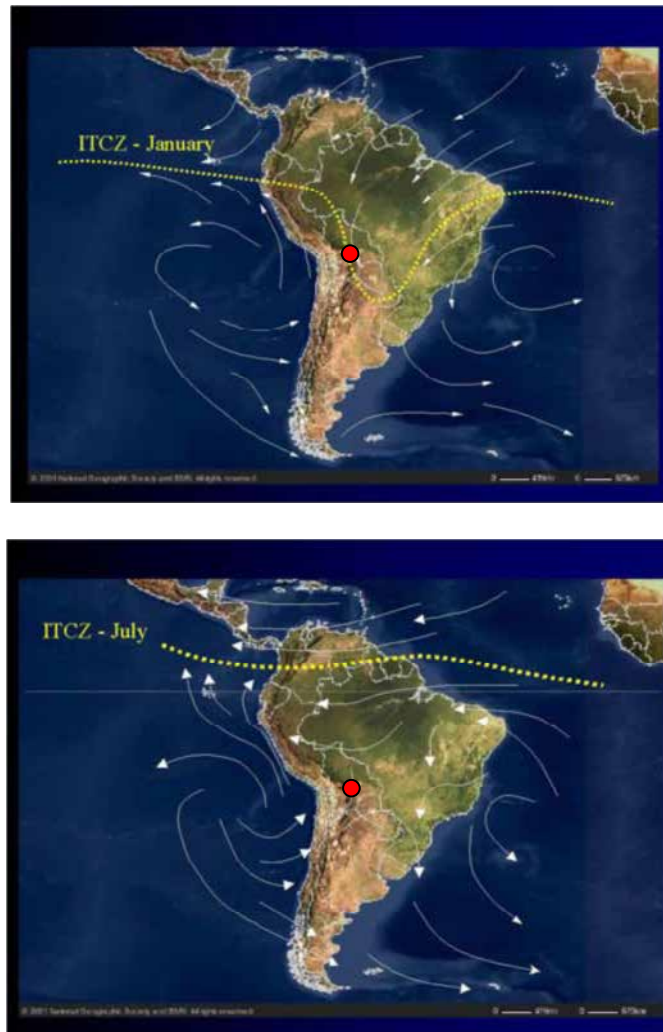


Figure I 6.- Les flèches représentent le déplacement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). En haut durant le mois de janvier et en bas durant le mois de juillet [Source [Ramirez E, 2003]]. Les points en rouge représentent le site d'étude.

I.2.4 Le système de haute pression « Bolivian High »

Dans la haute troposphère une importante structure de haute pression est développée vers 200 hPa au cours de l'été austral et positionnée entre 17°S - 70°O (Fig. I-7). Ce système, dénommé «Bolivian High» (BH), est un proéminent anticyclone positionné sur l'Altiplano. Verticalement la BH est caractérisée par un noyau chaud enveloppé par une partie froide ; les températures chaudes s'étalent depuis la surface et atteignent leur maximum autour de 300 hPa.

La BH est associée à une circulation cyclonique de basses pressions provenant de la partie nord-est du Brésil et d'une zone de convergence le long des côtes du Pérou et de l'Equateur [Garreaud et Aceituno, 2007]. Ce système est la réponse de la dynamique du réchauffement de la haute troposphère, causée par la libération de chaleur latente au-dessus du bassin amazonien durant l'été [Aceituno, 1996] et par la pénétration frontale du

côté sud est, de vents froids associés avec la SACZ⁽¹⁾ (South Atlantic Convergence Zone) [Kodama, 1992].

Les premiers auteurs pensaient que la BH était le résultat du réchauffement adiabatique de l'Altiplano, par contre des résultats plus récents issus de simulations numériques à partir de modèles climatiques montrent que cette région n'est pas essentielle pour son développement bien que les Andes régulent la distribution des vents et les convections sur la partie moyenne du continent [Garreaud et Aceituno., 2007 ; Lenters et Cook, 1995].

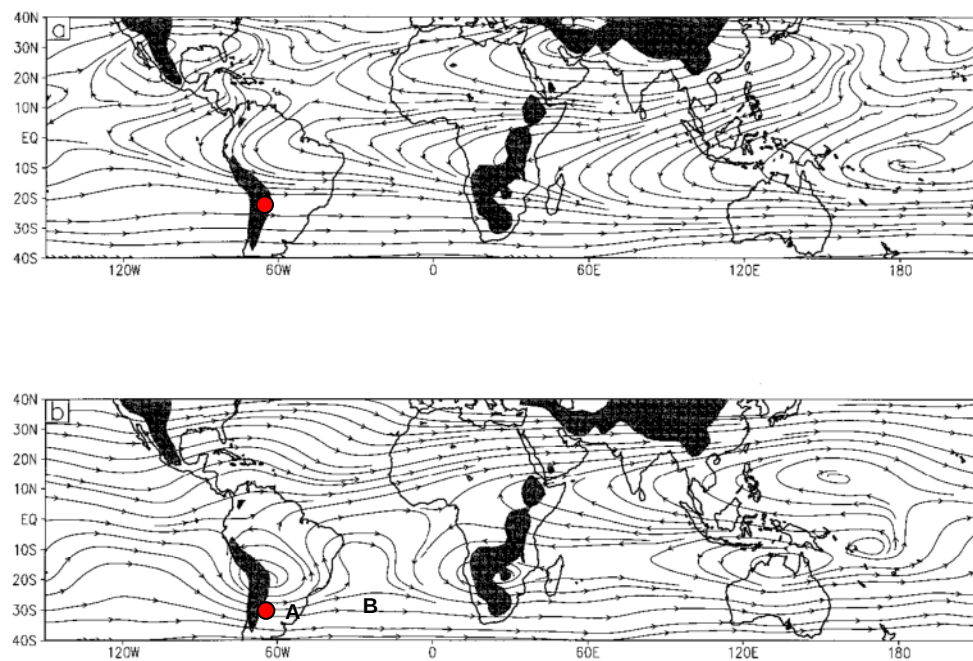


Figure I- 7.-Carte des régimes des vents à 200 hPa. a) flux de vent en juillet (hiver) qui se caractérisent par une circulation d'ouest assez uniforme au niveau de l'Amérique du Sud. b) flux de vent en janvier (été) qui présentent généralement des similitudes avec les flux de juillet cependant au niveau de la Bolivie il se forme une zone de hautes pressions (Bolivian High) signalée avec la lettre A et une zone de basses pressions à l'Est dans l'Atlantique (B). Les régions en noir indiquent une topographie qui excède 1km et le point rouge indique le site d'étude [Source [Ramirez, 2003]]

La position et l'intensité de la BH ont une influence directe sur la distribution spatiale et temporelle des précipitations, surtout de l'Altiplano. En été, il existe une forte relation entre ce système et les activités pluvieuses sur ce plateau [Vuille, 1999]. Durant l'hiver la BH se déplace vers le nord et laisse l'Altiplano sous l'influence des vents provenant de l'ouest.

⁽¹⁾La SACZ es une bande convective de basse pression (850hPa) associée à de fortes précipitations qui s'étendent sur un axe Nord-Ouest, Sud-Est dans une région de l'Atlantique ouest délimitée approximativement entre 20° et 40°S, 50° et 20°W. Celle-ci est issue de la rencontre du jet subtropical, associé à l'Anticyclone Sud Pacifique (ASP), qui balaye le continent sud-américain d'ouest en est et du jet de basse couche polaire à la périphérie de l'Anticyclone Sud Atlantique [Kodama, 1992].

I.2.5 Le Système de Mousson de l'Amérique du Sud (SAMS)

Le terme mousson est caractérisé par une inversion saisonnière de la circulation atmosphérique à grande échelle, entraînant généralement des étés humides et des hivers secs. Des études ont mis en évidence la présence d'un tel système en Amérique du sud [Virji, 1981 ; Zhou et Lau, 1997 ; Vera, et al., 2006], nommée « Mousson Sud-Américaine » (SAMS : South American Monsoon System, Fig.8). L'origine de ce système est durant l'été et il vient du contraste de pression entre les continents et les océans. Ses principales composantes sont des activités convectives sur l'Amazonie et le « South Atlantic Convergence zone (SACZ) » qui contribue au transport de l'humidité vers l'Altiplano (Carvalho, et al., 2003) et y joue un important rôle sur la saisonnalité des précipitations [Carvalho, et al., 2011]

Le continent Sud-américain présente deux caractéristiques typiques d'un climat de Mousson: i) si la moyenne annuelle est enlevée, les vents de surface vont être inversés en association avec le réchauffement de l'Altiplano (Fig. I-8b); ii) l'existence de deux saisons bien marquées : hiver et été [Zhou et Lau 1997].

Durant la saison humide, le continent échauffé donne lieu à la dépression du Chaco et à un afflux d'air humide depuis l'Atlantique nord. Celui-ci, porté par les alizés de nord-est, est dévié vers le sud-est par les Andes et apporte de la vapeur d'eau vers l'Altiplano et l'Amazonie méridionale ; à ce vent dit « de nord-ouest » à l'est des Andes correspond la mousson sud-américaine [Espinoza, 2009]

La phase de rétractation de la SAMS à la fin de l'été, est déterminée par une incursion des vents de l'ouest provenant des latitudes moyennes (vents plutôt faibles). (Fig. I-8c). En même temps, il existe une réduction des vents de basses altitudes, diminuant le transport de l'humidité et donc terminant les fortes précipitations surtout sur l'Altiplano [Zhou et Lau, 1997].

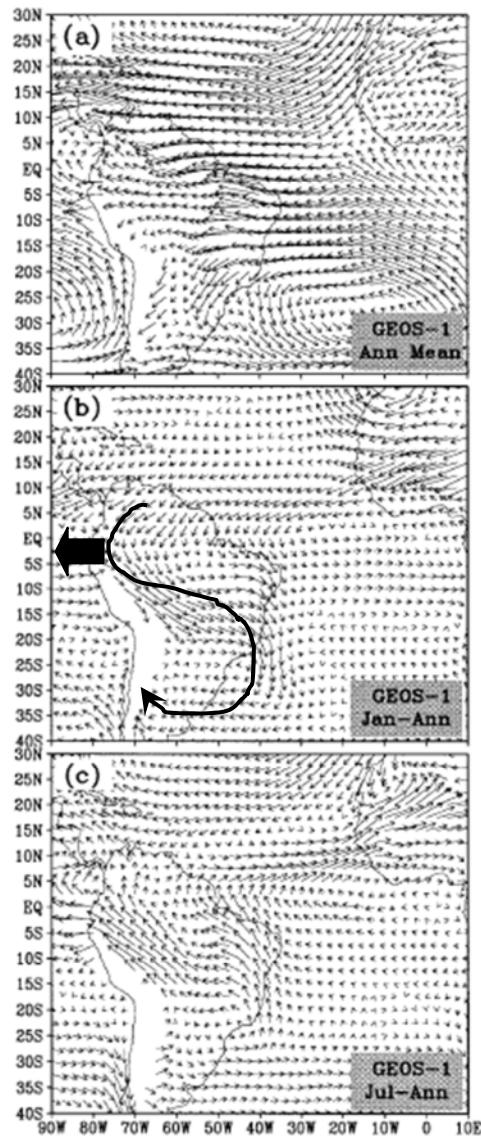


Figure I 8.-Déplacement des vents ($m.s^{-1}$) à 900- hPa (a) Moyenne annuelle (b) Janvier moins la moyenne annuelle. La ligne et la flèche en noir montrent l'effet inverse des vents en collisionnent avec les Andes, et le trajet de vents provenant de l'atlantique. (c) Juillet moins la moyenne annuelle. [Source [Zhou and Lau, 1997]].

I.2.6 Phénomène El Niño/La Niña

I.2.6.1 Définition de l'ENSO

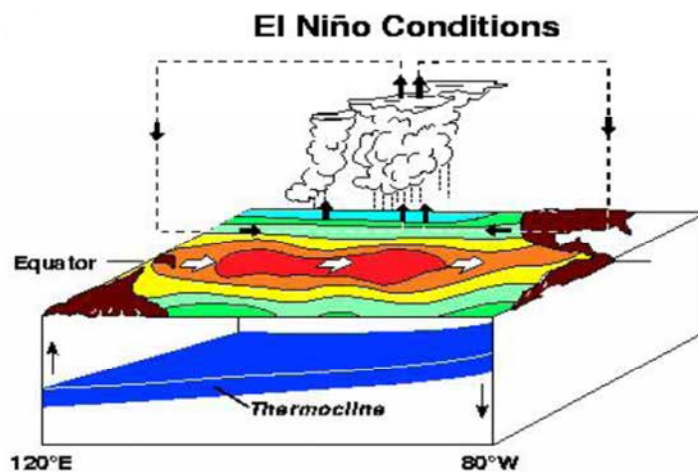
L'ENSO est un phénomène d'interaction océan – atmosphère dans le Pacifique de fréquence irrégulière. Il est relié aux anomalies chaudes et froides dans l'océan pacifique tropical. Une définition pour caractériser cet phénomène est le suivant [Trenberth, 1997]: une phase chaude de l'ENSO est considérée comme effective lorsque, sur une durée d'au moins six mois, les moyennes glissantes (établies sur cinq mois) des températures de surface de l'Océan Pacifique équatorial (sur les zones Niño 3 et Niño 4, soit sur la zone : 5°N-5°S, 120°W-170°W) excèdent un seuil de +0.4°C par rapport à la

moyenne. Chaque événement ENSO présente ses caractéristiques propres qui peuvent modifier les mécanismes de connexions climatiques, et peuvent perdurer plusieurs années [Vuille et Amman, 1997]

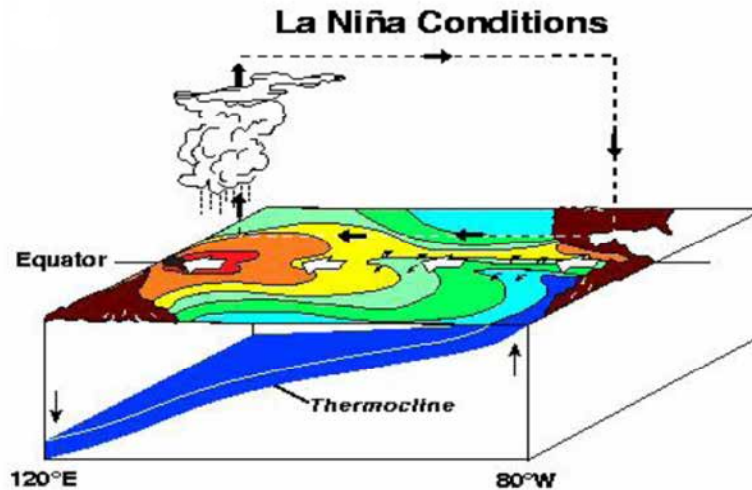
La Fig. I-9 révèle le comportement de l'océan pacifique durant les phases typiquement Niño (chaud) et Niña (froid). Les caractéristiques principales de chaque phase sont décrites ci- dessous.

i) Le phénomène «El Niño» est le résultat du réchauffement de la surface de l'océan Pacifique par l'apport d'eau chaude provenant de l'Ouest et de l'abaissement de la thermocline, qui réduit la montée des eaux froides profondes. Cette période est caractérisée par une augmentation de la température de surface de l'océan entre 3°C et 6°C en moyenne le long des côtes péruviennes et équatoriennes autour des mois de décembre et de janvier, ce qui provoque une activité convective plus forte, et donc des précipitations intenses sur cette région [Pouyaud, et al., 2005]. En plus, une diminution de la pression intervient dans l'ouest du pacifique et se déplace vers l'est qui est remplacé par une zone de haute pression. On observe donc un affaiblissement de vents alizés sur cette région qui provoque une sécheresse anormale dans la région Indonésienne.

ii) Le phénomène «La Niña» est plutôt caractérisée comme la phase froide de l'ENSO, avec des modifications contraires à celles d'El Niño. Les vents alizés sont renforcés, causant un déplacement du courant chaud de surface du pacifique est vers l'ouest, et augmentant la différence du niveau de mer du côté est par rapport au côté ouest, et donc une diminution de la précipitation sur les côtes péruviennes et équatoriennes. Ces effets résultent en une intensification des remontées des eaux profondes sur les côtes est du continent, provoquant un climat froid et sec. Les eaux chaudes sont concentrées dans l'ouest du pacifique tropical et y produisent de fortes précipitations. Les réservoirs de chaleur ainsi formés sont favorables au développement de cyclones tropicaux sur la région d'Indonésie.



a) Phase chaude « El Niño »



b) Phase froide «La Niña »

Figure I -9.- Caractéristiques principales du phénomène ENSO

a) Phase chaude « El Niño » : Diminution des vents alizés, déplacement de la masse de l'eau chaude en surface de l'Océan Pacifique vers l'est et abaissement de la thermocline entre 120°E et 80°O

b) Phase froide « La Niña » déplacement de la masse d'eau chaude en surface de l'Océan Pacifique d'ouest vers l'est. Renforcement de vents alizés et abaissement de la thermocline entre 120°E et 80°O [<http://www.pmel.noaa.gov>]

Pour caractériser les phases chaude et froide de l'ENSO, différentes variables climatiques sont mesurées dans l'océan pacifique et son atmosphère. Ci-dessous nous décrivons ces variables transformées en index : MEI, SOI, Niño Modoki, PDO, SATL et NATL. Ces index seront utilisés dans une analyse des relations entre l'ENSO et la variabilité interannuelle de la précipitation dans le chapitre III.

1.2.6.2 MEI (Multivariate Enso Index)

Le MEI est un index pour caractériser les phases chaude (El Niño) et froide (La Niña) des événements ENSO. Il est calculé à partir de six variables mesurées dans l'océan Pacifique et exprimé avec la première composante principale de toutes les variables analysées conjointement pour le bassin tropical du pacifique [<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei>]

Ces composites sont formés par : la pression de l'air au niveau de l'océan entier (P), les vents en surface de l'océan avec un trajet Est-Ouest (U) et un trajet Nord-Sud (V), la température de la surface de l'océan pacifique (S), la température de l'air (A) et finalement la nébulosité sur le pacifique (C).

Ces variables sont disponibles sur la base de données de COADS (« Comprehensive Océan - Atmosphère data set »). Entre les limites de 2° S et 2°N - 2° E et 2°O depuis l'année 1800 (basé sur de mesures de la pression de l'océan au centre de la cellule de Hadley et de la température de la superficie de l'océan), et entre 1°S et 1°N - 1°E et 1°N depuis l'année 1950 (Fig. I-10).

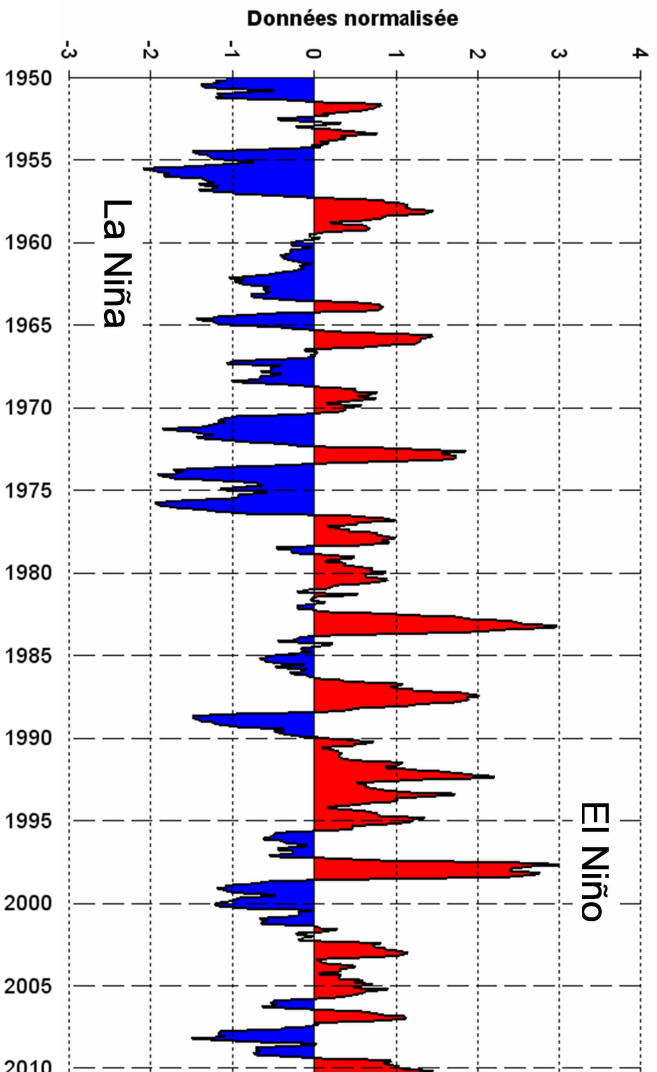


Figure 1 10.- Données normalisées de l'indice MEI (Multivariate Enso Index) depuis 1950 sur une fenêtre glissante de 5 mois. En rouge la phase chaude (Niño) et en bleu la phase froide (Niña) [www.icoads.noaa.gov]

1.2.6.3 SOI («Southern Oscillation Index»)

De même que le MEI, le « Southern Oscillation Index » (SOI) est un index qui permet de caractériser les événements El Niño/La Niña dans ses phases chaude et froide. Ce phénomène est caractérisé par des anomalies de pression atmosphérique au-dessus de l'océan pacifique. Le SOI est le résultat de la différence de cette pression entre le flanc est (Tahiti -Polynésie Française) et le flanc ouest (Darwin - Australie), exprimé en valeurs centrées réduites. La phase négative du SOI représente une baisse de la pression par rapport à la moyenne à Tahiti et une augmentation à Darwin. Les valeurs du SOI correspondent bien aux changements des températures dans l'océan pacifique. La Fig. 1-11 montre la fluctuation normalisée de cet indice depuis l'année 1950. (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>). En rouge les événements « Niño » et en bleu les événements la « Niña ».

Le cycle d'apparition d'un événement « El Niño » varie irrégulièrement entre 2 et 7 ans [Diaz et MarkGraf, 1992]. Selon cet indice, les deux dernières décennies du XX^{ème} siècle ont été caractérisées par cinq phases chaudes Niño (1982/83, 1986/87, 1991/1993, 1994/95, et 1997/98) et trois phases froides Niña (1984/85, 1988/89, 1995/96). Les deux plus forts « Niño » du siècle ont été les années 1983 et 1998 [Lavado, et al., 2009]

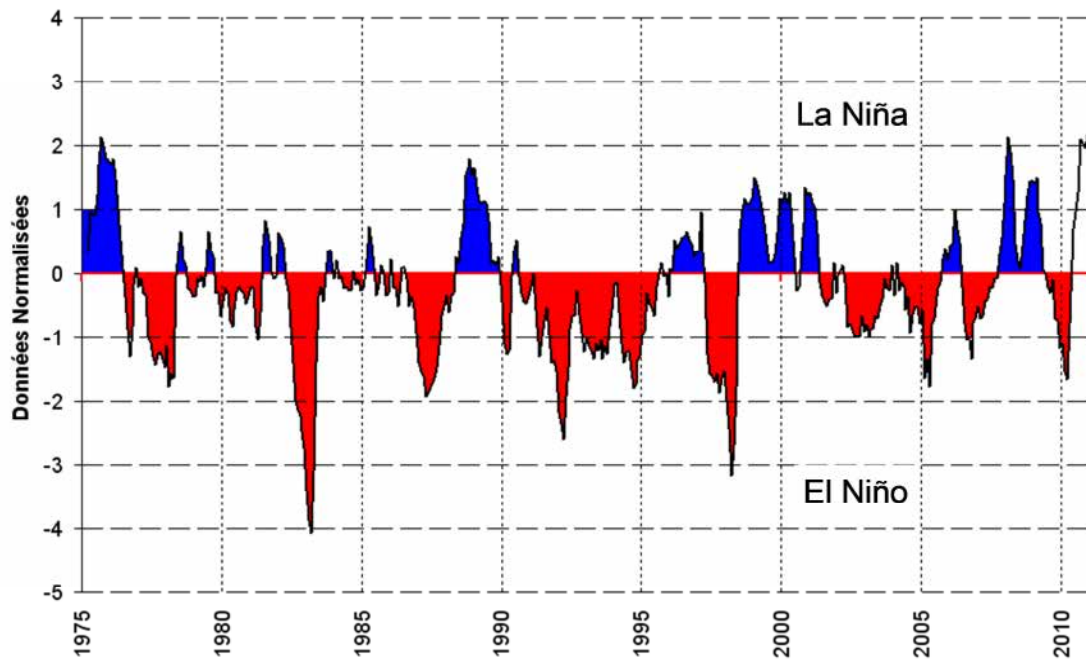


Figure I 11.- Données normalisées depuis 1950 du SOI (Southern Oscillation Index) sur une fenêtre glissante de 5 mois. En rouge la phase chaude (Niño) et en bleu la phase froide (Niña)
(Source : www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/tropics/enso)

1.2.6.4 El Niño« Modoki

El Niño « Modoki» (mot en japonais que signifie similaire mais différent) est une anomalie sur la partie moyenne de l'océan pacifique tropical similaire à El Niño. Par contre les effets sur le climat sont différents par rapport à un Niño conventionnel. Cette nouvelle anomalie pourrait être due aux effets du réchauffement global et affecter les téléconnexions des moyennes latitudes [Yeh, et al., 2009].

La principale différence avec le Niño conventionnel est l'échauffement dans le centre du pacifique tropical (160°E 160°O) entouré par des anomalies SST (Sea Surface Température) plus froides que la normale (Fig. I-13) [Ashok, et al., 2007]. Tandis que lors d'un phénomène « El Niño » les changements de température en surface de l'océan s'observent entre les latitudes 170°E et 100°O .

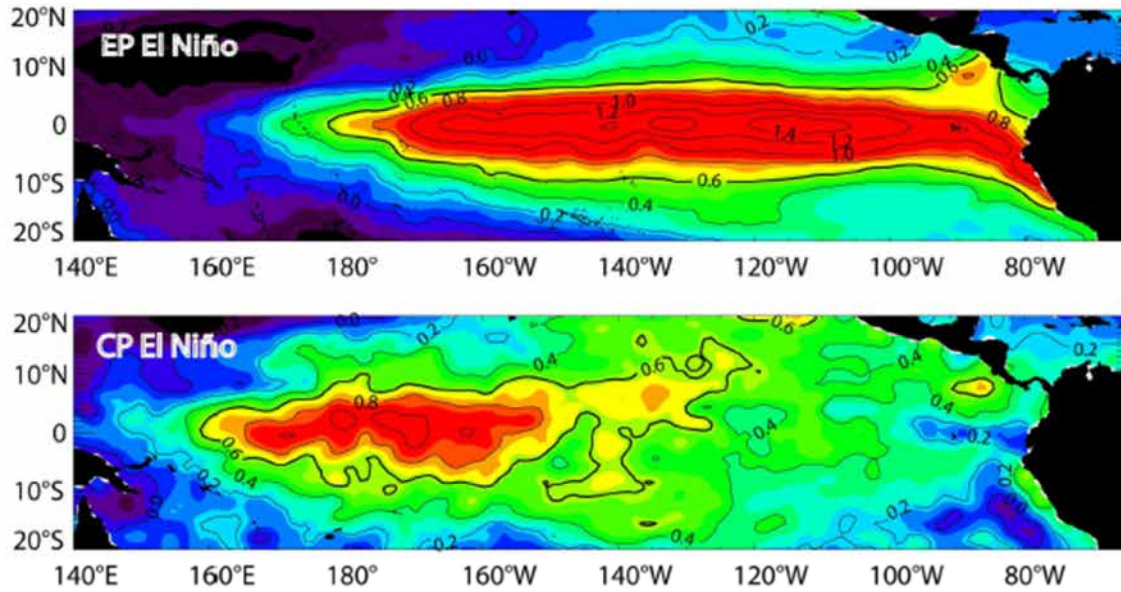


Figure 1.12.- Carte des anomalies de températures composites d'un phénomène El Niño conventionnel (en haut) et du phénomène Modoki (en bas) pour les données Had ISST [Rayner N. et al., 2003] pour la période 1900-2009

Les études du Niño Modoki montrent que sa phase chaude a des conséquences sur différentes parties de la planète. Par exemple en Australie, il existe une diminution de la précipitation dans la partie nord et nord-ouest. Contrairement au Niño, qui provoque le même effet mais dans le nord-est et sud-est du pays.

En Amérique du Sud, le Niño Modoki cause une irrégularité sur la trajectoire des activités convectives depuis le centre de l'Argentine vers le nord, en causant une variabilité inhabituelle de la précipitation. Dans la région est du Brésil il existe une tendance à la diminution des précipitations [Ashok et al., 2007] et un impact dans le trajet Nord-sud (soit plus faible, soit plus intense) de la précipitation sur les côtes nord du Pérou [Lavado et al., 2012]

Deux indices ont été développés pour caractériser cette anomalie i) Trans Niño Index (TNI) et ii) El Niño Modoki Index (EMI). Dans la Fig. I-14, nous montrons la fluctuation normalisée de l'EMI depuis l'année 2000. Cet indice est calculé selon l'équation I-2

EMI (El Niño Modoki Index). [Ashok, et al., 2007]

$$EMI = 1(T_{a,A} - 0.5T_{a,B} - 0.5T_{a,C}) \quad (Eq.I-2)$$

Avec :

T_a : température de surface de la région du Pacifique.

A, B, C : La moyenne de la surface du SST de chaque une des trois zones divisés de la manière suivante : A (165°E–140°W, 10°S–10°N), B (110°–70°W, 15°S–5°N), and C (125°–145°E, 10°S–20°N).

Les données proviennent du site www.jamstec.go.jp de l'agence japonaise JAMSTEC (« Japan Agency for Marine – Earth Science and Technology »). Depuis les années 80, quatre phases chaudes du Niño Modoki ont été identifiées d'après cet indice : 1990-91, 1994-95, 2002-03 et 2004-05 [Li et al., 2010].

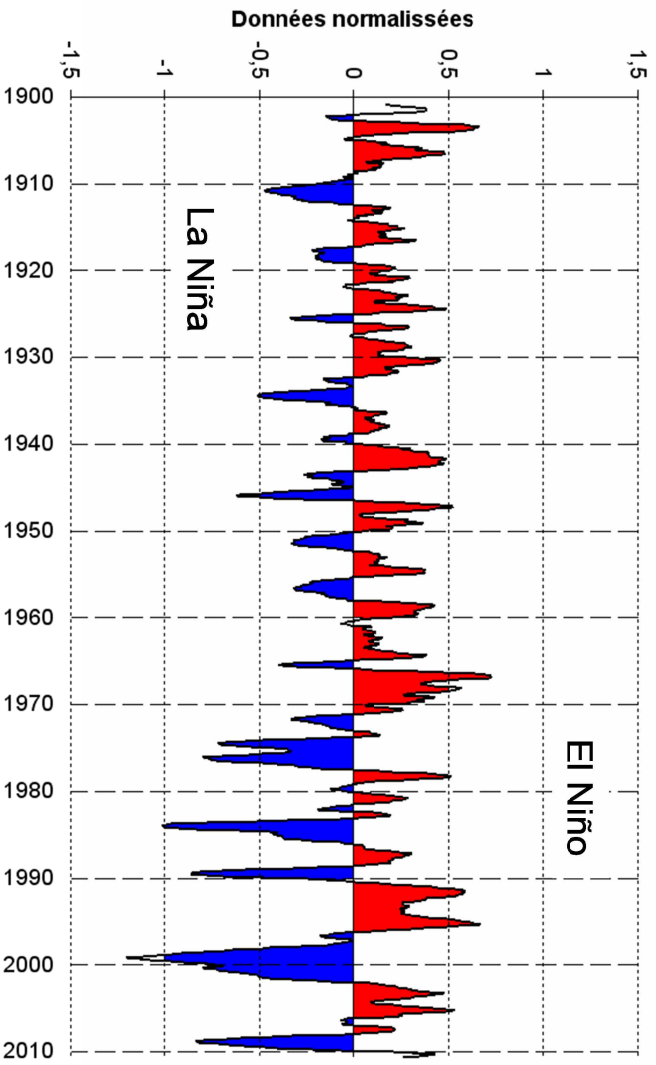


Figure 1.13.- Fluctuation standardisée de l'EMI (El Niño Modoki Index), pour les données HadISST depuis l'année 1900. [www.jamstec.go.jp]

1.2.6.5 Anomalies liées à l'océan Atlantique

Pacifique decadal Oscillation » (PDO)

La PDO est caractérisée par des anomalies de la température de surface de l'est du Pacifique Equatorial (au nord de 20°), et par des oscillations et d'abrupts changements de phase semblables à ceux de El Niño/La Niña. Cette anomalie a été détectée à partir d'une étude sur le changement de la production de saumon dans la partie Nord du Pacifique [Mantua, et al., 1996], et il est décrit normalement comme un phénomène « El Niño » de longue durée. [Zhang et al., 1997].

Quatre principales caractéristiques différencient l'ENSO de la PDO [Espinoza, 2009]:

- Le signal de la PDO dans l'ouest du Pacifique Equatorial est faible, alors que celui de l'ENSO y est fort.
- Dans le Pacifique Equatorial est, le signal de l'ENSO reste confiné près de l'Equateur, tandis que celui de la PDO s'étend vers les régions subtropicales.

- Le signal ENSO est généralement plus fort que celui de la PDO dans l'océan Indien et l'Océan Atlantique.
- Le signal de la PDO au sud-est des îles Aléoutiennes est fort et il s'étend vers l'ouest (vers le Japon). L'ENSO par contre n'a qu'une signature faible dans cette région.

Trois changements majeurs de la PDO ont été documentés depuis les années 1900 (Fig. I-12): de 1925 à 1943 (phase chaude), de 1943 à 1976 (phase froide) et une nouvelle phase chaude après 1976 [Zhang.Y, 1997].

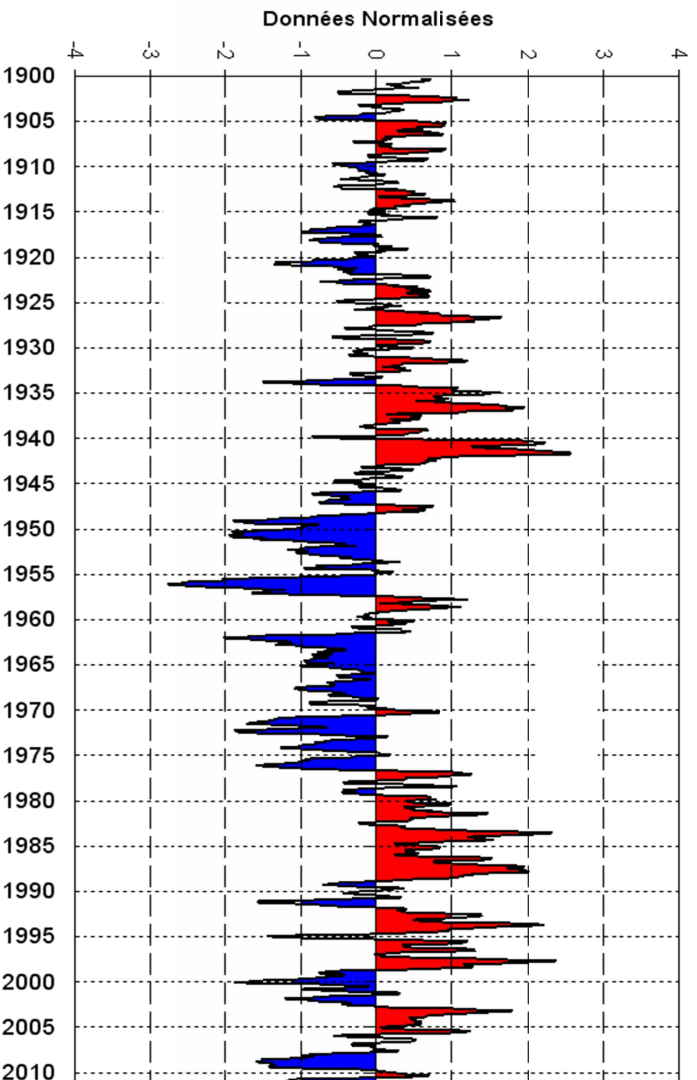


Figure I 14.- Données normalisées de la fluctuation mensuelle de la PDO depuis 1900 sur une fenêtre glissante de 7 mois. En rouge la phase Niño et en bleu la phase Niña [<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.lates>]

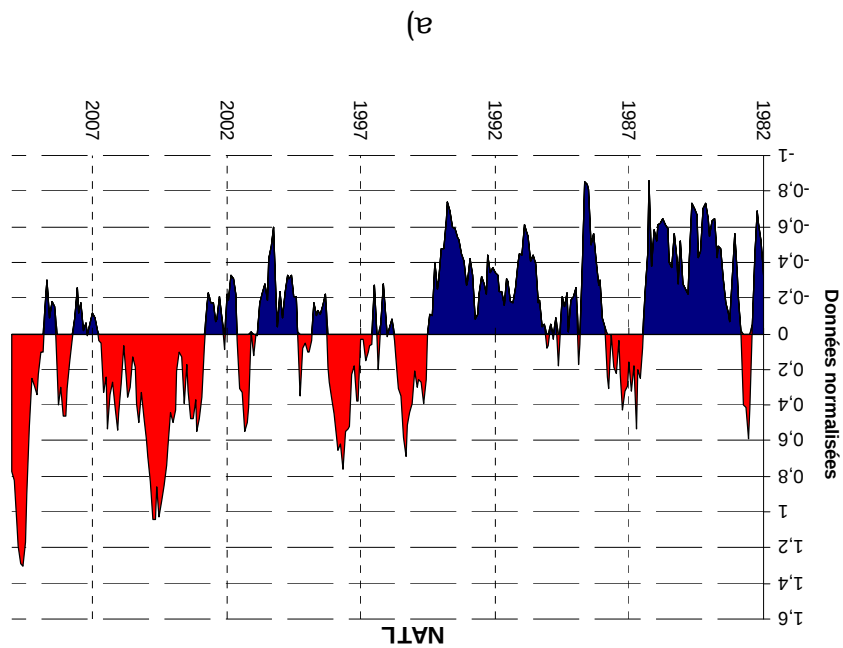
Des études sur la PDO [Seiler, et al., 2012] révèlent que sur une période de 50 ans (1960-2010), 4 événements El Niño se produisent durant la phase positive de la PDO ; comprise entre 1976 et 1999. Tandis que durant la phase froide de la PDO (1960 et 1976), un total de trois événements froids (La Niña) ont été détectés. Durant la dernière décennie (2000-2010), la PDO semble avoir une relation plus proche de la variabilité interannuelle de la précipitation de la Bolivie. Ce travail montre la connexion existant entre la PDO et les événements El Niño – La Niña du pacifique.

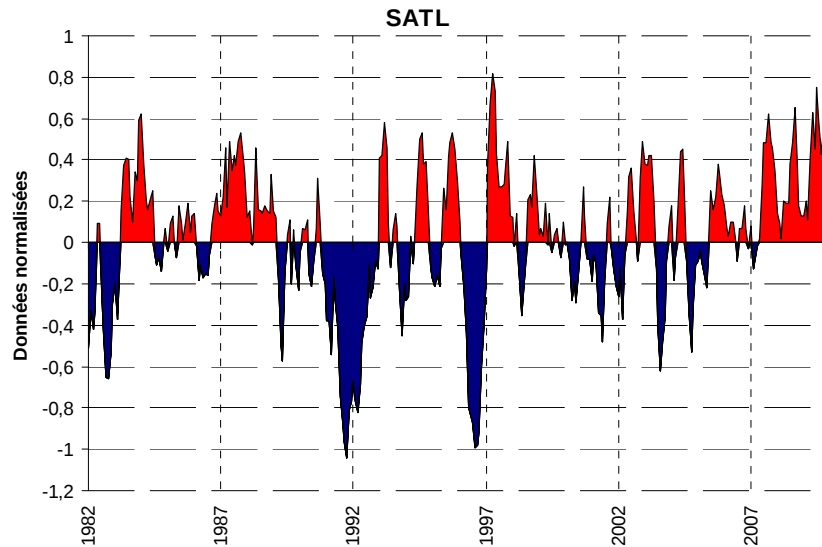
SATL et NATL (Southern et Northern Tropical Atlantic)

Le SATL (Southern tropical Atlantic, 0-20S, 30W-10°E) et le NATL (Northern Tropical Atlantic ; 5-20°N, 60-30°W) sont obtenus depuis les mesures mensuelle de la SST (Sea Surface Température) dans la partie nord et sud de l'Atlantique. La différence standardisée entre NATL et SATL détermine le gradient de la SST [Lavado et al., 2012]. Les données sont

obtenues depuis le mois de janvier 1982 par la NOAA (Fig. 1.-15). Ces données sont accessibles sur le site : <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>. Ces deux indices représentent la variabilité de la SST dans la région nord et sud de l'ITCZ en environ 77% [Enfield, 1996]

Les conséquences de la variation de la SATL et NATL sont documentées, par exemple dans les Caraïbes, en Amérique centrale [Enfield, 1996] et sur la partie Nord-est du Brésil [Saravanan et Chang, 2000]. Dans cette dernière région, le réchauffement de la SATL provoque une augmentation anormale de la pluie. Il faut mentionner que ce réchauffement est aussi lié à la phase chaude du pacifique (Niño), en causant d'une part une réduction de la vitesse du vent dans le trajet NE qui réduit l'évaporation et la perte de chaleur sensible à partir de la couche de surface océanique, et d'autre part le refroidissement dû à l'enracinement dans la zone tropicale de la thermocline [Zebiak, 1993], et donc une hausse de la pluie. Durant une année normale, la variation de la NATL et SATL est contrôlée nettement par la variabilité de la SST [Saravanan et Chang, 2000].





b)

Figure I 15.- Fluctuation mensuelle de données normalisées entre septembre du 1998 à août 2010. a) NATL (Northern Tropical Atlantic) et b) SATL (Southern tropical Atlantic). www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/.

I.3 RELATION CLIMAT – GLACIER – DEBITS DE FONTE

I.3.1 Variations du bilan de masse au cours de l'année des glaciers tropicaux externes.

Le climat contrôle le bilan de masse des glaciers. Les gains de masse proviennent de l'accumulation de la neige, alors que les pertes sont dues à l'ablation au contact à l'atmosphère (par fusion et sublimation). La Fig. I-16 illustre comment se répartissent dans les mois de l'année les périodes d'accumulation et d'ablation sur les glaciers des tropiques externes dont font partie ceux de Bolivie. La période durant laquelle l'accumulation est la plus importante se trouve entre les mois de janvier et avril. On observe une fusion qui a lieu pendant toute l'année avec une période de plus forte fusion entre octobre et fin décembre.

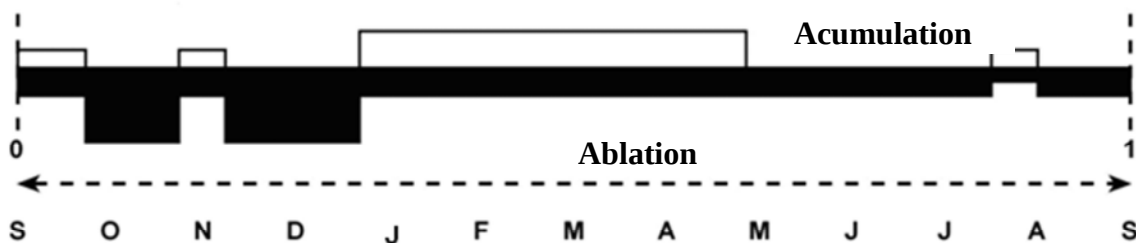


Figure I-16.- Régime typique du période d'accumulation et ablation sur les glaciers des tropiques externes (Ex. Glacier du Zongo) S=septembre, A : Août

Un glacier s'écoule par gravité continuellement des parties hautes, où l'accumulation l'emporte vers les parties basses où l'ablation domine, le flux

de glace maximum étant atteint au niveau de l'Altitude de la Ligne d'Equilibre (ELA). Cette ligne, est définie comme l'altitude où le bilan de masse annuel, bilan des apports et des pertes de masse, est égal à zéro. Cette ligne sépare le glacier en deux zones ayant des caractéristiques distinctes. La zone la plus élevée, située au-dessus de la ELA, correspond à la zone d'accumulation où le bilan de masse annuel est positif (le glacier reçoit plus de masse qu'il n'en perd) et la zone située à plus basse altitude correspond à la zone d'ablation, où la situation est opposée (bilan de masse annuel négatif) [Condom, et al., 2007]

Actuellement l'altitude de la ligne d'équilibre, sur les glaciers tropicaux, se trouve en général autour de 5100-5300 m. Cependant certains glaciers avec un bilan de masse très négatif au cours des dernières décennies présentent une ELA moyenne annuelle supérieure à l'altitude des sommets. C'était le cas du glacier « Chacalataya », actuellement disparu, lequel pendant des années fortement déficitaire tel que El Niño 1997-98 a provoqué que l'ELA dépassé son sommet (5400m) [Ramirez, et al., 2001]

I.3.2 Les flux d'énergie sur le glacier

L'ablation du glacier intègre tous les échanges d'énergie qui se produisent entre l'atmosphère et la surface du glacier. L'énergie de fusion provient des rayonnements solaires et infrarouge (courtes et grandes longueurs d'ondes, respectivement) et des flux turbulents de chaleur sensible (échange de 'température') et de chaleur latente (condensation / sublimation en surface). L'équation du bilan d'énergie à la surface de glace ou de neige s'écrit comme une application de la loi de conservation de l'énergie sur les composantes verticales des flux en :

$$R + B + H + L + P = 0 \quad (\text{Eq. I.3})$$

$$R = (1-\alpha) G + Rl_{\downarrow} - Rl_{\uparrow} \quad (\text{Eq.I.4})$$

Où R est la radiation nette, G est la radiation solaire globale (incidente diffuse et directe), α est l'albédo de la surface, $Rl_{\downarrow}$ et $Rl_{\uparrow}$ sont respectivement la radiation de grandes longueurs d'ondes incidente et émise par la surface, B est le flux total sous la surface (incluant la fusion), H et L sont respectivement les flux turbulents de chaleur sensible et de chaleur latente, et P est l'énergie apportée par les précipitations, en général négligeable devant les autres flux.

L'albédo est le principal facteur de la variation du bilan d'énergie dépend des chutes de neige qui recouvrent temporairement la surface en fusion [Vincent, et al., 2005]. Le rayonnement solaire net est contrôlé par l'albédo et par la couverture nuageuse. Ainsi, le pouvoir réfléchissant ou absorbant de la surface d'un glacier dépendra de l'état de surface du glacier, glace, neige fraîche ou sale etc.

Les précipitations jouent un rôle important en contrôlant l'albédo. Les glaciers sont alimentés par des chutes de neige généralement au-dessus de 4900 m au cours de la saison des pluies et épisodiquement en saison sèche [Ronchail, 1995 ; Garreaud, 1999]. La limite pluie/neige : $T < 0.5^{\circ}\text{C}$ [L'Hôte, et al., 2005] reste le plus souvent cantonnée à la zone la plus basse des glaciers [Wagnon, 1999], c'est à dire proche du front du glacier.

D'octobre à décembre, la saison des précipitations démarre progressivement (précipitations faibles et sporadiques) et la surface du glacier se trouve fréquemment en glace (albédo proche de 0.2 – 0.4). Cette surface absorbe le fort rayonnement solaire proche du solstice d'été et génère la fusion la plus importante de l'année (Fig. I-17). Lorsque les chutes de neige sont fréquentes, une part importante du débit provient de la fusion de la neige qui recouvre temporairement la zone d'ablation. Le cycle diurne est atténué par la contribution du rayonnement thermique à la fusion et par le délai d'écoulement dans la neige. La fusion de neige en zone d'accumulation peut fournir beaucoup d'eau tout au long de la période d'ablation, contribuant à un fort débit de base [Sicart et al., 2011].

A l'arrivée de l'apogée de la saison des précipitations, entre décembre et février, l'albédo du glacier augmente suite aux fréquentes chutes de neige et le rayonnement solaire incident est réduit par les nuages, ce qui a pour effet de diminuer l'énergie de fonte provenant de la radiation solaire. En conséquence, un facteur essentiel à prendre en compte est la variabilité des précipitations pendant les mois d'accumulation DJF qui interrompent la période de fusion maximale par rayonnement solaire

A la fin du mois d'avril, la fin des précipitations entraîne à une baisse d'albédo qui augmente l'énergie solaire disponible en surface du glacier malgré l'approche du solstice d'hiver (juin), compensant la baisse d'émission thermique de l'atmosphère, et le débit diminue peu par rapport aux valeurs de saison des pluies. Ainsi, le débit reste élevé en raison de l'alternance de la fusion de la glace par rayonnement solaire, en période sèche, avec la fusion de la neige par rayonnement thermique, lorsque les chutes de neige et les nuages convectifs bas sont fréquents.

Les chutes de neige d'hiver (saison sèche) provoquent une diminution brutale du débit par effet d'albédo. Au cours de la saison sèche de juin à août, le débit reste faible en raison surtout des pertes radiatives thermiques de la surface en journée et du fort refroidissement nocturne du glacier, mais aussi en raison de la sublimation de la glace. Les deux premiers facteurs sont dus à la faible émission thermique de l'atmosphère non nuageuse, raréfiée à très haute altitude.

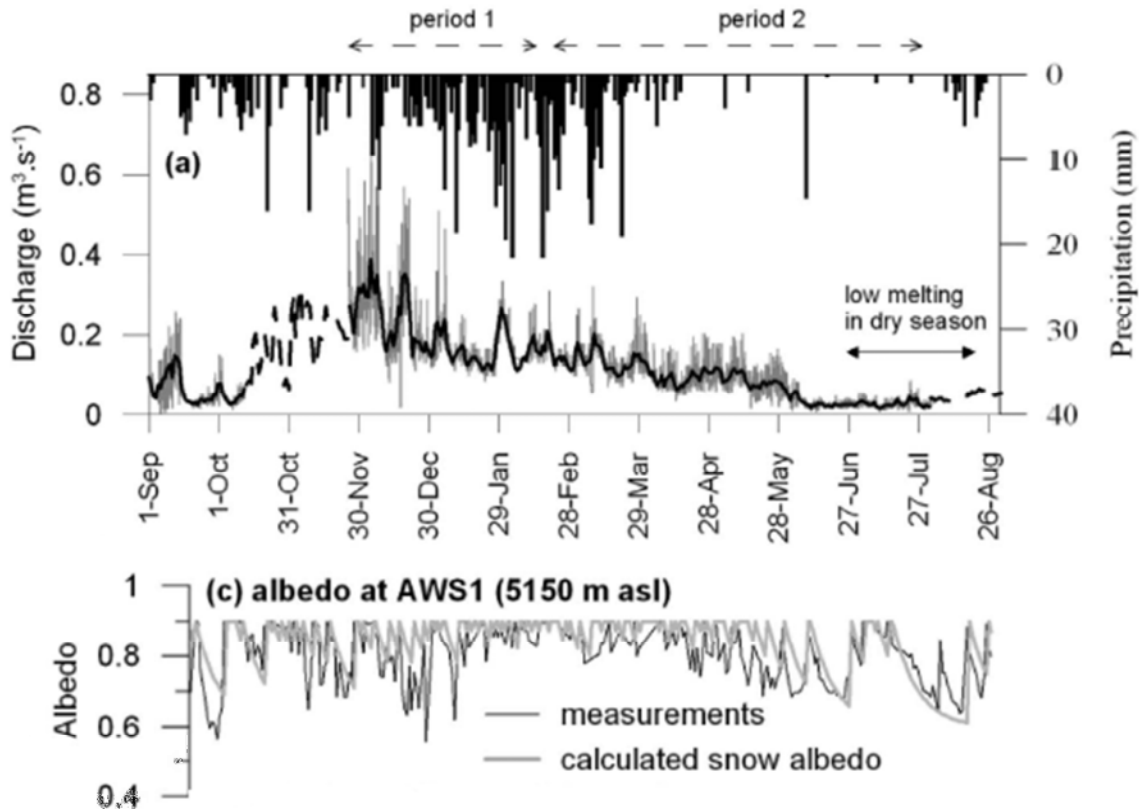


Figure 1 17.- En haut les débits horaires (en gris) et journaliers (en noir). Précipitation journalière de la station de Plataforma à 4750m. En bas l'albédo à pas de temps journalier calculé depuis le modèle développé par le corps d'ingénieur des états-unis (en gris) et l'albédo simulé (en noir) [source: Sicart, et al., 2011]

I.3.3 Impact des événements 'El Niño' sur les glaciers tropicaux

Les bilans de masse du glacier montrent que certaines années particulières avec une valeur négative coïncident avec la présence des événements El Niño (1992 et 1998) et avec un effet contraire lors des épisodes La Niña (2001). Les Niños 1991-92 et 1997-98 [Francou et Ribstein, 1995 ; Ribstein, et al., 1999], ont eu de forts impacts sur les glaciers de la Bolivie car les perturbations climatiques causées par cette anomalie arrivent surtout en saison humide, période qui contrôle en grande partie la variabilité interannuelle du bilan de masse.

Les mécanismes en jeu de cette anomalie (Niño), et leurs conséquences sur les glaciers sont : i) une réduction de la nébulosité, ii) une baisse plus ou moins marquée des précipitations, iii) une hausse de la température atmosphérique qui modifie le bilan d'énergie dans le sens d'une fusion accrue, iv) une arrivée tardive du cœur de la saison de pluie qui provoque une forte fusion par rayonnement solaire en décembre et janvier. Le bilan de masse annuel est alors très négatif en raison d'un déficit des précipitations et surtout d'une très forte fusion.

La Fig. I-18 montre la variabilité interannuelle du bilan de masse de trois glaciers situés en Bolivie : Zongo, Chacaltaya et Charquini. Nous pouvons voir que pendant une année typiquement « EL Niño » comme 1998 le bilan de masse annuel présente des valeurs très négatives par rapport aux autres années.

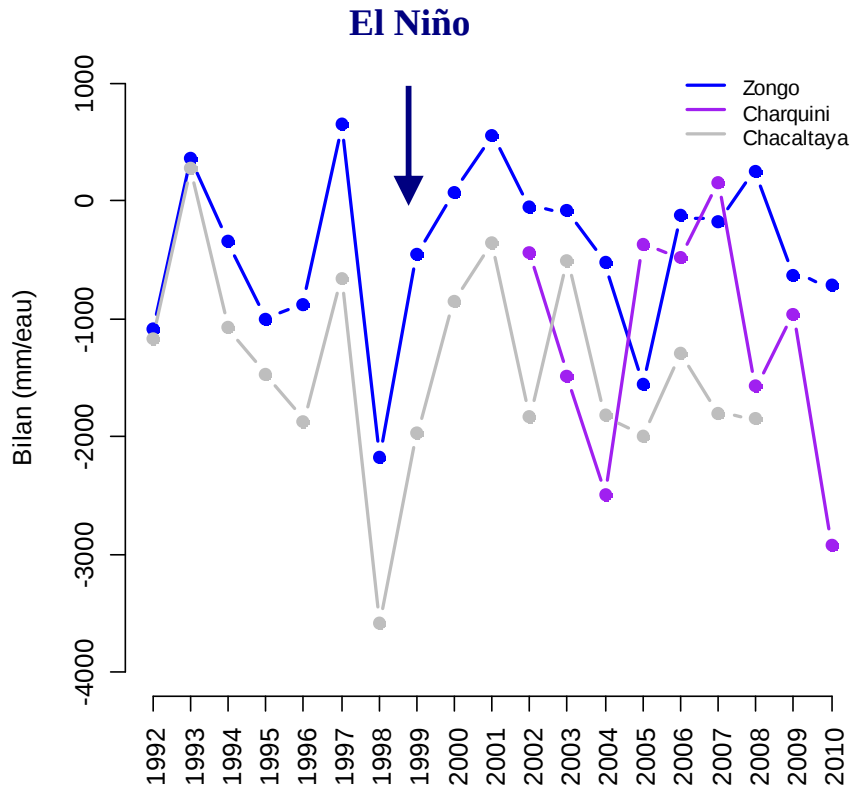


Figure I 18.- Bilan de masse annuel des glaciers Zongo, Chacaltaya et Charquini entre 1992 et 2010 [Rapport Glacioclim, 2009-2010]

Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phases chaudes (El Niño) de ces événements par rapport à une baisse de la fréquence des phases froides (La Niña) depuis la fin des années 1970 est à l'origine du retrait glaciaire accéléré observé dans les Andes tropicales au cours des deux dernières décennies du XXème siècle [Francou et Vincent, 2007]

CHAPITRE II

DISPONIBILITE ET HOMOGENISATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES, HYDROLOGIQUES ET GLACIOLOGIQUES

Dans ce chapitre nous faisons une description détaillée de la position des stations hydro-climatiques et la disponibilité des données employées dans la présente étude. De plus, une analyse d'homogénéisation de données annuelles et journalières est faite avec différentes méthodes.

Dans un premier temps on décrit en détail les stations utilisées dans ce travail. Pour cela, on utilise deux échelles : une échelle régionale et une échelle locale. A l'échelle régionale, nous décrivons les données pluviométriques de l'Altiplano, la Ville de la Paz et les sections haute et moyenne de la vallée du Zongo. A l'échelle locale nous discutons de, la disponibilité et de la qualité des données hydro météorologiques et les données glaciologiques du bassin versant du Zongo.

Deuxièmement, on fait une analyse descriptive de tous les pluviomètres en appliquant la méthode de l'ellipse de Bois comme méthode d'homogénéisation des données de précipitation annuelles. Ensuite, nous analysons la station Plataforma d'une manière précise (annuelle, mensuelle et journalière), car c'est le pluviomètre journalier le plus proche du glacier et donc celui qui sera utilisé pour étudier la relation des précipitations avec les variables glaciologiques (voir chapitre V).

Dans une troisième étape, nous décrivons la méthode de reconstruction et de comblement des débits de la station hydrométrique la plus proche du glacier : Tubo_4830. Pour cette reconstruction, lorsque la station Tubo_4830 aura des lacunes, nous utiliserons les données des deux stations hydrométriques suivantes : Tubo_Cobee et Tubo_Alaca, qui mesurent les hauteurs d'eau juste à l'amont du lac Plataforma.

Finalement une analyse comparative des données de température est faite afin d'en trouver des erreurs possibles dans la série de la station Mevis, qui sera employée dans le chapitre V dans la comparaison avec les variables glaciologiques.

II.1 LES DONNEES DISPONIBLES DANS LA ZONE D'ETUDE.

II.1.1 Échelle régionale

II.1.1.1 Répartition spatiale des stations météorologiques

Les stations pluviométriques ayant des précipitations journalières en Bolivie ont souvent un fort pourcentage de lacunes et parfois des séries incohérentes. Après avoir faite une analyse sur l'ensemble des stations de la

moyenne et des écarts types deux à deux, vingt-six au niveau journalier (Tableau II.1) ont été retenus pour représenter la distribution spatiale (Chapitre III.1) et cinq pour représenter la variation temporelle de la précipitation (Chapitre III.2). Ces dernières représentent chacune une région climatique différente (Altiplano, Ville de La Paz, section haute et moyenne de la vallée du Zongo). La disposition géographique des pluviomètres permet d'avoir un profil longitudinal d'étude qui s'étend de la vallée du Zongo (régime climatique plutôt amazonien) à partir de 1500m jusqu'à la partie nord-est de l'Altiplano à une altitude d'environ 4000m (Fig.-II.1)

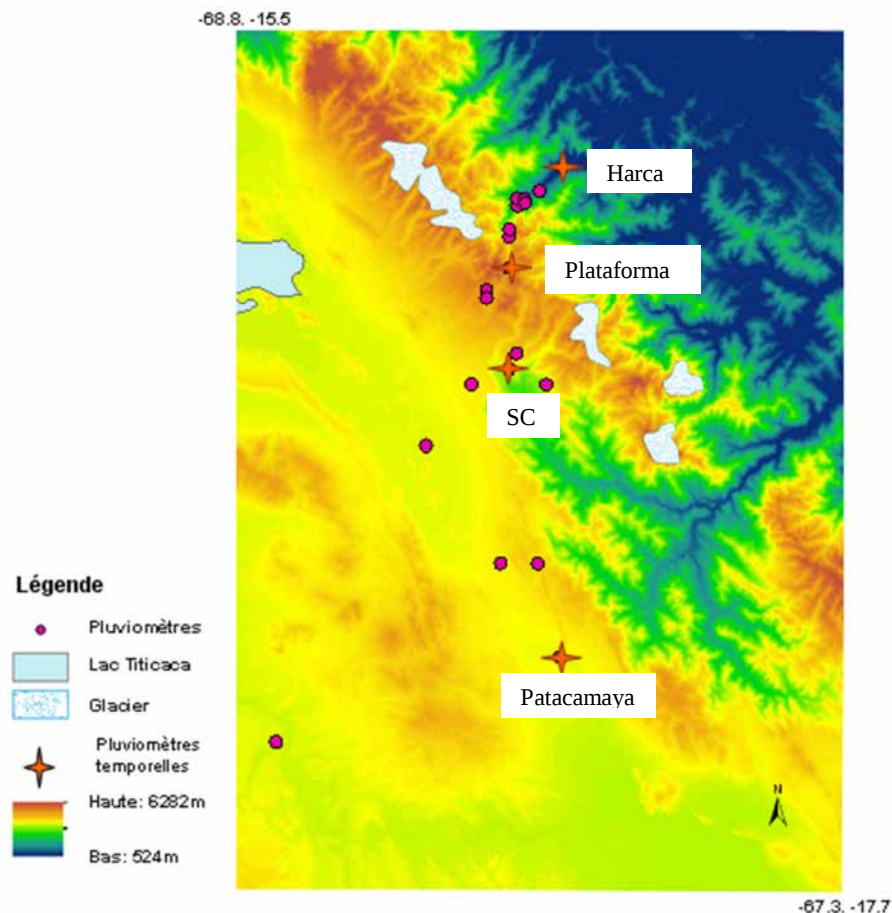


Figure II 1- Distribution spatiale des pluviomètres. En cercles rouges : pluviomètres utilisés pour l'analyse spatiale de la précipitation (voir table II.1) ; les étoiles rouges sont les pluviomètres employés pour l'analyse temporelle (Harca, Plataforma, San Calixto et Patacamaya).

II.1.1.2 Description des stations

Les pluviomètres journaliers disposés sur les régions de l'Altiplano et la ville de La Paz font 22 cm de diamètre, et des mesures météorologiques complémentaires sont réalisées sur les mêmes sites avec des thermomètres, des bacs d'évaporation, des anémomètres (vitesse - direction du vent) et des hygromètres (humidité relative) (Fig. II-2a). Les mesures de la précipitation sont relevées par un observateur à 8 :00 (heure locale) et les mesures de température sont faites à 8 :00 (T° min) et à 14 :00 (T° max). Pour la présente étude nous sommes intéressées plutôt à la précipitation journalière.

Dans la vallée du Zongo une dizaine de pluviomètres journaliers (*Fig. II-2b*) ayant la même surface de captation que celles de l'Altiplano sont disposés sur chaque usine hydroélectrique (*Fig. I-2*). Les observations sont faites une fois par jour par un observateur de la COBEE à 7:00 (heure locale).

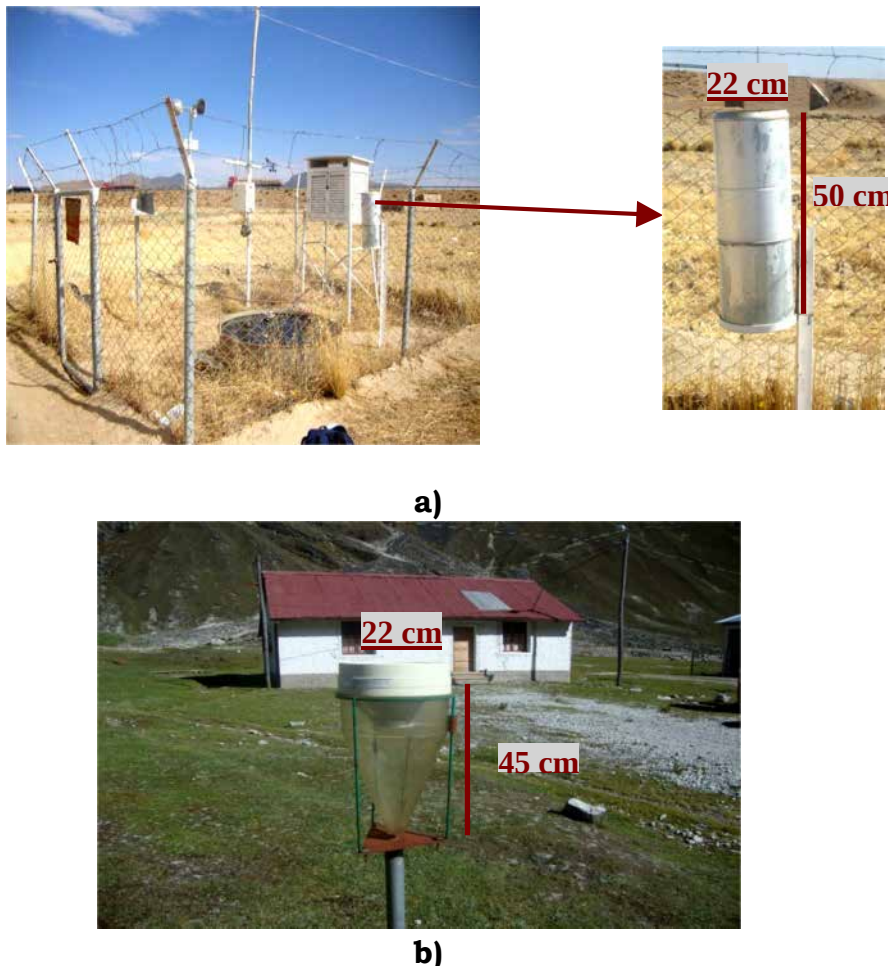


Figure II 2.- a) Station météorologique typique de l'Altiplano et de la ville de La Paz. A droite : pluviomètre journalier cylindrique ayant une dimension de 22 cm de diamètre et 50 cm de hauteur. b) Pluviomètre journalier de forme conique typique de la vallée du Zongo ayant un diamètre de 22cm et une hauteur de 45 cm.

II.1.1.3 Disponibilité des données météorologiques

Le tableau II-1 synthétise les caractéristiques principales des vingt-six pluviomètres avec la position et la durée des séries temporelles journalières et mensuelles. Les données des stations de l'Altiplano et la Ville de la Paz proviennent du SENAMHI (Servicio Nacional de Metereologia e Hidrologia de Bolivie). Les stations de San Calixto, Patacamaya et Ayo Ayo ont les plus longs registres de tous les pluviomètres avec environ 60 ans. Les données de la vallée du Zongo (en italique) proviennent de la COBEE (Compañia Boliviana de Energia Electrica) et ont une période commune journalière de 19 ans (1991-2010) et une période commune mensuelle de 32 années (1978-2010). A partir de cette base de données de 26 stations sera utilisée

seulement pour l'analyse spatiale et quatre pour l'analyse temporelle de la précipitation.

Tableau II 1.- a) Principales caractéristiques des pluviomètres. En Souligné gras :
pluviomètres de l'Altiplano, en italique : pluviomètre de la ville de la Paz, et en italique gras :
pluviomètre de la vallée du Zongo. Entre parenthèses sont notés les mois qui présentent des lacunes
a)

Pluviomètre	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (msnm)	Période de données journaliers	Période de données mensuelles	Lacunes	Source
						1963 (9,10) 1964 (1,2,8) 1965 (toute l'année) 1970 (1,2,3,4) 1983 (9,10,11,12) 1984 (1,2,3,4,5) 1993 (10,11,12)	SENAMHI
Avo Avo	-17,09	-68,04	3880	1953-2010	1953-2010		SENAMHI
Patacamaya	-17,24	-67,92	3940	1950-2010	1945-2010		SENAMHI
collana	-16,92	-68,34	3983	1978-2010	1978-2010		SENAMHI
El Alto	-16,51	-68,21	4021	1978-2010	1978-2010		SENAMHI
Calamarca	16° 54'	68° 08'	3954	1987-2001	1987-2001	1992(1,2) 1994 (9,10,11,12)	SENAMHI
						1956 au 1959 1963 (7,8,9) 1964(4,5) 1973 (toute l'année) 1979(10,11,12) 1982(5,6,7,8,9,10) 1985(1,2,3) 1993 au 2002	SENAMHI
Belen	16° 04'	68° 40'	3820	1949-2008	1949-2008		SENAMHI
Calacoto	17° 17'	68° 38'	3805	1943-2004	1943-2004	1954(2,5) 1957 (2,5) 1961 au 1969 1973 (1,2,3)	SENAMHI
Viacha	16° 39'	68° 18'	3850	1987-2010	1987-2010	1988 (7,9,10) 1989 (3,5,9) 1994(2)	SENAMHI
Chacaltaya	16° 19'	68° 10'	5220	-----	1952-1996		SENAMHI
						1992 (1,2,3,4,5,6,7,8) 1993 (toute l'année) 1994 (9,10,11,12)	SENAMHI
<i>San Calixto</i>	-16,49	-68,14	3577	1950-2010	1948-2010		SENAMHI
<i>Villa Copacabana</i>	-16,48	-68,13	3668	1978-2010	1978-2010		SENAMHI
<i>Chuquiguillo</i>	-16,44	-68,1	4312	1975-2010	1975-2010	2003(3,4)	SENAMHI
<i>Alto Obrajes</i>	16° 31'	68° 07'	3480	2000-2010	2002-2010	2004(4,5,6,7,8,9) 2006 (12)	SENAMHI
<i>Achocalla</i>	16° 34'	68° 10'	3680	2000-2010	2000-2010	2001 (3) 2002(3) 2005(6)	SENAMHI
<i>Palca</i>	16° 34'	67° 59'	3333	1972-2010	1972-2010	1984(6,7,8,9,10,11) 1985 au 2002	SENAMHI
<i>Ovejuyo</i>	16° 31'	68° 02'	3420	1978-2000	1978-2000	1998(5,7)	SENAMHI
Zongo	-16,19	-68,13	4360	2000-2010	2000-2010	2009(5,6,8)	IRD-COBEE
Plataforma	-16,28	-68,12	4750	1980 -2010	1978-2010	1985 au 1991 (toute l'année)	IRD-COBEE
Tiquimani	16°12'	68°07'	4022	1999-2010	1978-2010	2007(6)	
Botijlaca	-16,2	-68,14	3757	1980 -2010	1978-2010	1985 au 1991 (toute l'année) 1996 (toute l'année)	IRD-COBEE
Cuticucho	16°08'	68°06'	2768	1980 -2010	1978-2010	1985 au 1991 (toute l'année) 1996 (toute l'année)	IRD-COBEE
Santa Rosa	16°07'	68°06'	2558	1980 -2010	1978-2010	1985 au 1991 (toute l'année) 1996 (toute l'année)	IRD-COBEE
Sainani	16°07'	68°05'	1548	1980-2010	1978-2010	1985 au 1991 (toute l'année) 1996 (toute l'année)	IRD-COBEE
Chururaqui	16°06'	68°03'	1888	1980-2010	1978-2010	1985 au 1991 (toute l'année) 1996 (toute l'année)	IRD-COBEE
Harca	16°03'	68°00'	1529	1980-2010	1978-2010	1985 au 1991 (toute l'année) 1996 (toute l'année)	IRD-COBEE
Cahua	16°3'	68°0,6'	1195	1980-2010	1978-2010	1985 au 1991 (toute l'année) 1996 (toute l'année)	IRD-COBEE

b)

Station	Latitude	Longitude	Altitude	Période de données mensuelles	Lacunes	Source
El Alto	-16,51	-68,19	4012	1978-2010	1986 (11,12) 2005 (6) 2006 (4, 10,12) 2008 (5)	SENAMHI

II.1.2 Echelle locale au niveau du bassin versant du Zongo

Les principales caractéristiques du glacier Zongo (décrit dans la section I.1) sont une exposition SE, une altitude qui va de 4900m à 6000m, une surface de englacée de 1.9 Km² [GlacioClim, 2009-10]. Le bassin versant caractérisé par l'exutoire de la station Tubo_4830 fait 3km². La surface de la zone d'ablation du glacier a évolué depuis le début du programme (Tableau II-2). Entre 1993 et 2010 cette surface a diminué en passant de 2,04 à 1.92 Km² (soit 0.12 Km² de différence) donc conjointement la surface de la moraine du bassin versant a augmenté (de 1,6 Km² à 1.78 Km²). C'est intéressant de noter qu'entre les années 1992 et 2000 la surface du glacier présente une diminution plus forte (de 2,04 à 1.95 Km² ; 0.09 Km²) qu'entre les années 2001 et 2010 (de 1,94 à 1,92 Km² ; 0.002 Km²).

Tableau II.-2.- Evolution de la taille de la surface du glacier et de la partie non glaciaire (moraine) du bassin versant entre les années 1992-2010.

	Surface du glacier (Km ²)	Surface de la moraine (Km ²)
1991-92	2,04	1,66
1992-93	2,02	1,68
1993-94	2,03	1,67
1994-95	2,02	1,68
1995-96	2,00	1,70
1996-97	1,99	1,71
1997-98	1,98	1,72
1998-99	1,97	1,73
1999-00	1,95	1,75
2000-01	1,94	1,76
2001-02	1,94	1,76
2002-03	1,93	1,77
2003-04	1,92	1,78
2004-05	1,90	1,80
2005-06	1,88	1,82
2006-07	1,88	1,82
2007-08	1,86	1,84
2008-09	1,88	1,82
2009-10	1,92	1,78

II.1.2.1 Répartition spatiale des équipements hydro - météorologiques

Un réseau de stations hydro - météorologiques a été installé sur le glacier du Zongo par l'IRD et fonctionne depuis l'année 1991 (Fig. II.-3). Différents dispositifs de mesures sont présents et fournissent des données

météorologiques horaires (température, radiation, précipitation, vent, humidité relative). Un réseau des pluviomètres totalisateurs fournit des données mensuelles et sont placés autour du glacier à différentes altitudes. Un pluviomètre journalier nommée « Plataforma » est situé sur la rive droite du lac Plataforma. Ce pluviomètre est l'unique pluviomètre qui donne des données journalières au sein même bassin versant. Il faut mentionner que la précipitation à ce pluviomètre est rarement de type neigeuse, et donc on n'utilise pas des dispositifs chauffants pour mesurer la précipitation. La principale différence de ce pluviomètre avec des autres installées sur le glacier est la taille de captation qui peut engendrer une différence sur la mesure mensuelle (Voir table II.5).

Immédiatement à l'aval du front glaciaire une station hydrométrique située à une altitude de 4830 m (Tubo 4830) comprend un limnigraphe et un déversoir triangulaire qui permet de contrôler les écoulements provenant du glacier (Fig. II-3 en bas). Une échelle mesurée par un observateur prend les hauteurs d'eau du canal « Tubo Cobee ». Cette échelle est placée juste à l'amont du lac Plataforma et mesure le débit provenant du bassin versant du glacier Zongo. L'échelle « Alpaca » renseigne les débits qui proviennent du côté ouest du glacier Huayna Potosi (surface totale : 5.74 Km², surface englacée : 42.4%). Les eaux provenant du Zongo sont stockées dans une petite retenue qui passe directement au canal Tubo. Par contre, les jours que les débits dépassent la capacité de cette retenue il y a un débordement, et les eaux passent directement au canal Alpaca, donc durant ces jours ce canal prend des mesures du Huayna Potosi plus le débordement du Zongo.

-16.27 ; -68.15



-16.28 ; -68.12

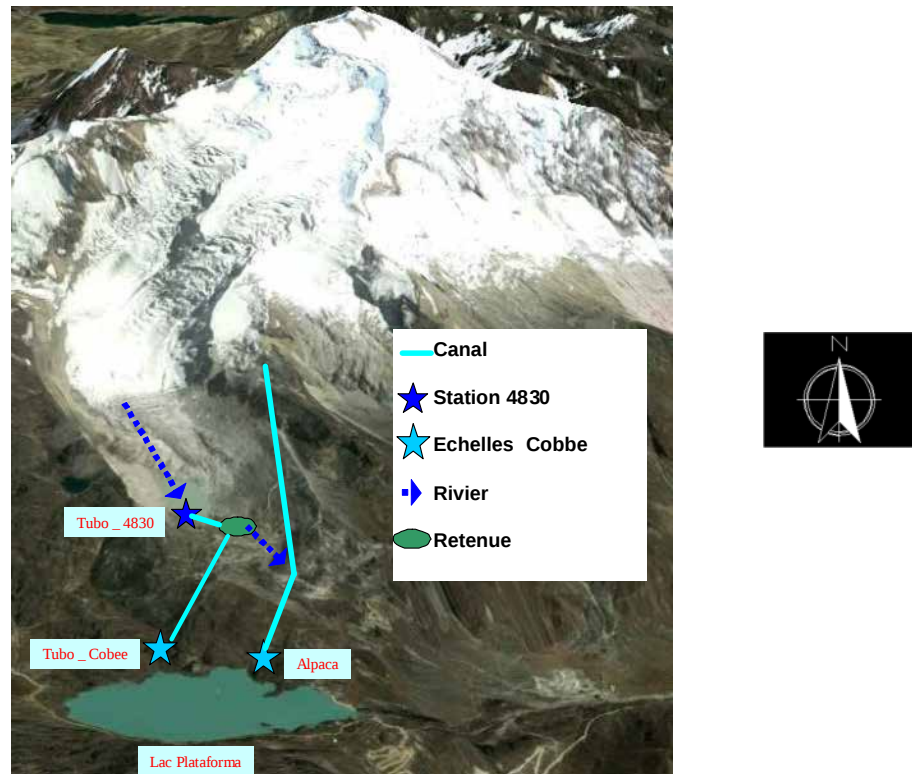


Figure II -3.- En haut : carte de disposition des pluviomètres totalisateurs (en bleu) autour le glacier : P1, P2, P3, P4, P5 et P8. Position du limnigraphe tubo_4830, l'échelle du Tubo_Cobee et Tubo Alpaca (en turquoise), position du pluviomètre Plataforma (en rose) et la station météorologique Mevis (en vert). [Source : image satellitaire de google earth, 2011]. En bas : Distribution spatiale des stations hydrologiques (stations 4830 et les échelles Tubo Cobee et Alpaca) dans le bassin versant. (Source : image satellitaire de google earth, 2013)

II.1.2.2 Description des stations

a) Réseau de pluviomètres totalisateurs. Un réseau de 5 pluviomètres totalisateurs est déployé sur les moraines latérales du glacier qui s'étendent de 4830 à 5200 m.s.n.m. de façon à appréhender la variabilité spatiale des précipitations sur le glacier (Fig. II-3). Il existe aussi un pluviomètre totalisateur qui est situé sur la rive droite du lac Plataforma (P8) à côté d'un pluviomètre journalier (Plataforma sur la Fig. II.-3).

Une couche d'huile est disposée dans les pluviomètres totalisateurs afin d'éviter l'évaporation. Chaque pluviomètre totalisateur présente une hauteur de 122cm et un diamètre de 50cm (Fig. II.4). Ces pluviomètres sont mesurés à chaque fin de mois.

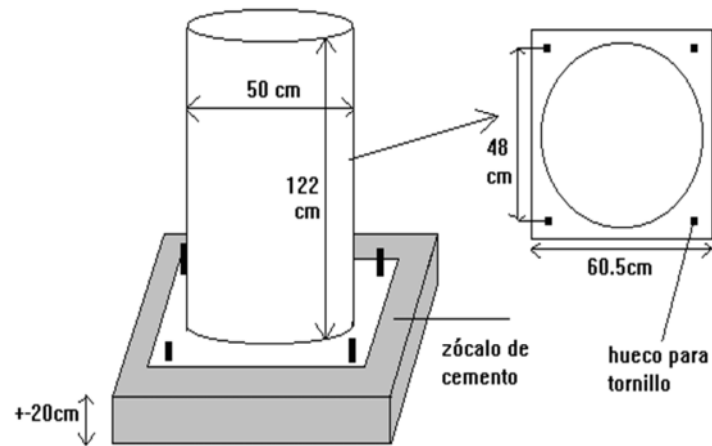


Figure II 4.- Pluviomètre totalisateur ayant une hauteur de 120 cm et un diamètre de 50cm [Source [Caballero, 1998]]

b) Station hydrologique à 4830 m.s.n.m (Tubo_4830).- A 4830 mètres d'altitude, et à environ 500 m du front du glacier, un limnigraphe (capteur de pression) enregistre toutes les 15 minutes la hauteur d'eau du torrent émissaire (Fig. II-5). La station de jaugeage est équipée d'un déversoir en V qui permet de convertir les hauteurs d'eau en débits. Ceux-ci sont mesurés avec une précision de l'ordre de $\pm 5\%$ dans la gamme de débit de 0 à $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ [Lejeune, et al., 2006]

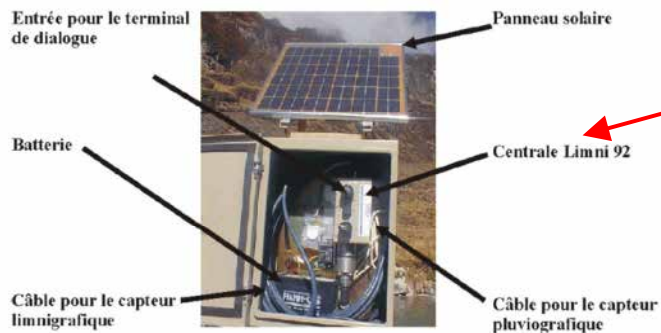


Figure II 5.- A gauche Centrale d'acquisition type «Limni 92» surmontée d'un panneau solaire (Caballero, 2001). A droite la station limnigraphique à 4830 m.s.n.m. (Photo : Leonardini, 2009)

c) Tubo Cobee et Tubo Alpaca.- Deux échelles limnimétriques sur le canal Tubo et le canal Alpaca sont situées à l'exutoire du bassin avant la retenue

artificielle de la Plataforma (Fig. II-3). Elles sont mesurées, grâce au personnel de La Compagnie Bolivienne d'Energie Electrique (COBEE) deux fois par jour à 7h et 15h. Ces stations nous permettront de combler les lacunes existantes à la station de 4830m et de vérifier les débits de cette même station quand ils existent.

d) Station météorologique (Mevis). – Cette station est située à une altitude de 4750m, à côté du lac du Zongo. C'est une station THIES-CLIMA modèle : DL15 V2.00 (Fig. II.-6), qui a été installée en septembre du 1995. On utilisera les données de température de cette station. Finalement, les capteurs de cette station sont :

- Sonde de température située à 190 cm du sol (marque : *Thies*, référence : *Hygro- Thermogeber*). Qui mesure les températures sèches de l'air.
- Sonde d'humidité relative située à 190 cm du sol (marque : *Thies*, référence : *Hygro-Thermogeber*).
- Pyranomètre : courtes longueurs d'ondes situé à 155 cm du sol, orienté vers le ciel (marque : *Thies*, référence : *Pyranometer CM3, 7.1415.03.000*). Ce capteur mesure les radiations incidentes.
- Anémomètre situé à 230 cm du sol (marque : *Thies*, référence : *Windgeber 4.3303.10.007*).
- Sonde de température : située à un mètre de hauteur (marque : *Thies*). L'alimentation en énergie est assurée par une batterie 12 V couplée à un panneau solaire (3W).
- Pluviomètre à augets basculants situé à 200 cm du sol (marque : *Thies*, intensité maximale : *7 mm par min*, sensibilité : *Une impulsion par 0,1 mm d'eau*). Cependant ce capteur n'a jamais fonctionné.

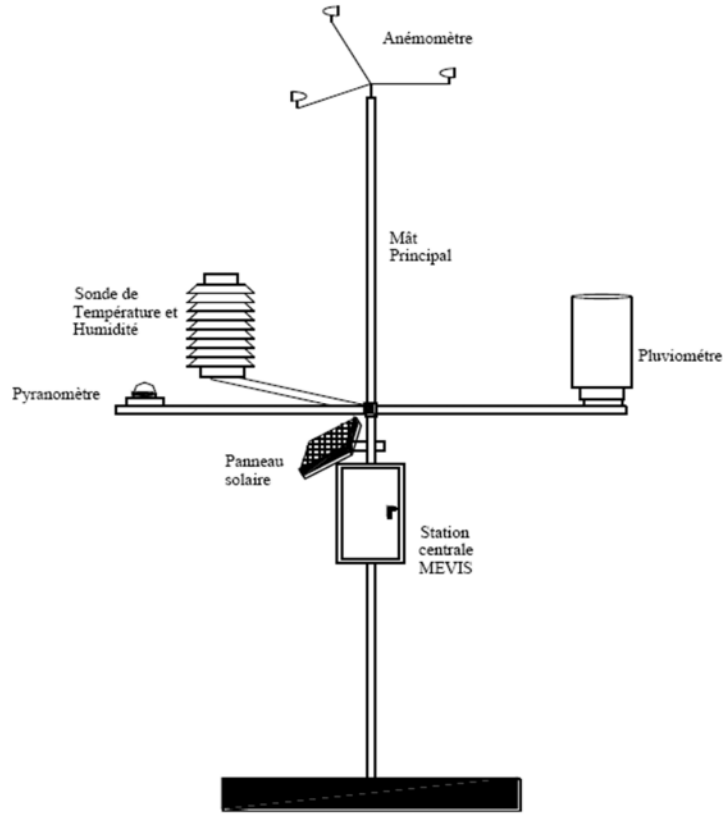


Figure II 6.- Station météorologique Mevis (4750m) qui comporte un anémomètre, une sonde de température et d'humidité, un pyranomètre, et un pluviomètre instantané.

II.1.2.3 Méthode glaciologique pour la détermination du bilan de masse

Cette méthode consiste à faire des mesures directes et ponctuelles de la variation d'épaisseur de neige et de glace à la surface du glacier au cours de l'année. Elle permet la quantification du bilan de masse à partir d'un réseau de balises implantées à la surface du glacier et de forages effectués en zone d'accumulation. Selon [Paterson, 1994]: l'équation pour le calcul de bilan de masse est la suivante :

$$B_n = \frac{1}{S} \left(\int_{S_c} b_n dS + \int_{S_a} b_n dS \right) \quad (\text{Eq. II - 1})$$

Où B_n est le bilan de masse net spécifique (mm eq. /Eau), les premier et second termes représentent le bilan net (b_n) dans les zones d'accumulation et d'ablation pondérées par leurs surfaces respectives.

En discrétisant par tranches altitudinales on obtient :

$$B_n = \frac{1}{S} \sum_i s_i b_n^i \quad (\text{Eq. II - 2})$$

Où S est la surface de tout le glacier et l'index i fait référence à la tranche altitudinale.

Pour les mesures faites au niveau des balises d'ablation on utilise l'expression suivante :

$$b_n = \rho_0 \Delta z + \rho \Delta y \quad (\text{Eq.II.3})$$

Où

ρ ($=0.9 \text{ g/cm}^3$) est la densité moyenne de la glace, et ρ ($=0.4 \text{ g/cm}^3$) est la densité de la neige et Δz , Δy , sont les changements d'épaisseur des couches de glace et neige respectivement, ρ_0 et ρ , sont considérées constantes [Francou, et al., 2004]

Pour le Glacier Zongo, on distingue trois zones du bilan de masse : Entre 4900-5300 m on mesure tous les mois l'émergence des balises et les hauteurs de neige (Eq. II-3). Entre 5700-6000 m, qui correspond à la zone d'accumulation, des puits sont réalisés chaque année avec des mesures d'épaisseur de neige et de densité, qui permet de quantifier l'accumulation. Finalement, entre 5300-5700m, pour la zone intermédiaire de séracs où les mesures sont difficiles, on réalise une interpolation linéaire entre les deux zones précédentes.

La lecture de l'émergence des balises (succession de 5 morceaux de bois de 2 m de long raccordés entre eux) est effectuée chaque début du mois sur la zone d'ablation. Elles sont implantées sur le glacier grâce à une sonde à vapeur, normalement au début de l'année hydrologique)

II.1.2.4 Disponibilité des données

Le Tableau II-3 synthétise les données de débits, de précipitation et de températures qui seront utilisés pour le bassin versant du Zongo.

La station Tubo_4830, présente cinq années avec des lacunes mensuelles (1999, 2006, 2007, 2008 et 2009) qui représentent 10% de toute la série temporelle. Les canaux Tubo-Cobee et Alpaca possèdent 27 années de données mensuelles, et 19 ans de données journaliers. Durant cette dernière période (1992-2010) les lacunes mensuelles atteignent 5% (Tubo) et 10% (Alpaca) sur le registre total.

Le réseau de pluviomètres totalisateurs possède un registre depuis l'année 1994 jusqu'à 2010. Le pourcentage de lacunes mensuelles de la série totale est 5% aux pluviomètres P1, P2, P3, P4, P5 et 10% à P8.

Tableau II 3.- Disponibilité des données hydrologiques, pluviométriques et météorologiques dans le bassin versant du Zongo. Entre parenthèses le numéro de mois avec des lacunes.

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m.s.n.m)	Période de données	Lacunes mensuelles
Tubo_4830	-16,27	-68,13	4830	1992-2010	1999 (2) 2006(11,12) 2007 (8,9,10,11,12) 2008 (5,7,9) 2009 (3,5,10,11)
Tubo _ Cobee	-16,283	-68,124	4759	1991-2010	2009 (12) 2010 (2, 3,6)
Alpaca _ Cobee	-16,28	-68,125	4742	1991-2010	1998(3,4,5,6,7,8,12) 2004(6,7,8,9,10,11,12) 2005(1,2,3,4,5,6,7,8) 2007 (2,4,6,7,8)
P1	-16.281	-68.149	5200	1994-2010	1997 (1) 2003 (5,6)
P2	-16.282	-68.114	5100	1994-2010	1997 (1) 2003 (5,6)
P3	-16.278	-68.132	4900	1994-2010	1997 (1) 2003 (5,6)
P4	-16.279	-68.129	4800	1994-2010	1997 (1) 2003 (5,6)
P5	-16.280	-68.130	4835	1994-2010	1997 (1) 2003 (5,6)
P8	-16.281	-68.121	4754	1994-2010	1997 (1) 2002 (8) 2003(4, 5, 6)
Mevis	-16.2814	-68,121	4750	1995-2010	2010(3)

II.2 ANALYSE ET HOMOGENISATION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

II.2.1 Test de détection de ruptures selon l'ellipse de Bois

Le test dit de l'ellipse de Bois a été appliqué, pour trouver de possibles ruptures dans les séries pluviométriques, et ainsi tester leur fiabilité. Une rupture peut être définie de façon générale par un changement la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu.

La méthode de l'ellipse de Bois fait l'hypothèse que la variable à tester Y est liée à la variable test X par une régression linéaire et que les résidus issus de cette régression ont une distribution gaussienne. La méthode consiste à analyser le cumul des résidus de la régression.

On analyse la courbe des sommes des résidus $S(k)$

$$S(k) = \sum_{i=1}^k e_i \quad (Eq.-II.4)$$

Avec $e_i = y_i - (a \cdot x_i + b)$

Avec : a et b, des paramètres adimensionnels

i l'indice du pas de temps annuel

x variable de test

y variable de test

Pour un seuil de probabilité donné, la somme des résidus doit se trouver à l'intérieur de l'ellipse centrée au point $n/2$ et de demi-axe $P(k)$

$$P(k) = U_{\alpha} \sqrt{\frac{k(n-k)}{(n-1)}} \sigma_{\varepsilon} \quad (Eq.- II.5)$$

Avec :

U_{α} : variable centrée réduite de probabilité au non dépassement $1-\alpha / 2$.

α : Écart type

k : demi hauteur donnée pour un moment déterminé

n : nombre total de données

ε : Série des résidus de la régression linéaire

Si la fréquence des points de la somme des résidus extérieurs à l'ellipse est supérieure au seuil de probabilité fixé, alors l'hypothèse que la variable Y soit linéairement liée à la variable X est rejetée [Bois, 1986]

Cette méthode a été appliquée sur la période 1979 – 2010, sur les séries temporelles annuelles de précipitations de l'Altiplano (Ayo Ayo, Patacamaya et El Alto) et de la Ville de La Paz (San Calixto). Ces pluviomètres (excepté Chuquiaguillo et El Alto) seront utilisés pour l'analyse temporelle de la précipitation dans les chapitres III et IV.

Plataforma est le pluviomètre journalier le plus proche du glacier et donc celui qui représente le mieux la variabilité saisonnière du glacier (voir Chapitre V). Pour cette raison, on fait une analyse particulièrement fine de sa série. Les stations de Chuquiaguillo et El Alto ne font pas partie de l'analyse temporelle, néanmoins ils ont une importance particulière. El Alto est le pluviomètre journalier le plus proche de Plataforma, avec un registre en commun de 19 ans et avec une variation pluviométrique semblable. Chuquiaguillo est située à la crête de la cordillère, à une altitude de 4600m, similaire à celle de Plataforma, on attend donc une précipitation mensuelle et annuelle proche. Ces deux pluviomètres permettent de faire une comparaison deux à deux pour vérifier les données de Plataforma à une échelle plus fine que l'échelle annuelle (section II.2.2). C'est pourquoi, ces deux pluviomètres sont soumis à un traitement de données, afin d'en trouver

des possibles erreurs dans leurs séries qui peuvent affecter l'analyse avec Plataforma.

Pour appliquer la méthode de l'ellipse de Bois, chaque pluviomètre est comparé avec ceux qui montrent les plus hauts coefficients de détermination ($r^2 > 0.7$). Cette méthode de détection de ruptures n'a pas été appliquée avec les séries temporelles de la vallée du Zongo (Botijlaca et Harca), car elles sont peu corrélées entre elles-mêmes. Ces faibles corrélations s'expliquent par le relief local et les gradients d'altitude.

La Fig. II-8 exprime les résultats de cette méthode. La ligne pointillée nous indique un niveau de confiance de 80%, et la ligne noire un niveau de 99%. La station Ayo Ayo (comparée avec Patacamaya) montre que l'année 1984 est située hors de l'ellipse à 99%. Cette erreur est due à une lacune de données comprise entre octobre 1983 et mai 1984. Même si il y a des années situées hors de l'ellipse à 80% (par exemple les années 1983 et 2007) on ne les corrigera pas parce que le niveau de confiance est petit, mais on gardera à l'esprit que ce sont des années avec des erreurs possibles. Nous voyons une rupture particulière en 1994 : cela est dû à une lacune de données durant les mois de novembre et décembre qui produit une baisse anormale de la précipitation annuelle à cette station. Ces mois étant pluvieux et affectant la moyenne de la précipitation annuelle, ils seront comblés avec l'équation II.7 (Tableau II.4)

Les pluviomètres de Patacamaya (comparé avec Ayo Ayo), San Calixto (comparé avec Villa Copacabana) et El Alto (comparé avec Collana) montrent que tous les points sont à l'intérieur de l'ellipse à 99%, donc ces trois stations ne seront pas corrigées. Par contre, les points hors de l'ellipse à 99% indiquent qu'à ChuquiagUILlo (comparé avec San Calixto) les années comprises entre 1987 et 1991 présentent des erreurs dans leurs séries, et donc ils ont besoin d'une correction (Tableau II.4).

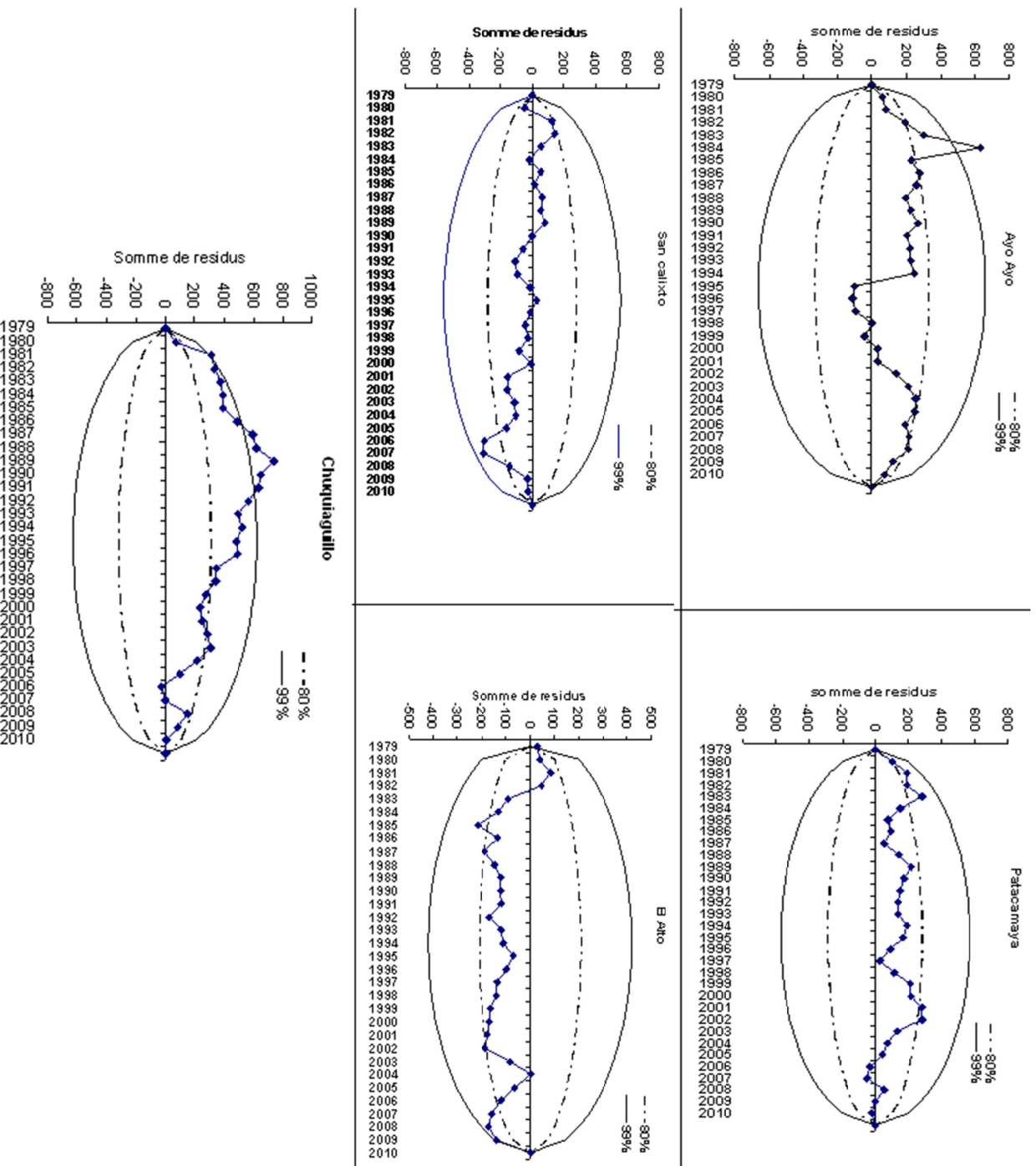


Figure II-7.- Graphiques des ellipses de bois sur 5 stations. En noir l'ellipse à 99% de confiance et en pointillées à 80%. Courbe donnant la somme des résidus de chaque station. Ayo Ayo comparé avec Patacamaya, San Calixto avec villa Copacabana, El Alto avec Collana, ChuquiagUILlo avec San Calixto et P8 avec P2

Les résultats de l'ellipse de Bois indiquent qu'avec un niveau de confiance de 99% les stations d'Ayo Ayo et ChuquiagUILlo ont besoin d'une correction dans leurs séries. Cependant, la plupart des stations pluviométriques présentent des données fiables, au moins à l'échelle annuelle.

Le tableau II.4 présente les valeurs originales et les valeurs corrigées pour ChuquiagUILlo et Ayo Ayo. Le premier montre une correction annuelle entre 1987 et 1991, et le deuxième une correction mensuelle entre octobre 1983 - mai 1984 et novembre 93 - décembre 93. ChuquiagUILlo va servir de station de base (méthode de l'ellipse de Bois) pour vérifier les données

annuelles de Plataforma, et c'est pourquoi ce pluviomètre est corrigé à ce pas de temps. Par contre, Ayo Ayo fait partie de l'analyse journalière dans le chapitre III, donc son traitement est aussi fait à un pas de temps plus fin qu'annuel.

Tableau II 4.- Valeurs mensuelles originales et corrigés pour les stations ChuquiagUILlo, Ayo Ayo et P8. a) reconstitution annuelle b) reconstitution mensuelle.

a)

Annuel		Original	Corrigé
ChuquiagUILlo	1987	785,5	750,5
	1988	864,6	761
	1989	558,6	519,9
	1990	676,7	614,8
	1991	636	634

b)

	Mensuelle	Original	Corrigé
Ayo Ayo	Oct.-83	Lacune	13,60
	Nov.-83	Lacune	4,45
	Déc.-83	Lacune	54,59
	Janv.-84	Lacune	160,82
	Févr.-84	Lacune	114,25
	Mars.-84	Lacune	66,30
	av.-84	Lacune	13,46
	Mai.-84	Lacune	2,38
	Nov.-93	Lacune	44,45
	Déc.-93	Lacune	64,69

II.2.2 Plataforma est-il un pluviomètre fiable ?

De nombreuses études focalisées sur le fonctionnement climatique et hydrologique du bassin versant du glacier du Zongo ont été faites, en prenant en compte les données de Plataforma [Lejeune, 2009; Ramallo, 2006 ; Sicart, 2002 ; Caballero, 1998]. C'est le pluviomètre le plus proche du glacier ayant des données journalières sur une période de 19 années, et ayant des données mensuelles sur 32 années.

Récemment des doutes sur la qualité des données sur ce pluviomètre ont été émis à cause du changement d'observateur qui a lieu tous les 5 ans. Pour vérifier la qualité des données et détecter les possibles erreurs, nous dédions la section qui suit à l'analyse exhaustive de ce pluviomètre.

Une première analyse de corrélations simples à pas de temps annuel (à partir de la base de données mensuelles) est faite avec des pluviomètres plus proches et ayant la même surface de captation que Plataforma, afin d'identifier les pluviomètres qui ayant une variabilité climatique la plus

proche de cette station. Cette analyse est faite sur deux périodes une première qui s'étend de 1981 à 2010 et une deuxième qui s'étend entre les années 2000 et 2010 (contrainte par la courte période du pluviomètre Zongo). En plus, on fait la même analyse de corrélation avec les pluviomètres totalisateurs (1995-2010), car ce sont ceux qui sont le plus proche de Plataforma, mais ayant une surface de captation différente (50cm).

Sur la première période (Tableau II-5), la relation la plus forte avec Plataforma est visible pour Botijlaca ($r^2=0.61$). Par contre EL Alto et Chuquiaguillo révèlent des corrélations assez faibles avec Plataforma ($r^2=0.29$ et 0.44 respectivement). Sur la deuxième période, Botijlaca et Zongo présentent aussi la plus forte relation avec Plataforma ($r^2=0.46$ et 0.59 respectivement), et des valeurs plus faibles de corrélations sont calculées pour Chuquiaguillo et El Alto ($r^2<0.34$). Il semble donc que l'influence amazonienne est plus marquée que l'influence altiplanique à une échelle interannuelle pour le pluviomètre Plataforma.

Il faut remarquer que le pluviomètre Chuquiaguillo présente une situation géographique similaire à Plataforma car il est situé à une altitude de 4500m et sur une crête qui sépare l'Amazonie et la ville de La Paz. Cependant la corrélation entre ces deux pluviomètres est faible, cela peut être expliqué par des vents locaux qui affectent la captation à Chuquiaguillo, en donnant des précipitations plus faibles de 15% par rapport à Plataforma.

Afin d'identifier les différences entre les pluviomètres totalisateurs et Plataforma, on les compare par des coefficients de détermination (Tableau II.-5b). Les pluviomètres totalisateurs sont bien corrélés entre eux ($r^2 > 0.5$). Les pluviomètres les plus proches ne sont pas les mieux corrélés entre eux. Par exemple, P8, bien qu'éloigné, est très bien corrélé à P2 ($r^2=0.73$) et P5 ($r^2=0.68$). Plataforma est à peine mieux corrélé avec P8 ($r^2=0.57$) à une dizaine de mètres de distance, qu'avec les pluviomètres P2, P3 ou P4 ($r^2=0.68$) situés à plus de 2 km de distance. Les différences de Plataforma avec les totalisateurs peuvent être dues à une fuite ou à une plus grande perturbation du vent sur sa surface de captation qui est plus petite que celles des pluviomètres totalisateurs. L'erreur sur les lectures journalières (P4750) peut aussi être différente de l'erreur sur les lectures mensuelles (pluviomètres totalisateurs).

Tableau II 5.- a) Coefficients de détermination entre Plataforma avec des pluviomètres avec la même surface de captation (22cm) ; Botijlaca, ChuquiagUILlo, El Alto et Zongo divisée selon deux périodes : 1981-2010 et 2000-2010. b) Coefficients de détermination entre Plataforma et les totalisateurs (1994-2010)

a

r^2	Botijlaca	ChuquiagUILlo	El Alto	Zongo
Plataforma 1981-2010	0,61	0,29	0,44	
Plataforma 2000 -2010	0,46	0,16	0,34	0,59

b)

	Plataforma	P1	P2	P3	P4	P5	P8
Plataforma	1,00	0,61	0,58	0,68	0,68	0,59	0,57
P1	0,61	1,00	0,78	0,54	0,74	0,77	0,41
P2	0,68	0,78	1,00	0,65	0,78	0,84	0,73
P3	0,68	0,54	0,65	1,00	0,86	0,70	0,66
P4	0,68	0,74	0,78	0,86	1,00	0,86	0,67
P5	0,59	0,77	0,84	0,70	0,86	1,00	0,68
P8	0,57	0,41	0,73	0,66	0,67	0,68	1,00

Une deuxième analyse annuelle avec l'ellipse de Bois est faite à Plataforma, (Fig. II.-9). Pour cette méthode, on prend comme stations de base les pluviomètres qui présentent les plus fortes corrélations avec Plataforma ; Botijlaca [1978-2010], Zongo [2001-2010] et P3 [1994-2010]. On voit dans les trois cas que toutes les années sont situées à l'intérieur de l'ellipse de Bois avec 99% de signification. A noter que l'année 1986 est située à la limite de l'ellipse pour la comparaison Plataforma-Botijlaca, c'est pourquoi nous effectuons une correction sur sa série mensuelle.

On montre ci-dessous les années qui sortent de l'ellipse avec un niveau de signification de 80% :

Botijlaca : années 1983, 1984, 1985, 1986, 1992 et 1998

Zongo : années 2008 et 2009

P3 : Aucune année.

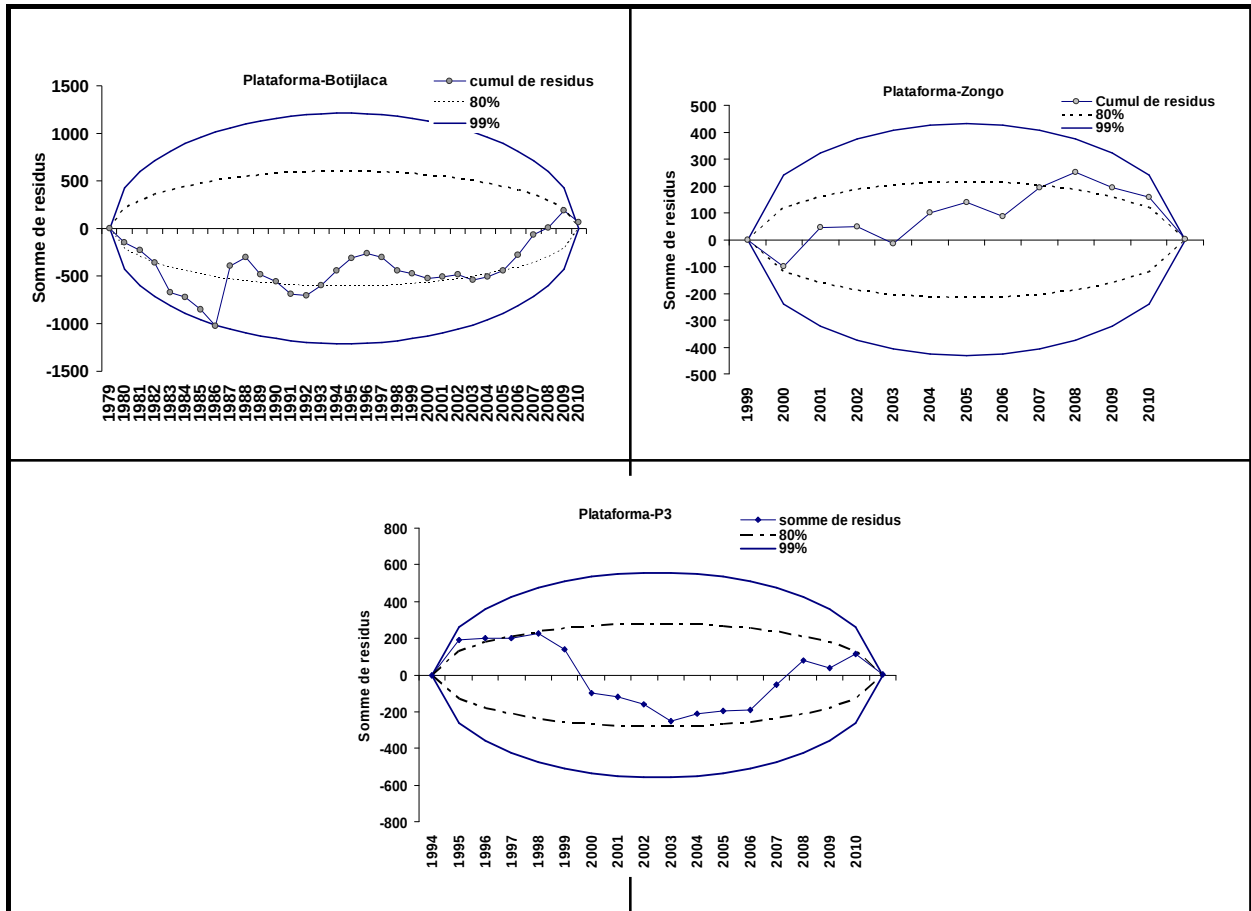


Figure II 8 - Ellipse de Bois de Plataforma comparée à Botijlaca (1979-2010), Zongo (2000-2010), et P3 (1995-2010). En noir ellipse à 99% de confiance et en pointillées à 80%. La courbe donne la somme des résidus de chaque station

Jusqu'ici on a fait une analyse pour détecter des erreurs à pas de temps annuel, cependant à cette échelle les erreurs mensuelles et journalières ne peuvent pas être mises en évidence. Alors, pour résoudre ce problème, Plataforma est comparé mensuellement par régression linéaire avec Botijlaca, Zongo et P3 (Fig. II.-10). Les mois d'avril à septembre sont les plus importants de l'année (voir Fig. I.-4), donc une variation pendant ces mois peut faire varier la moyenne annuelle. C'est pourquoi, on concentre cette analyse deux à deux en prenant en compte seulement ces mois.

Les coefficients de détermination et les valeurs de la pente (a) montrent une plus forte relation avec Botijlaca et Zongo ($r^2 \geq 0.75$), et plus faible avec P3 ($r^2 = 0.57$). Cette faible relation est expliquée par la différence de la taille de captation (Fig. II.-2) décrite dans la section II.1.1.2. La pente de régression (a) montre que P3 capte 10mm d'eau par mois de plus que Plataforma [Sicart, 2002]. Les ordonnées à l'origine (b) révèlent que Plataforma présente une variabilité durant la saison des pluies d'environ 17% par rapport à Botijlaca et 11% par rapport au Zongo et 1% par rapport à P3 (environ 17 et 11 mm d'eau par mois respectivement).

Entre Botijlaca et Plataforma on identifie 9 points éloignés (12/85, 1/86, 2/86, 3/86, 12/93, 1/99, 2/99, 11/07, 1/08), en considérant ou non ces points nous avons un coefficient r^2 qui passe de 0.66 à 0.81. La relation entre Zongo et Plataforma présente trois points bien éloignés (2/00 ; 1/08 et 1/06) qui font varier le coefficient r^2 de 0.82 à 0.84, ce qui n'est pas très significatif. Finalement la relation entre P3 et Plataforma montre plus de points éloignés (9 points) sur une période plus courte par rapport aux deux autres stations. Ces points sont 2/97, 12/98, 1/99, 2/99, 3/99, 12/00, 3/02, 01/96, 11/07, ils font passer r^2 de 0.57 à 0.64.

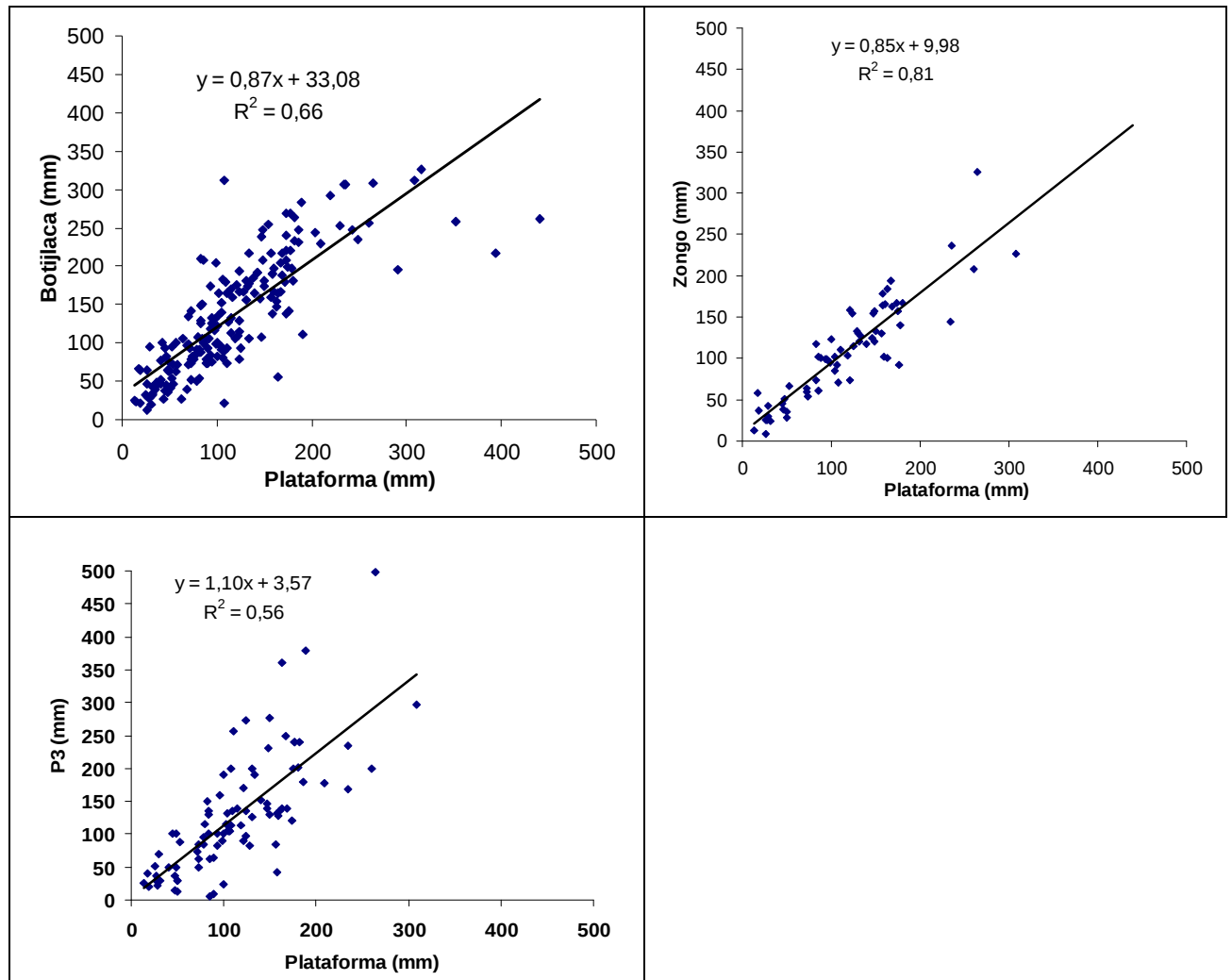


Figure II-9.- Nuage de points entre Plataforma avec Botijlaca (186 points), Zongo (66 points), et P3 (102 points). Chaque point correspond à un mois compris entre novembre et avril.

Des points écartés ressortent de chaque nuage de points décrit dans la figure ci-dessous. Dans la plupart des cas, les erreurs ou points hors nuage sont dus soit à des lacunes mensuelles ou journalières, soit à de mauvaises mesures prises par les observateurs. Afin de limiter les erreurs, une reconstitution des données mensuelles et journalières de Plataforma est faite dans la section suivante (voir Tableau II.6).

Reconstitution des données mensuelles et journalières

Dans cette section on présente la reconstitution mensuelle (13 mois) et journalière (151 jours) de Plataforma. Nous corrigeons seulement les mois de la saison humide (novembre à mars), car cette saison est la plus importante et produit les plus forts écarts sur la précipitation annuelle.

La méthodologie suivie pour les données mensuelles (m) et journalières (j) se base sur l'équation II.6 pour des régions montagneuses [Unesco, 1982].

$$P_X = \frac{\bar{P}_X}{3} \left[\frac{P_A}{\bar{P}_A} + \frac{P_B}{\bar{P}_B} + \frac{P_C}{\bar{P}_C} \right] \quad (\text{Eq. II.-6})$$

Avec

P_A, P_B, P_C : Précipitations (mensuelle ou journalière) sur les stations A, B et C durant la période manquante de la station X.

$\bar{P}_A, \bar{P}_B, \bar{P}_C, \bar{P}_X$: Moyennes de précipitation (mensuelle ou journalière) d'une période en commun avec la station X

Les stations prises pour corriger les données mensuelles entre 1980 et 1994 sont Botijlaca et El Alto pour sa proximité à Plataforma et qui compte avec une base de données mensuelle disponible. Depuis l'année 1994 nous utilisons P3, Botijlaca et Zongo (depuis l'année 2000), qui sont des pluviomètres avec la plus forte relation avec Plataforma (Tableau II.5).

Pour les données journalières nous utilisons comme stations de base Botijlaca et El Alto pour les années antérieures à 2000 et pour la période 2000-2010 nous ajoutons le pluviomètre du Zongo. Le tableau II.6 montre les mois corrigés et non corrigés. Les mois de janvier 1982 et novembre 1982 présentent des lacunes dans la série, c'est pourquoi ils ne sont pas mentionnés dans la Fig. II.-9 (Botijlaca-Plataforma). Les corrections des données journalières sont présentes dans l'annexe 1

Tableau II 6.- Valeurs mensuelles sans correction (brutes) et valeurs corrigées pour le pluviomètre de Plataforma.

Date	Valeurs brutes (mm)	Valeurs corrigés (mm)
Janv.-82	0	204
Nov.-82	0	95
Déc.-85	152	226
Janv.-86	291	149
Févr.-86	440	216
mars.-86	110	155
janv.-90	86	226
janv.-91	86	179
mars-91	41	88
déc.-98	49	102
janv.-99	82	150
févr.-99	107	187
janv.-06	308	238

Les données aberrantes sont dues à des lacunes sur la série ou à des erreurs de mesures qui existent surtout durant la saison humide. Les années 1981-82 et 1985-86 présentent des valeurs faibles à cause de lacunes journalières pour les mois de décembre, janvier et février. Durant l'année 1989-90 il existe une baisse anormale de la précipitation en janvier qui engendre un déficit dans la précipitation annuelle. Un cas similaire est visible pour l'année 1998-99, qui présente des précipitations particulièrement faibles durant les mois de décembre, janvier et février ce qui cause une forte diminution de la précipitation annuelle. Ces nouvelles valeurs corrigées sont utilisées pour l'analyse de la variabilité interannuelle, saisonnière et sa relation avec les débits (chapitres III, IV et V).

II.3.- ANALYSE DES DEBITS DE LA STATION TUBO_4830m : COMPLEMENT ET RECONSTITUTION DES DONNEES JOURNALIERES

La station Tubo_4830, mesure les débits du torrent émissaire du glacier Zongo (Fig. II-5). On propose une analyse détaillée de cette station, des données disponibles et de leur traitement. La méthode de comblement de lacunes journalières avec l'utilisation de stations hydrométriques de références, le canal Tubo_Cobee et Alpaca sera présentée.

Le tableau II.3 recense toutes les lacunes de débits moyens mensuels déduits des enregistrements instantanés au limnigraphe. Ces lacunes mensuelles sont généralement dues à des travaux de génie civil à la station où bien à des défauts d'enregistrement sur les données journalières.

Pour combler et reconstituer ces données, nous employons comme station de base Tubo_Cobee, car c'est la plus proche et elle reçoit les eaux versées du Tubo_4830. Ces deux stations (Tubo_Cobee et Tubo_4830) sont connectées par un canal de moins d'un kilomètre (Fig. II.3) et présentent une

corrélation suffisante ($r^2=0.65$, $n=6970$ et pour la période 1992-2010) pour représenter la variabilité journalière. De cette manière, la station Tubo_Cobee sera utilisée autant que faire ce peut, pour le comblement de données de Tubo_4830.

Cependant, comme le canal est conçu pour faire transiter des débits au maximum de $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$, et au-delà de cette limite, il se produit un débordement qui invalide la relation entre les débits mesurés aux stations Tubo_4830 et Tubo_Cobee. Les débordements ont lieu entre le mois d'octobre et décembre, durant les périodes des maximums de débits (Fig. II.-11).

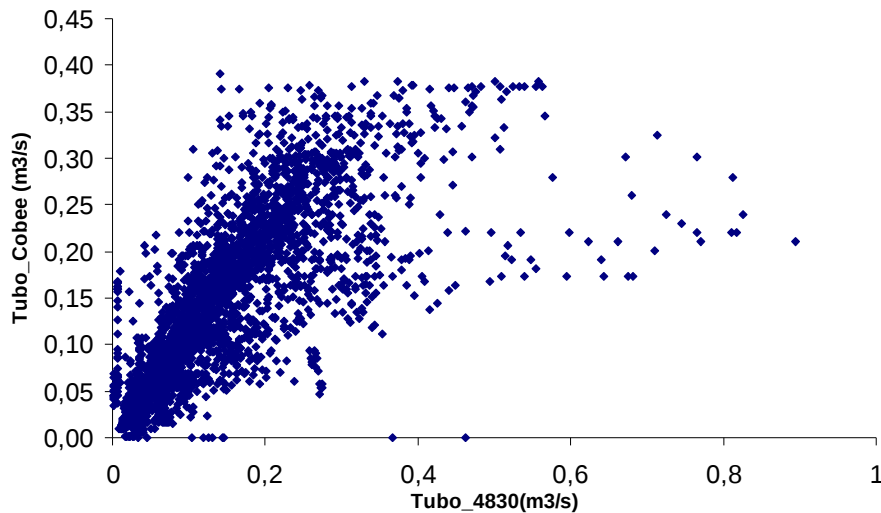


Figure II 10.- Nuage de points de données journaliers entre la station Tubo_Cobee et la station Tubo_4830 (1999-2010, $n=4015$ points).

Pour tenir compte de ce phénomène de saturation, les données sont divisées en deux groupes : les journées où le Tubo_Cobee est saturé et les autres. Pour les jours saturés, nous utilisons conjointement les mesures du canal Tubo et le canal Alpaca (Eq. II-9), par contre les jours non saturés nous prenons seulement le canal Tubo_Cobee comme station de base. Notre travail est la suite d'une étude faite par Berthier, 1998, qui propose une méthode de reconstitution des données de débits journaliers de la station Tubo_4830 à partir de mesures des canaux Tubo et Alpaca, en appliquant les corrélations multiples [Ribstein, 1995].

II.3.1 Journées sans saturation ($Q \leq 0.37 \text{ m}^3/\text{s}$)

Pour ces journées, seuls les débits du Tubo_Cobee, du jour même ainsi que les débits de la veille à 15 heures et du lendemain à 7 heures sont utilisés, en employant l'équation suivante :

$$Q_{\text{jour}} = 0.17 * Q_{\text{Tubo15h-j-1}} + 0.35 * Q_{\text{Tubo7hj}} + 0.35 * Q_{\text{Tubo15hj}} + 0.41 * Q_{\text{tubo7hj+1}} - 2.6 \quad (\text{Eq.II-7})$$

Avec :

$Q_{\text{Tubo15h-j}}$: Débit du canal Tubo à 15h la veille du jour j m^3/s

Q_{Tubo7hj} : Débit du canal Tubo à 7h du jour m^3/s

Q_{Tubo15hj} : Débit du canal Tubo à 15h du jour m^3/s

$Q_{\text{Tubo7hj+1}}$: Débit du Tubo à 7h du lendemain du jour j m^3/s

Le travail de Berthier révèle des résultats assez cohérents entre la période 06/80 à 06/98 en appliquant cette équation ($r^2=0.79$ entre données reconstituées et mesurées). Ainsi, l'équation II-8 sera utilisée pour reconstituer les données journalières manquantes de la période qui s'étend de 07/98 à 08/10.

II.3.2 Journées avec saturation ($Q \geq 0.37\text{m}^3/\text{s}$)

Le calcul est fait sans tenir compte de Q_{cobee15h} , car c'est à cette heure qu'ont lieu les débits les plus forts de la journée causant des débordements, et donc des lacunes. Les données du canal Alpaca, permettent de palier en partie ces lacunes, en utilisant la formule suivante :

$$Q_{\text{jour}} = -0.25 * Q_{\text{Alpaca7h-j}} + 0.42 * Q_{\text{Tubo_Cobee7hj}} + 0.16 * Q_{\text{Alpaca15hj}} + 0.57 * Q_{\text{Tubo_Cobee7hj+1}} + 137.7 \quad (\text{Eq.II-7})$$

$Q_{\text{Alpaca7h-j}}$: Débit du canal Alpaca à 7h du jour j-1 (l/s)

$Q_{\text{Tubo_Cobee7hj}}$: Débit du canal Tubo_Cobee à 7h du jour j (l/s)

$Q_{\text{Alpaca15hj}}$: Débit du canal Alpaca à 15h du jour j (l/s)

$Q_{\text{Tubo_Cobee7hj+1}}$: Débit du Tubo_Cobee à 7h du jour j+1 lendemain (l/s)

$Q_{\text{Tubo_Cobee15hj-1}}$: Débit du Tubo_Cobee à 15 hdu jour j-1 (l/s)

Q_{Tubo15hj} : Débit du Tubo_cobee a 15h du jour j (l/s).

Comme pour les jours sans saturation, l'équation ci-dessus provient du travail de Berthier qui a été déterminée pour la période 06/80 à 06/98. Dans cette étude, la comparaison des débits reconstitués avec les débits mesurés en utilisant cette formule montre qu'il n'y a pas d'aberration dans les nouveaux débits, en présentant une assez bonne corrélation ($r^2=0.46$). Donc, nous utilisons l'équation II-7 lors des journées avec saturation pour mettre à jour l'information des débits depuis juillet 98 jusqu'en août 2010.

Les résultats des données reconstitués à pas de temps journalier présentent une fluctuation assez cohérente par rapport aux données de Tubo_4830 (Fig. II-12). Les mois corrigés (calculé à partir des valeurs journalières) ne présentent pas de forts écarts avec les mois mesurés. C'est-à-dire que les données journalières reconstituées ne font pas varier la moyenne mensuelle des données mesurées, ceci est un critère permettant de conforter la bonne reconstitution de la série temporelle de débits.

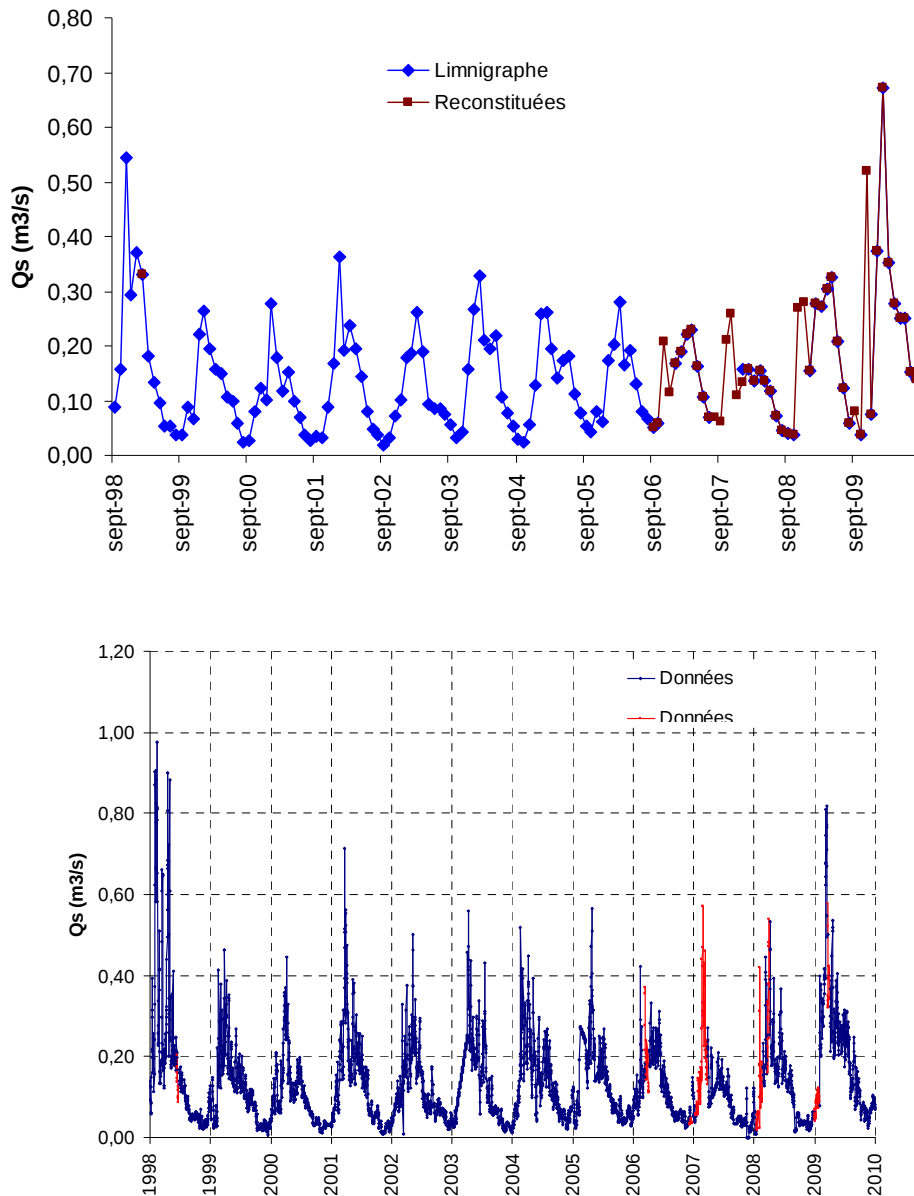


Figure II-11 En haut la fluctuation mensuelle des données mesurée par la station 4830 et les données reconstituées (moyenne des données journalières reconstituées). En bas la fluctuation journalière des débits mesurés (en bleu) et reconstitués (en rouge)

Dans cette section nous présentons une méthodologie pour combler et reconstituer les données journalières de la station Tubo_4830. Les équations présentées sont obtenues depuis le travail de Berthier, 1998. Nous constatons que les écarts entre les données mesurés et reconstitués sont faibles, donc ces équations (avec et sans saturation) sont toujours adéquates pour faire une reconstitution des données de la station Tubo_4830. En total 250 jours ont été reconstitués 218 jours sans saturation et 32 jours avec saturation (les données journalières reconstituées sont présentées dans l'annexe 1).

II.4.- ANALYSE DE LA TEMPÉRATURE DE LA STATION MEVIS (4750m)

Comment le montre la Fig. II.-3 la station Mevis est la station météorologique la plus proche du glacier qui possède des données de température et qui représente l'environnement sans neige hors glacier. Afin d'identifier de possibles « outliers », causés par des erreurs de mesures ou par des anomalies extrêmes nous montrons sa relation avec des stations proches qui comptent avec une même longueur de données annuelles (Fig. II.-13). Nous notons que la plus forte corrélation de la station Mevis est avec El Alto et avec le capteur Hobo situé sur la moraine ($r > 0.87$). De plus, nous pouvons voir que la relation entre les stations de l'Altiplano sont assez proches (El Alto, Ayo Ayo et Collana), en montrant des corrélations supérieurs à 0.75. Cela montre que le gradient thermique est faible entre les stations de l'Altiplano. En revanche, plus au sud de l'Altiplano la différence de température avec la partie nord peut arriver à 10°C ; plus au sud plus froid a causé surtout de l'intensité de la radiation nocturne [Ronchail, 1995]

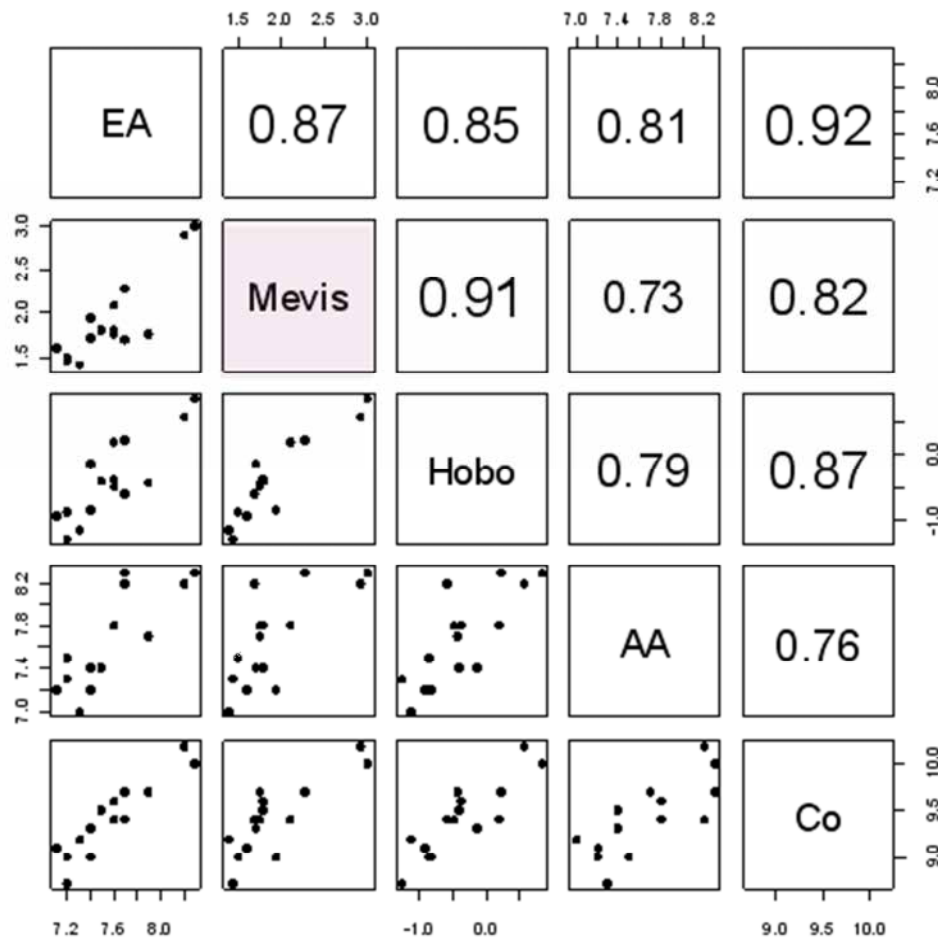


Figure II.-12.- Matrice de corrélations entre les stations de température les plus proches du glacier : El Alto (EA), Mevis, Hobo (5150m), AA (Ayo Ayo), Co (Collana) sur la période (1996-2010). Les chiffres de la partie droite indiquent les valeurs de chaque corrélation. La taille de la police est proportionnelle aux valeurs, plus grande est la police plus forte est la corrélation. En gris la station Mevis.

Pour vérifier la variabilité interannuelle de la température mesurée à la station Mevis, nous comparons les mesures avec les stations mieux corrélées montrées dans la fig. II-13, à savoir le Capteur Hobo à 5150m et la station météorologique El Alto (Fig. II-14). En général il existe une variabilité interannuelle similaire entre ces trois stations, cependant nous voyons une forte différence sur la moyenne annuelle qui s'explique assez bien par les différences d'altitude entre les 3 stations. De plus, les coefficients de détermination calculés entre les 3 stations révèlent que la station Mevis est mieux représentée par le capteur Hobo ($r^2=0.83$) que par la station de El Alto ($r^2=0.43$).

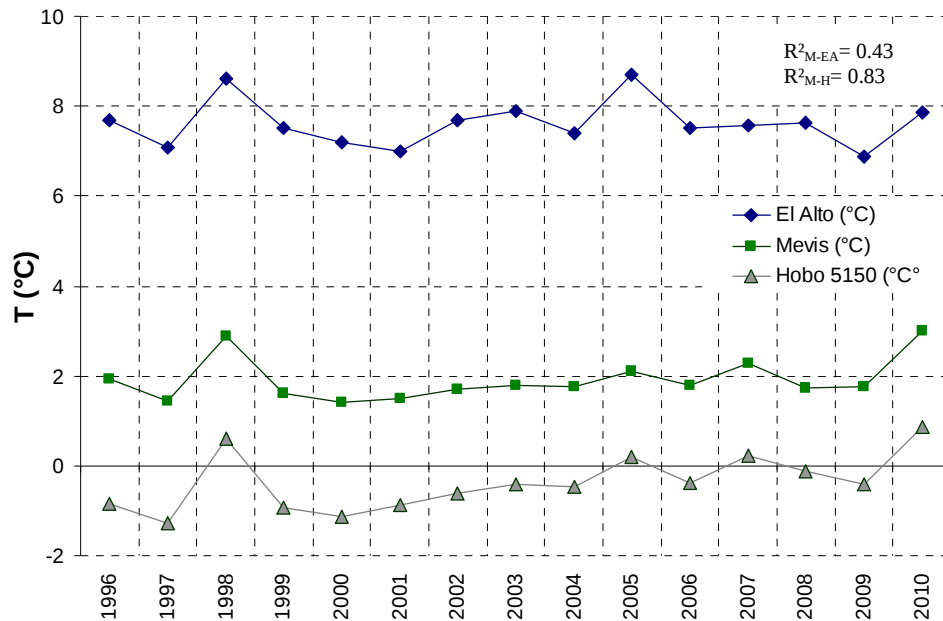


Figure II 13- Variation interannuelle de la température des stations El Alto, Mevis et Hobo depuis l'année 1995 à 2010. Moyenne : El Alto 7.62°C ; Mevis 2.02°C et Hobo =0.3°C. En haute le coefficient de détermination entre la Mevis avec El Alto ($r^2=0.43$) et l'Hobo ($r^2=0.83$)

II.5 CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Une compilation des données pluviométriques journalières a permis d'identifier 28 stations pour effectuer une analyse spatiale et cinq stations pour effectuer une analyse temporelle sur la zone d'étude. En plus, cette compilation nous a aidées à construire deux bases de données de la vallée du Zongo, l'une à pas de temps mensuelle (32 années) et l'autre à pas de temps journalier (20 années).

La méthode de l'ellipse de Bois, nous a permis de détecter des erreurs annuelles sur les séries des stations Ayo Ayo (1983-84), Patacamaya, San Calixto, El Alto et Chuquiaguillo (1987 au 1991)

L'analyse du pluviomètre de Plataforma a mis en évidence des erreurs de mesures à l'échelle mensuelle, qui n'étaient pas visibles à l'échelle annuelle. Cette comparaison a été faite avec les stations les plus proches ayant une surface de captation identique (Botijlaca et Zongo) et avec un pluviomètre totalisateur avec une taille de captation différente (P3). Les résultats montrent que Plataforma présente des données mensuelles aberrantes pour les années hydrologiques 1983, 1986, 1991, 1999 et 2006. Cependant, en enlevant ces années on peut dire que le pluviomètre de Plataforma reste fiable pour l'analyse à la suite.

Les données de la station Tubo_4830 ont été traitées séparément en deux fichiers, avec et sans saturation. En total nous avons fait une reconstitution de 250 données journalières ; 218 sans saturation et 32 avec saturation. Les équations utilisés (avec et sans saturation), sont les résultats de corrélations multiple entre juin 1980 et juin 1998.

A partir d'une analyse mensuelle de la température annuelle de la Mevis, nous pouvons conclure qu'elle a une relation plus forte avec le capteur situé sur la moraine (5150 m) qu'avec les stations situées sur l'Altiplano. De plus, nous notons que les données annuelles de la Mevis ne montrent pas d'erreur dans sa série

Le tableau ci-dessous résume la disponibilité des données de précipitation ; températures et de débits qui vont être employées pour les chapitres III, IV et V. Il faut mentionner que le groupement des stations selon la situation géographique a été faite en utilisant la méthode du vecteur régional, qui consiste à élaborer à partir de l'ensemble de l'information disponible une station fictive qui est représentative de toute la zone. Pour chaque station une moyenne est calculé sur l'ensemble de la période d'étude, et pour chaque année, un indice est calculé et sera supérieur à 1 lorsque l'année est excédentaire, et inférieur à 1 lorsque l'année sera déficitaire. Ainsi les stations qui sont à l'intérieur de ces limites (-1,1) sont classifiées comme une région car cette méthode prend en compte l'information d'une région supposée climatiquement homogène

Tableau II 7.- Synthèse des données utilisées dans la présente étude a) Précipitation b) débits et c) température. En gras souligné les pluviomètres de l'Altiplano, en italique les pluviomètres de la ville de La Paz et en gras italique les pluviomètres de la vallée du Zongo.

a)

Pluviomètre	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (msnm)	Période de données journalières	Période de données mensuelles
<u>Ayo Ayo</u>	-17,09	-68,04	3880	1953-2010	1953-2010
<u>Patacamaya</u>	-17,24	-67,92	3940	1950-2010	1945-2010
<u>collana</u>	-16,92	-68,34	3983	1978-2010	1978-2010
<u>El Alto</u>	-16,51	-68,21	4021	1978-2010	1978-2010
<u>Calamarca</u>	16° 54'	68° 08'	3954	1987-2001	1987-2001
<u>Belen</u>	16° 04'	68° 40'	3820	1949-2008	1949-2008
<u>Calacoto</u>	17° 17'	68° 38'	3805	1943-2004	1943-2004
<u>Viacha</u>	16° 39'	68° 18'	3850	1987-2010	1987-2010
<u>Chacaltaya</u>	16° 19'	68° 10'	5220	-----	1952-2010
<i>San Calixto</i>	-16,49	-68,14	3577	1950-2010	1948-2010
<i>Villa Copacabana</i>	-16,48	-68,13	3668	1978-2010	1978-2010
<i>Chuquiaquillo</i>	-16,44	-68,1	4312	1975-2010	1975-2010
<i>Alto Obrajes</i>	16° 31'	68° 07'	3480	2002-2010	2002-2010
<i>Achocalla</i>	16° 34'	68° 10'	3680	2000-2010	2000-2010
<i>Palca</i>	16° 34'	67° 59'	3333	1972-2010	1972-2010
<i>Ovejuyo</i>	16° 31'	68° 02'	3420	1978-2000	1978-2000
<u>Zongo</u>	-16,19	-68,13	4360	2000-2010	2000-2010
<u>Plataforma</u>	-16,28	-68,12	4750	1980 -2010	1978-2010
<u>Tiquimani</u>	16°12'	68°07'	4022	1999-2010	1978-2010
<u>Botijlaca</u>	-16,2	-68,14	3757	1980 -2010	1978-2010
<u>Cuticucho</u>	16°08'	68°06'	2768	1980 -2010	1978-2010
<u>Santa Rosa</u>	16°07'	68°06'	2558	1980 -2010	1978-2010
<u>Sainani</u>	16°07'	68°05'	1548	1980-2010	1978-2010
<u>Chururaqui</u>	16°06'	68°03'	1888	1980-2010	1978-2010
<u>Harca</u>	16°03'	68°00'	1529	1980-2010	1978-2010
<u>Cahua</u>	16°3'	68°0,6'	1195	1980-2010	1978-2010

b)

Température (°C)	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (msnm)	Période mensuelle
Mevis	-16,28	-68,12	4750	1995-2010

c)

Débits (m³/s)	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (msnm)	Période de données
Tubo_4830	-16,27	-68,13	4830	1992-2010

CHAPITRE III

CARACTERISATION DU REGIME PLUVIOMETRIQUE

Comme cela a déjà été expliqué en introduction, la saisonnalité du régime pluviométrique et les effets thermiques associés sont des facteurs majeurs contrôlant le régime d'accumulation et de fonte sur les glaciers en général. Cette influence – qui sera étudiée plus en détail en section V – est particulièrement forte sur le glacier du Zongo qui se situe à la rencontre de deux grandes zones climatiques, l'Amazonie, d'un côté, l'Altiplano, de l'autre. On peut donc penser que la variabilité interannuelle du forçage de grande échelle – liée à El Niño/La Niña par exemple, va induire des années où le glacier sera plutôt sous influence climatique amazonienne ou plutôt être soumis à un régime pluviométrique altiplanique.

Quelques remarques préliminaires sont à considérer. La première est que sur le glacier lui-même, on ne dispose pas de séries de mesure longues et que, de toutes manières, la mesure de la précipitation à des altitudes où neige et pluie alternent reste un défi métrologique mal maîtrisé. Par ailleurs, comme nous sommes à la rencontre de deux régions climatiques, il nous est paru important de mener l'étude sur une région suffisamment large autour du glacier pour bien capter les différences qui existent entre ces deux régions – bien connues déjà dans leurs grandes lignes – mais aussi les gradients internes. Enfin, si c'est surtout la saisonnalité, et ses fluctuations, qui nous importent pour notre objectif glaciologique, nous avons pensé intéressant de descendre à des échelles plus fines pour caractériser aussi le régime pluviométrique journalier, en termes notamment d'occurrence et d'intensité. Ce chapitre constitue donc de fait une contribution à une meilleure connaissance **du régime pluviométrique dans son ensemble** pour cette zone de transition entre le climat amazonien et le climat de l'Altiplano bolivien.

Pour ce faire, vingt-six stations situées dans un rayon de 130 Km autour du glacier du Zongo ont été analysées au niveau spatial et quatre stations au niveau temporel. Ces pluviomètres sont répartis du Nord-est au Sud-ouest de l'Altiplano (Fig. III-1)

Comme cela est montré dans le tableau III.1 ci-dessous, trois sous-ensembles de données ont été constitués à partir des relevés disponibles à ces 28 stations (voir par ailleurs la description détaillée des données fournie dans le chapitre II) :

- Premier groupe : données journalières sur 60 ans, disponibles à 3 stations (Ayo Ayo, Patacamaya et San Calixto).
- Deuxième groupe : données mensuelles sur une période de 32 ans maximum et 10 ans minimum disponibles sur 26 stations.
- Troisième groupe : données journalières sur 19 ans. Il s'agit des mêmes 26 pluviomètres que ceux du deuxième groupe mais

malheureusement les données journalières pour les pluviomètres situés dans la vallée du Zongo (Plataforma et Harca) ne sont disponibles qu'à partir de 1992 ; donc, afin d'étudier les cycles saisonniers et les distributions de la précipitation journalière nous ne pourrions utiliser que cette période courte de 19 ans.

Tableau III 1.- Synthèse des données pluviométriques utilisées pour ce chapitre.

	Pas de temps	Pluviomètre	Disponibilité des données	Type d'analyse
1er Groupe	Données journalières	Ayo Ayo	1950-2010	Temporelle (décennal)
		Patacamaya	1950-2010	Temporelle (décennal)
		San Calixto	1950-2010	Temporelle (décennal)
2eme Groupe	Données mensuelles	Ayo Ayo	1978-2010	spatiale
		Patacamaya	1978-2010	spatiale
		Collana	1978-2010	spatiale
		El Alto	1978-2010	spatiale
		Calamarca	1987-2001	spatiale
		Belen	1978-2008	spatiale
		Calacoto	1978-2004	spatiale
		Viacha	1987-2010	spatiale
		Chacaltaya	1978-1996	spatiale
		San Calixto	1978-2010	spatiale
		Villa Copacabana	1978-2010	spatiale
		ChuquiagUILlo	1978-2010	spatiale
		Alto Obrajes	2000-2010	spatiale
		Achocalla	2000-2010	spatiale
		Palca	1978-2010	spatiale
		Ovejuyo	1978-2010	spatiale
		Zongo	2000-2010	spatiale
		Plataforma	1978-2010	spatiale
		Tiquimani	2000-2010	spatiale
		Botijlaca	1978-2010	spatiale
		Cuticucho	1978-2010	spatiale
		Santa Rosa	1978-2010	spatiale
		Sainani	1978-2010	spatiale
		Chururaqui	1978-2010	spatiale
		Harca	1978-2010	spatiale
		Cahua	1978-2010	spatiale
3eme Groupe	Données journalières	Patacamaya	1992-2010	Temporelle
		San Calixto	1992-2010	Temporelle
		Plataforma	1992-2010	Temporelle
		Harca	1992-2010	Temporelle

Le premier groupe est utilisé pour analyser statistiquement les fluctuations inter-décennales, interannuelles et saisonnières des dernières six décennies (1950-2010) sur la ville de la Paz et sur l'Altiplano.

Le deuxième groupe est utilisé surtout pour analyser spatialement la précipitation (voir tableau III.2). De plus, quatre stations de ce groupe sont aussi employées pour étudier les fluctuations interannuelles des 38 dernières années dans la vallée du Zongo, la Ville de La Paz et l'Altiplano (Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca). Une analyse des relations statistiques entre la variabilité pluviométrique (avec 11 stations) et El Niño/La Niña sera aussi conduite en prenant en compte trois indices (SOI : Southern Oscillation Index, MEI : Multivariate Enso Index, El Niño Modoki) ainsi que deux indices caractéristiques de l'océan atlantique tropical (SATL : Southern Tropical Atlantic et NATL : Northern tropical Atlantic).

Le troisième groupe est utilisé pour caractériser la précipitation journalière afin de définir les saisons humide et sèche en termes de quantité de précipitations, de fréquence et de distribution des événements pluvieux dans l'année. Cette analyse doit permettre de déterminer la durée de la saison des pluies et ses relations avec la précipitation annuelle.

Ce chapitre est divisé en deux sections. Tout d'abord nous caractériserons le gradient Nord est - Sud-ouest de la distribution spatiale de la précipitation lié à l'influence des deux régimes climatiques mentionnés plus haut, la vallée du Zongo (partie haute et moyenne) étant sous influence amazonienne, tandis que la ville de La Paz et l'Altiplano ont un climat altiplanique. Dans un deuxième temps, on s'intéressera au cycle saisonnier moyen ainsi qu'à ses fluctuations en fonction des années, puis à la variabilité interannuelle et décennale et à leur relation avec des anomalies à grandes échelles comme le phénomène « El Niño ».

III.1 VARIABILITE SPATIALE DE LA PLUIE

III.1.1 Effets conjugués de l'altitude et des gradients Est-Ouest

La distribution de la précipitation est liée, d'une part, au mouvement Nord - sud de la ZCIT et, d'autre part, aux effets orographiques de la cordillère ce qui va engendrer des régimes pluviométriques distincts dans la vallée du Zongo et sur l'Altiplano. Comme nous l'avons décrit dans le chapitre I, l'origine de la précipitation provient des masses d'air du bassin amazonien ; les nuages chargés d'humidité montent le long de la vallée du Zongo, en provoquant des précipitations de type orographique dans cette vallée. La cordillère agit comme une barrière entre l'Amazonie et l'Altiplano et produit une diminution de l'humidité relative de l'ordre de 15% [Ronchail, et al., 1995].

La carte des isohyètes (Fig. III-1) illustre la variabilité spatiale de la précipitation depuis l'Amazonie jusqu'à l'Altiplano. Les valeurs les plus fortes sont enregistrées du côté amazonien (de l'ordre de 2000 mm/an) et elles diminuent en s'approchant de la cordillère. De l'autre côté, se trouve la ville de La Paz, où les valeurs de la précipitation annuelle sont de l'ordre de 700 mm. Les masses d'air qui franchissent la Cordillère pénètrent dans le bassin de La Paz depuis sa partie haute en s'étalant vers le bas du bassin [Ramirez, et al., 1995]. Lorsque l'on s'éloigne de la cordillère plus au Sud sur l'Altiplano, les pluies diminuent pour atteindre des cumuls annuels de l'ordre de 400 à 600mm/an. Cependant, sur la partie nord-ouest, près du lac Titicaca les pluies augmentent pour approcher 800mm/an, à cause des effets locaux produits par ce lac et par la proximité de la cordillère. [Montes De Oca, 1995]

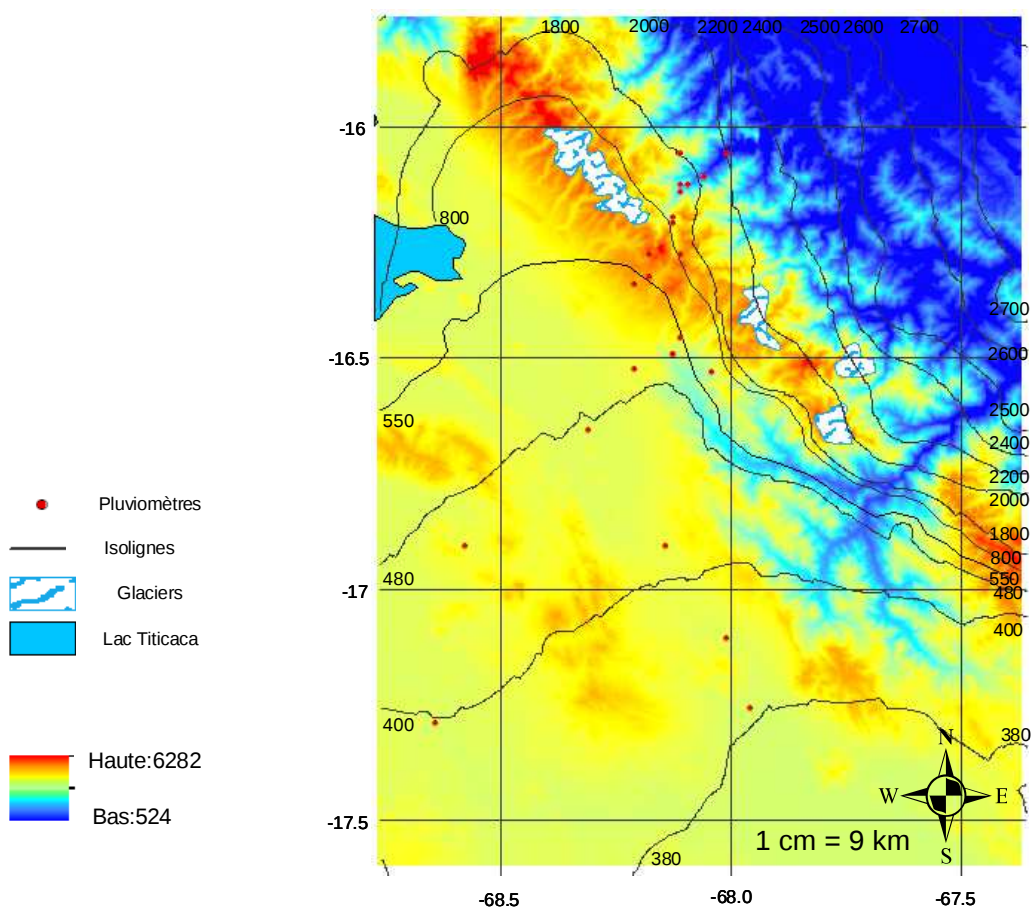


Figure III 1.- Carte des isohyètes de la région d'étude, composée à partir des données GPCC (Global Precipitation Climatology Centre). Les points rouges représentent les stations utilisées pour l'analyse temporelle entre 1992-2010.

(www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc)

A l'échelle du bassin, la précipitation dans la région est contrôlée par deux facteurs principaux: i) le gradient nord-est / sud-ouest depuis les zones humides de l'Amazonie jusqu'aux zones plus sèches de l'Altiplano ; ii) l'altitude, cette dernière étant en principe un facteur d'amplification par forçage orographique : ce n'est donc pas tant l'altitude absolue qui compte que la présence de pentes susceptibles d'aider au déclenchement de la

convection, lorsqu'existe une source d'humidité suffisante dans les environs. C'est exactement ce que l'on peut constater d'après les chiffres donnés dans [Ronchail et Gallaire, 2006]; la précipitation moyenne annuelle, calculée sur la période 1971-2001, augmente en effet de 1907 mm à Trinidad (140 m) à 2789 mm à Cahua (1195 m), puis elle diminue régulièrement pour atteindre 800 mm à Plataforma (4750 m), station la plus amont dans la vallée du Zongo. Cette diminution s'explique par le fait qu'en remontant la vallée on s'éloigne de la source d'humidité amazonienne, ce qui raccourcit notamment la durée de la saison des pluies.

Comme on peut le voir dans notre tableau III-2, où les stations sont classées par ordre de précipitation croissante, c'est la position le long du gradient nord-est / sud-ouest qui est finalement déterminante sur notre domaine d'étude.

On voit ainsi apparaître en première approximation deux sous-domaines – celui de la vallée du Zongo et celui de l'Altiplano. Comme notre première station vers l'Est est celle de Cahua qui correspond précisément au maximum pluviométrique d'après les travaux de [Ronchail et Gallaire, 2006] la pluie sur notre domaine ne cesse de décroître en remontant la vallée du Zongo vers le Sud-ouest. Puis, en continuant vers l'Ouest sur l'Altiplano l'altitude est plutôt décroissante, de même que la pluviométrie (Fig. III-.1) ce qui pourrait laisser croire à une corrélation positive entre altitude et pluie annuelle. En réalité, là encore c'est le fait de s'éloigner de l'Amazonie et de rentrer plus en profondeur dans le domaine des hautes pressions de l'Altiplano qui est le facteur explicatif principal. On observe d'ailleurs qu'il pleut plus à La Paz (3650 m) qu'à Collana (3983 m) ou Patacamaya (3789 m), car ces deux stations sont situées plus au sud-est et elles sont plus éloignées de la cordillère.

Tableau III 2.- Précipitation moyenne annuelle de 1973 à 2010 pour 28 stations situées entre 16°0' S - 68°20'O et 17°15'S-67°54'O.

	Latitude	Longitude	Altitude (m.s.n.m)	P annuelle (mm)
Calamarca	16° 54'	68° 08'	3954	384
Ayo Ayo	17° 06'	68° 00'	3956	400
Patacamaya	17° 15'	67° 57'	3789	386
Belen	16° 04'	68° 40'	3820	425
Calacoto	17° 17'	68° 38'	3805	429
Alto Obrajés	16° 31'	68° 07'	3480	460
Achocalla	16° 34'	68° 10'	3680	469
Viacha	16° 39'	68° 18'	3850	482
Chacaltaya	16° 19'	68° 10'	5220	509
Palca	16° 34'	67° 59'	3333	545
Milluni	16° 20'	68° 10'	4550	549
Collana	16°54'	68°34°	3983	555
SC	16° 29'	68° 07'	3658	566
Ovejuyo	16° 31'	68° 02'	3420	571
Hinchucota	16° 10'	68° 22'	4460	577
El Alto	16°31'	68°12'	4021	592
VC	16°29°	68°07'	3668	614
Zongo	16°16'	68°07'	4410	694
ChuquiagUILlo	16°27'	68° 06'	4080	713
Plataforma	16°16'	68°07'	4750	821
Tiquimani	16°12'	68°07'	4022	901
Botijlaca	16°11'	68°07'	3757	988
Cuticucho	16°08'	68°06'	2768	1936
Santa Rosa	16°07'	68°06'	2558	1938
Chururaqui	16°06'	68°03'	1888	1984
Harca	16°03'	68°00'	1529	2076
Sainani	16°07'	68°05'	1548	2088
Cahua	16°3'	68°0,6'	1195	2147

La Fig. III-2 représente la relation de la précipitation annuelle avec la latitude, la longitude et l'altitude dans la zone d'étude. Cette figure confirme qu'il n'y a pas de relation structurée entre la précipitation annuelle et la latitude ou la longitude. Le nuage de points est séparé en deux sous-ensembles totalement distincts ; aucune relation claire n'émerge, ni à l'intérieur de ces sous-ensembles, ni globalement, ce qui est logique puisque le gradient global est diagonal. Comme décrit dans le paragraphe précédent les pluviomètres qui montrent la précipitation la plus faible (Patacamaya, Ayo Ayo et Collana) sont situés dans la partie sud-est de la zone.

En ce qui concerne la relation avec l'altitude, on observe également deux sous - ensembles. Dans la vallée du Zongo, on a une relation décroissante entre ces deux variables, les pluviomètres les plus pluvieux étant situés dans la section basse de cette vallée. Par contre, pour le sous-ensemble La Paz/ Altiplano, le nuage de points prend la forme d'un cercle et aucune relation linéaire n'est identifiable.

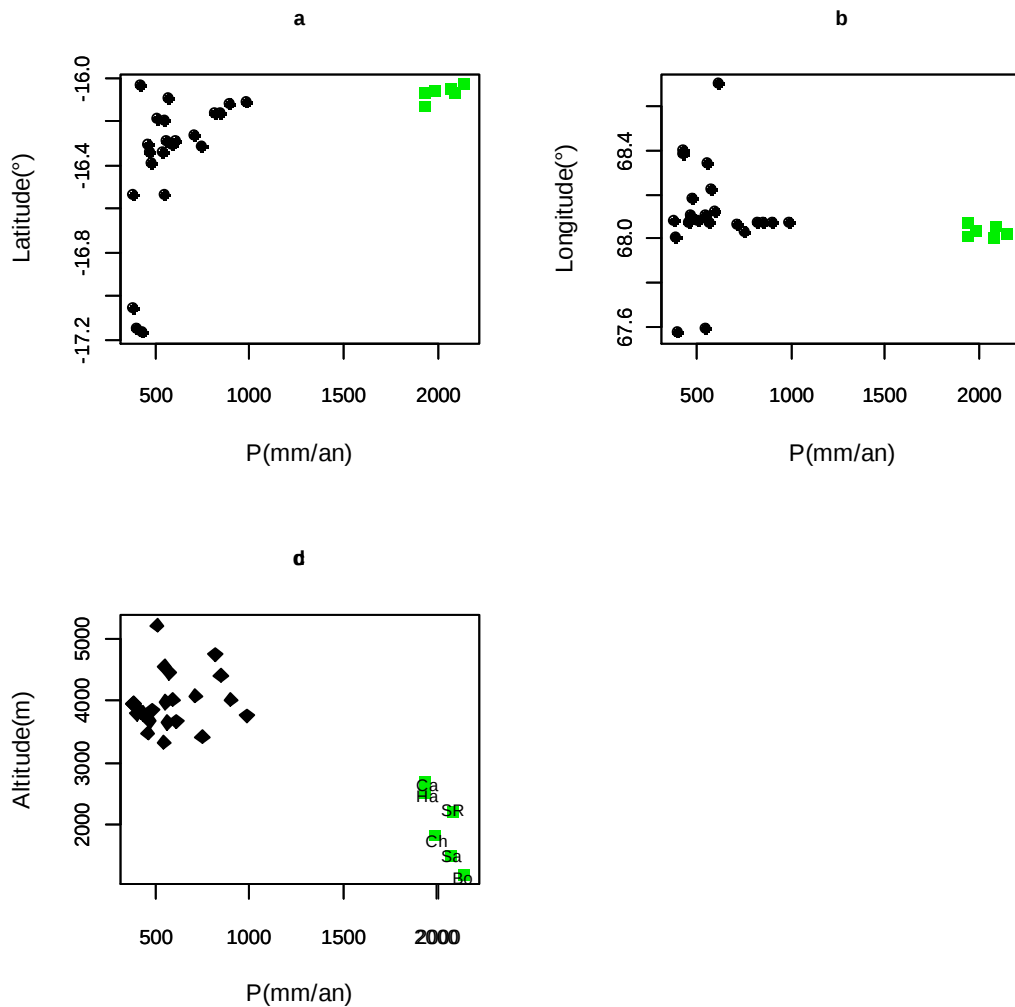


Figure III 2.- Relations entre pluies annuelles et latitude (a), longitude (b) altitude (c). En vert des stations situées dans la vallée du Zongo : Ca : Cahua, Ha : Harca, Ch: Chururaqui, SR: Santa Rosa, Sa: Sainani, Bo: Botijlaca. En noir les stations situées sur l'Altiplano et à la ville de La Paz. Les précipitations moyennes annuelles des stations sont données sur le tableau III-2.

III.1.2 Distinction de quatre régimes pluviométriques

III.1.2.1 Pluviomètres représentatifs de chaque région.

Dans la zone d'étude, on peut distinguer quatre régions de régimes pluviométriques différents : (1) la section moyenne de la vallée du Zongo ; (2) la section haute de la vallée du Zongo ; (3) la ville de La Paz ; (4) l'Altiplano. L'objectif de cette section est sectionner une station représentative de chaque régime pluviométrique.

Sur la ville de La Paz et l'Altiplano nous avons appliqué la méthode du vecteur régional qui consiste à élaborer une station fictive qui soit représentative de chaque zone climatique [Brunet-Moret 1971] ; pour mettre en œuvre cette méthode il faut un nombre suffisant de stations, et une absence de structuration par la position géographique. Ce n'est pas le cas

dans la vallée du Zongo du fait du gradient Nord-est / Sud-ouest, ce qui empêche de déterminer une station représentative de la région avec la méthode du vecteur régional. Les pluviomètres représentatifs de la vallée du Zongo sont sélectionnés par chaque tranche d'altitude. Ainsi, Harca, (1529m) sera le pluviomètre qui représente la section moyenne de la vallée du Zongo. Ce pluviomètre est le plus bas de la vallée avec un registre de mesure journalière de 19 ans en commun avec les autres pluviomètres. Plataforma (4750m), est le pluviomètre plus haut de la vallée du Zongo, il le représente donc le régime pluviométrique de la section haute de la vallée du Zongo.

Le tableau III-3 montre le coefficient de variation (Eq.-III-1) et le coefficient de détermination (r^2) entre les pluviomètres de l'Altiplano et de la ville de La Paz avec leur station fictive respective.

$$CV = a/x \quad (Eq.- III. 1)$$

Avec :

CV : Coefficient de variation

a = Ecart-type

x = Moyenne

Sur l'ensemble des stations de l'Altiplano, quatre pluviomètres (Ayo Ayo, Patacamaya, Collana et El Alto) présentent des corrélations supérieures à 0.75 et des CV inférieurs à 0.25 par rapport à la station fictive ce qui indique une bonne représentativité de la région (Tableau III-3(a)). On peut alors sélectionner un de ces quatre pluviomètres pour représenter le régime pluviométrique de l'Altiplano. La corrélation entre Chacaltaya et le vecteur régional est la seule qui n'est pas significative avec un niveau de confiance à 95%. Pour cette étude, on a choisie Patacamaya, car c'est la station présentant la meilleure continuité des données. De plus, par son éloignement de la cordillère (107 Km), elle est la plus représentative du régime pluviométrique de l'Altiplano (précipitation annuelle la plus faible de toute la zone d'étude).

Dans le cas de la Ville de La Paz, cette représentativité est visible pour trois pluviomètres (Chuquiaguilo, Villa Copacabana et San Calixto) qui présentent des corrélations supérieures à 0.8 et des CV inférieurs à 0.25. (Tableau III-3(b)). Alto Obrajes montre une corrélation de -0.24 non significative au seuil de 95%, indiquant qu'elle ne se trouve pas dans le même groupe climatique que les autres stations. On choisit alors le pluviomètre de San Calixto comme étant le plus représentative du régime pluviométrique de La Paz due à sa position centrale (au milieu de la ville). Le pluviomètre de Ovejuyo montre de la même manière une bonne corrélation avec la station fictive, et aussi un CV inférieur à 0.25 ; cependant ce pluviomètre ne sera pas pris en compte dans les analyses qui vont suivre, car sa série est plus courte (uniquement 23 années) et présente plus de 15% de lacunes sur sa série temporelle.

Tableau III 3.- Coefficient de variation (CV) et coefficient de corrélation (r) entre les pluviomètres à pas de temps annuel et la station fictive obtenue avec la méthode du vecteur régional. En gras les pluviomètres ayant un coefficient de corrélation >0.75 et un coefficient de variation < 0.25 . (Sauf Ovejuyo, voir texte). Analyse faite sur une période de 32 ans (1978-2010). a) Altiplano et b) Ville de La Paz.

a)

Pluviomètre	CV	Coefficient de corrélation (r)
Ayo Ayo	0,24	0,76
Calacoto	0,36	0,59
Calamarca	0,26	0,36
Chacaltaya	0,27	-0,02
Collana	0,22	0,85
El Alto	0,17	0,82
El Belen	0,2	0,7
Patacamaya	0,25	0,78
Viacha	0,26	0,94

b)

Pluviomètre	CV	Coefficient de corrélation (r)
ChuquiagUILlo	0,14	0,88
Ovejuyo	0,22	0,89
San Calixto	0,18	0,91
Villa Copacabana	0,17	0,95
Alto Obrajes	0,09	-0,24

Seuls les pluviomètres en gras du tableau III.3 seront employés pour l'analyse de la relation entre le glacier et les autres régimes pluviométriques (section III.1.3), car ils sont bien corrélés avec la station fictive qui représente chaque région étudiée. Les autres stations soit ont des séries trop courtes au pas de temps journalier, soit sont mal corrélées avec la station fictive représentative de la supposée région d'appartenance. Dans l'introduction nous avons décrit pour chaque type d'analyse les pluviomètres utilisés.

III.1.2.2 Représentativité sur le glacier

Le vecteur régional a permis d'identifier les pluviomètres totalisateurs les plus représentatifs des précipitations qui ont lieu sur le glacier (tableau III-4). Nous voyons que les corrélations entre les totalisateurs et la station fictive sont significatives (95%) et assez élevées ($r > 0.9$) sauf pour P1 qui se trouve sur un col à haute altitude (Fig. II-3) et dont la sous-captation due au vent peut être plus importante que pour les autres pluviomètres. Ces fortes

corrélations nous indiquent de bonnes relations entre l'ensemble des pluviomètres du glacier. En plus nous voyons que les coefficients de variations sont assez faibles ($CV < 0,2$), en révélant une faible variabilité interannuelle aux cinq pluviomètres.

Tableau III 4.- Coefficient de variation (CV) et de corrélation (r) entre la station fictive du vecteur régional et les pluviomètres totalisateurs autour du glacier du Zongo (1991 – 2009)

	CV	Coefficient de corrélation (r)
P1	0,12	0,85
P2	0,15	0,93
P3	0,20	0,93
P4	0,18	0,97
P5	0,14	0,95

Nous n'utiliserons pour l'analyse ci-après que les pluviomètres P4 et P5, car ce sont les plus représentatifs pour le glacier du Zongo ($r > 0.95$).

III.1.3 Relation entre la précipitation à proximité du glacier et les autres régimes pluviométriques.

Le but de cette section est de sélectionner les pluviomètres ayant de longues séries qui peuvent aider à comprendre le régime pluviométrique du glacier à pas de temps journalier. Donc, nous allons caractériser le régime pluviométrique du glacier par rapport aux régimes pluviométriques des autres régions, c'est à dire identifier si le climat du glacier s'apparente plutôt à un régime amazonien ou altiplanique.

Les pluviomètres représentatifs du glacier (P4 et P5) et ceux de chaque région sont analysés par des coefficients de détermination (r^2) au pas de temps mensuel sur la période 1994-2010, en considérant seulement la saison des pluies (novembre à mars). Les pluviomètres plus représentatifs de chaque région identifiés dans le tableau III.3 sont disposés de la manière suivante :

- Quatre sur l'Altiplano : Patacamaya, Ayo Ayo, Collana, et El Alto.
- Trois à la ville de la Paz : San Calixto, Villa Copacabana et Chuquiaguillo
- Deux sur la section haute de la Vallée du Zongo : Plataforma et Botijlaca
- Deux sur la section moyenne de la vallée du Zongo : Sainani et Harca

Cette analyse révèle que sur les dernières 17 années, tant pour P4 que pour P5 la relation est assez faible. La précipitation annuelle du glacier est mieux corrélée avec Botijlaca (0,51), Plataforma (0,5) et Chuquiaguillo (0,48) (Fig. III-3). Plataforma qui est le pluviomètre le plus proche du glacier montre une relation similaire à celle de Chuquiaguillo qui est situé à une vingtaine

de kilomètres du glacier. Ce résultat peut être expliqué par des altitudes proches des deux stations (4088m pour ChuquiagUILlo et 4750 m pour Plataforma) et par la position des pluviomètres qui sont situés à la frontière des régions altiplanique et amazonienne. Au vu de ce résultat, on peut penser que les précipitations journalières des stations positionnées à la limite des domaines amazoniens et altiplaniques, c'est-à-dire proches de la ligne de crête de la cordillère, sont susceptibles d'être assez bien corrélées à la précipitation journalière du glacier. Cependant, il faut noter que dans le chapitre II.2.2, on montre que la station de ChuquiagUILlo présente 15% moins de précipitation qu'à la Plataforma, différences expliquée par l'influence de vents locaux. Ceci doit être nuancé car le glacier lui-même, malgré sa faible superficie est probablement soumis à de forts gradients de précipitations liés à l'orographie. De plus, les différences de diamètre des pluviomètres (50 cm pour les pluviomètres P4 et P5 et 22 cm pour les autres) peuvent expliquer en partie les faibles corrélations observées sur la Fig. III.3 (voir chapitre II).

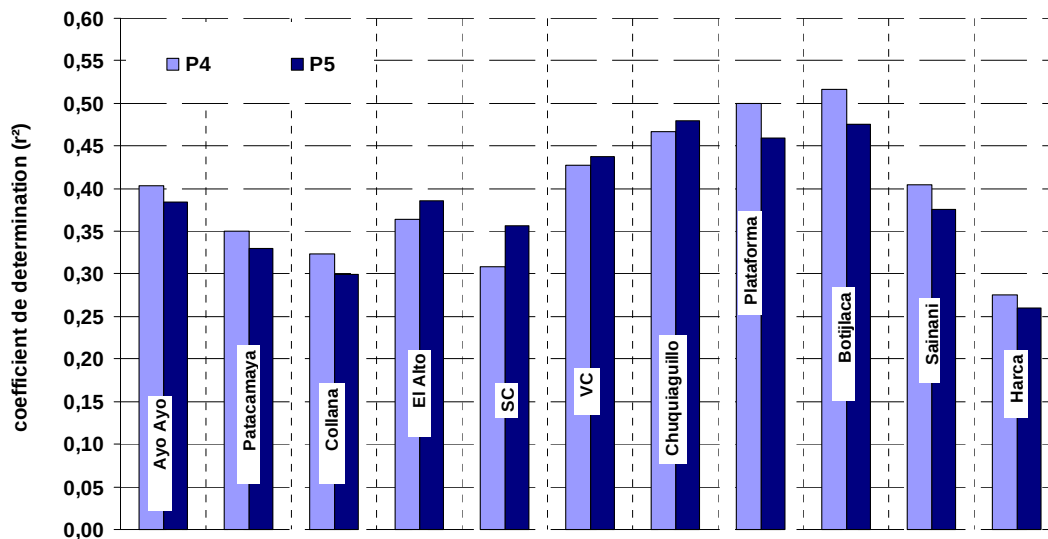


Figure III 3.- Variabilité interannuelle et coefficient de détermination entre les pluviometres P4, P5 et la moyenne pluviométrique (novembre et mars) des pluviometres de l'Altiplano, Ville de La Paz et la vallée du Zongo. Calculé à partir des données mensuelles entre novembre et mars du 1993-2010 (90 points)

Pour synthétiser ce sous - chapitre nous pouvons dire :

- A l'échelle de la zone d'étude, les précipitations annuelles varient entre 400 et 2000 mm. Ces variations sont très liées à la position géographique des stations, les pluies les plus fortes étant enregistrées dans la moyenne vallée du Zongo sous forte influence amazonienne, et les pluies les plus faibles dans le Sud-ouest de l'Altiplano, où le régime est fréquemment anticyclonique. Le gradient pluviométrique est donc orienté globalement selon un axe Sud-ouest / Nord-est. L'altitude joue un rôle moins fort que la position sur cet axe, sauf dans la vallée du Zongo où les stations les plus basses sont les plus pluvieuses car les plus proches des sources d'humidité du bassin amazonien.

- Une analyse de représentativité des pluviomètres a été faite avec la méthode du vecteur régional sur l'Altiplano, la ville de la Paz et autour du glacier Zongo. D'après cette méthode nous avons sélectionné deux pluviomètres représentatifs pour l'analyse temporelle de la précipitation de ces régions : Patacamaya (Altiplano) et San Calixto (Ville de La Paz). Ces stations ont été choisies du fait de la longueur des séries disponibles et de la bonne relation avec la station fictive calculée par le vecteur régional.
- Le fort gradient altitudinal de la vallée du Zongo fait que chaque pluviomètre présente une variabilité pluviométrique différente. Donc, Plataforma et Harca vont être pris comme représentatifs de la section haute et moyenne de cette vallée du fait de leur position altitudinale respective. Ces pluviomètres vont être utilisés pour l'analyse temporelle de la précipitation
- Les pluviomètres de la zone du glacier ont été comparés aux autres pluviomètres de la région afin de déterminer si la zone du glacier est soumise plutôt à un régime amazonien ou plutôt à un régime altiplanique. Cette comparaison va permettre d'obtenir une longue série de données journalières représentative du régime pluviométrique du glacier Zongo (au moins 19 ans), car les séries associées aux pluviomètres les plus proches du glacier sont au pas de temps mensuel et ne couvrent qu'une courte période. Une analyse de corrélations a permis d'identifier les trois pluviomètres journaliers les mieux corrélés à l'échelle mensuelle avec les pluviomètres autour du glacier ($r^2 > 0.5$): Botijlaca, Plataforma et ChuquiagUILlo.

III.2 ANALYSE DU SIGNAL TEMPOREL

Comme pour tous les climats subtropicaux, le régime pluviométrique moyen des Andes Boliviennes se caractérise par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide, piloté par les migrations en latitude de la ZCIT [Roche 1993 ; Garreaud, et al., 1998; Vuille, et al., 1999]. Ce régime pluviométrique moyen présente des fluctuations interannuelles et décennales, fortement liées à la variabilité climatique de grande échelle.

Dans cette section on va donc commencer par décrire le régime pluviométrique moyen, et notamment son cycle saisonnier, en s'appuyant sur des données journalières qui permettent une analyse plus fine que les pluies mensuelles utilisées habituellement jusqu'ici pour cette région. Dans une première étape nous décrivons la moyenne du cycle saisonnier, et ses trois phases (installation de la saison de pluie, cœur de la saison des pluies et saison sèche). Ensuite, nous analysons la distribution statistique de la précipitation journalière ($\text{pluie} > 0.1\text{mm}$). Finalement nous décomposons le signal pluviométrique en deux cofacteurs, le nombre de jours pluvieux (NJP) et l'intensité de la pluie journalière (I), afin d'étudier si l'un des deux a un

contrôle plus important que l'autre sur le cycle saisonnier et ses fluctuations.

Cette analyse se base sur les pluviomètres représentatifs des quatre groupes climatiques de la zone d'étude, tels qu'identifiés en section III.1.2 et ce pour la période de 19 ans (1992-2010) où ces 4 stations sont disponibles conjointement :

- Patacamaya (Altiplano)
- San Calixto (Ville de La Paz)
- Plataforma (Section haute de la vallée du Zongo)
- Harca (Section moyenne de la vallée du Zongo)

III.2.1 Le cycle saisonnier moyen sur la période 1981-2010

Le cycle saisonnier est bien représenté en utilisant une fenêtre glissante de 11 jours qui filtre les fluctuations de haute fréquence liées à la durée assez faible (30 ans) sur laquelle est calculée la moyenne (Fig.- III.4). L'étude à une échelle journalière va nous permettre de mieux comprendre la variabilité mensuelle, annuelle et décennale de la précipitation.

Trois phases peuvent être identifiées. Une première phase d'installation de la saison des pluies va d'août à fin novembre (jours 1 à 120 sur la Fig. III.4, le jour 1 étant le 1^{er} septembre). Pour trois stations (Patacamaya, San Calixto, Plataforma) cette phase est caractérisée par une augmentation progressive de la précipitation : le gradient moyen sur les données non filtrées est de 0.02 mm/j² à Patacamaya, de 0,05 mm/j² à San Calixto et 0,016 mm/j² à Plataforma. Cette première phase se termine par une augmentation assez soudaine de ce gradient qui correspond au démarrage du cœur de la saison des pluies qui se produisent au cours de la dernière décade de novembre. On remarque que cette rupture est pratiquement concomitante sur les trois stations malgré leur éloignement de plus en plus grand de la source d'humidité amazonienne. On remarque aussi que cette phase préliminaire n'est pas vraiment identifiable sur Harca qui présente une augmentation régulière et continue de la pluie journalière allant de 1,5 mm/j au début du mois d'août à un peu plus de 12mm/j au début du mois de décembre.

La deuxième phase correspond au cœur de la saison des pluies. Si on examine attentivement la Fig. III.4 on se rend compte qu'il n'est pas aisé de fixer une date de fin – même approximative – pour cette phase. Là encore, les comportements de Patacamaya, San Calixto et Plataforma présentent de fortes analogies, tout en se distinguant de celui de Harca. Sur les trois premières stations on observe que les mois de décembre et janvier se caractérisent par des fluctuations assez marquées autour d'une valeur moyenne qui est d'environ 2,5 mm/jour à Patacamaya, 3,6 mm/jour à San Calixto et 4,8 mm/jour à Plataforma. Après un dernier pic au cours de la dernière décade de janvier, on observe l'amorce d'une baisse régulière qui va durer jusque fin mars avec des gradients moyens de :

- 0,12 mm/j² à Patacamaya, calculés du 26 janvier (9,44 mm/j) au 31 mars (1,46 mm/j)
- 0,11 mm/j² à San Calixto calculés du 26 janvier (9,17 mm/j) au 31 mars (2,17 mm/j)
- 0,06 mm/j² à Plataforma calculés du 24 janvier (5,78 mm/j) au 31 mars (2,14 mm/j)

Le mois d'avril est un mois de transition où la précipitation moyenne journalière continue à diminuer jusqu'à devenir pratiquement nulle début mai. On peut donc légitimement distinguer deux sous-périodes dans cette seconde phase du cycle saisonnier : une sous-période *2a*, en décembre et janvier, caractérisée par des oscillations marquées autour d'un plateau et une sous-période *2b* de retrait continu et relativement régulier, couvrant les mois de février à avril.

Au cours de ces phases *2a* et *2b*, le synchronisme entre les 3 stations est remarquable, notamment pour ce qui concerne les creux de mi-décembre et mi-janvier et les pics de début décembre, fin décembre et fin janvier. Compte tenu de l'échantillonnage il faut rester prudent sur la significativité de cette succession de maxima et de minima, mais une recherche plus approfondie sur les causes atmosphériques de ces mini cycles intra-saisonniers serait intéressante. Hormis pour l'existence d'une saison plus sèche qui s'étend également sur les mois de mai, juin et juillet, le comportement observé à Harca est bien différente de celui des 3 autres stations. On notera toutefois l'existence d'un minimum relatif autour de mi-janvier synchrone de celui observé aux 3 autres stations. On voit par là tout l'intérêt d'utiliser des pluies journalières pour étudier le cycle saisonnier car certains minima et maxima sont clairement d'échelle infra-mensuelle et peu détectables sur des chroniques de pluies décadaires.

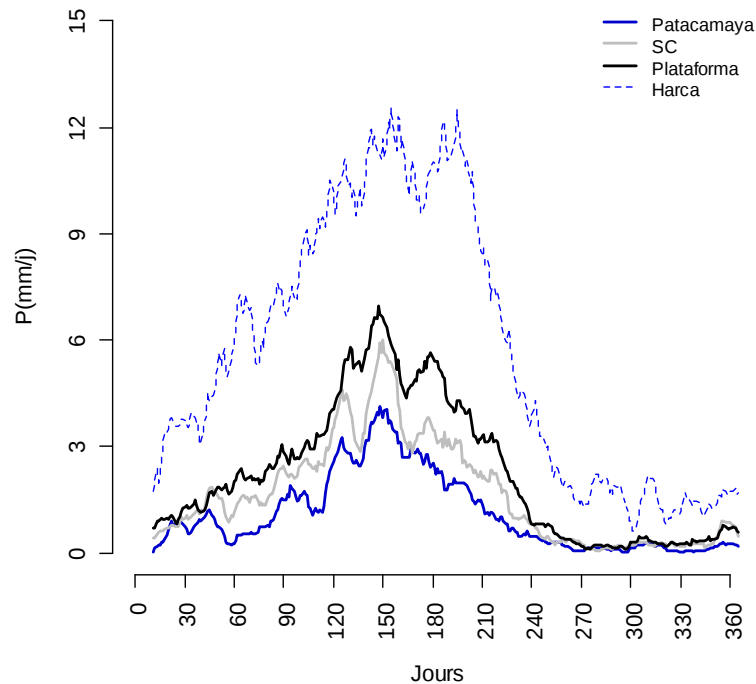


Figure III 4.- Cycle saisonnier moyen de la précipitation journalière sur 19 ans (1992-2010) représentée à l'aide d'une fenêtre glissante de 11 jours pour Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca. En abscisse les nombre des jours de l'année (début de l'année hydrologique 1 septembre)

En résumé, on peut retenir trois résultats principaux de cette étude du cycle saisonnier :

i) Malgré l'existence commune à toutes les stations d'une alternance entre une saison des pluies et une saison sèche, il existe une nette différence entre le régime pluviométrique du Zongo moyen et celui des trois autres stations (Patacamaya, San Calixto et Plataforma).

ii) sur ces trois stations il existe un synchronisme remarquable entre les 4 grandes phases du cycle saisonnier et à l'intérieur de ces phases, entre les fluctuations d'échelle décadaire.

iii) Malgré les fortes différences entre Harca et les stations de trois autres sous-régions étudiées ici (crête andine, ville de La Paz, Altiplano), on observe au cœur de la saison des pluies (décembre-janvier) l'existence de deux pics et d'un creux très bien phases aux 4 stations.

III.2.2 Distribution statistique des cumuls journaliers

Pour les raisons expliquées dans le chapitre II et l'introduction de ce chapitre, on ne peut étudier la distribution des pluies journalières à nos 4 stations que pour la sous-période 1992-2010. Les cumuls journaliers sont

répartis en deux sous-populations, celle des pluies nulles et celle des pluies non nulles. Sur l'ensemble de l'année, le nombre de jours de pluie nulle ($p < 0.1$ mm) est de 292 jours à Patacamaya (soit 80% de l'année), 261 jours à San Calixto (71%), 212 jours à Plataforma (51%), et 171 jours à Harca (46%).

Les fonctions de distribution cumulée des pluies journalières non nulles sont présentées pour chacune des 4 stations pour la période [1992-2010]. (Fig.III.5) et calculé selon l'équation III.2 (Soussou et al., 2004).

$$f(x) = -\log_{10} [1 - F(x)] \quad (\text{Eq.- III.2})$$

Avec :

$F(x)$: fréquence cumulée de la précipitation journalière non nulle (>0.1 mm/j)

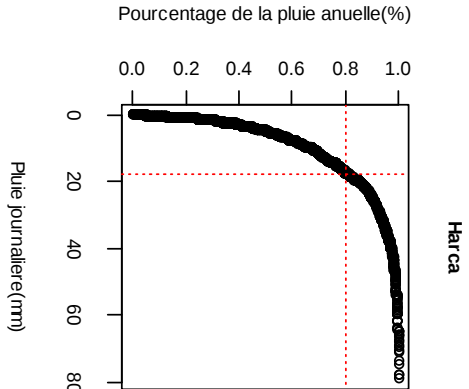
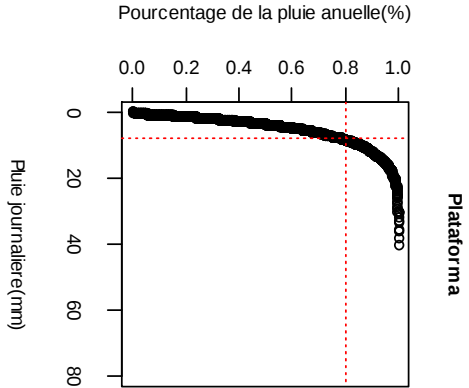
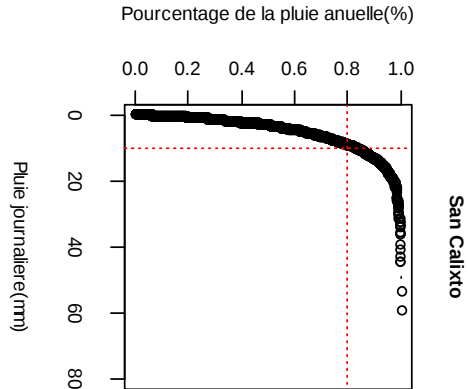
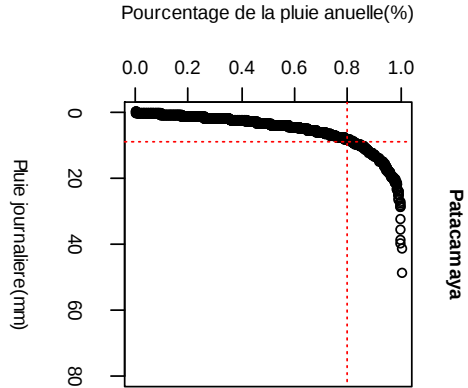
x : pluie journalière en mm/j

La Fig. III.5.a montre la fonction $F(x)$ pour les quatre stations et la Fig. III.5.b montre la fonction $f(x)$ qui permet de visualiser l'accord de la distribution mesurée avec une loi exponentielle à un paramètre.

Aux stations de Patacamaya, San Calixto et Plataforma seulement 20% de la pluie totale annuelle tombe avec des intensités supérieures à 10 mm/j et les intensités atteignent leur maximum vers 40-50 mm/j (Fig. III-5(a)). De plus, les pluies supérieures à 30 mm/j à Patacamaya et 35 mm/j à San Calixto représentent moins de 1% de la pluie totale annuelle ; à Plataforma, les événements supérieurs à 30 mm/j représentent moins de 5% de la pluie annuelle (Fig. III-5(b)).

En revanche, à Harca 20% de la pluie annuelle tombe avec des intensités supérieures à 20 mm/jour (Fig.III 5(b)). La pluie maximale peut atteindre 80 mm/j. Les pluies d'une intensité supérieure à 60mm/jour sont plus fréquentes à Harca qu'aux autres pluviomètres, et peuvent représenter près de 5% de la pluie annuelle.

Il apparaît donc que les pluies sont en général plus intenses dans la vallée du Zongo, proche de l'influence amazonienne, que dans la ville de La Paz et l'Altiplano, qui sont plus éloignées de l'influence des sources d'humidité : les précipitations inférieures à 20-40 mm/j, selon les stations, s'ajustent assez bien selon une loi exponentielle, avec une dissymétrie droite plus marquée pour les stations de l'Altiplano (Fig. III.5.b).



a)

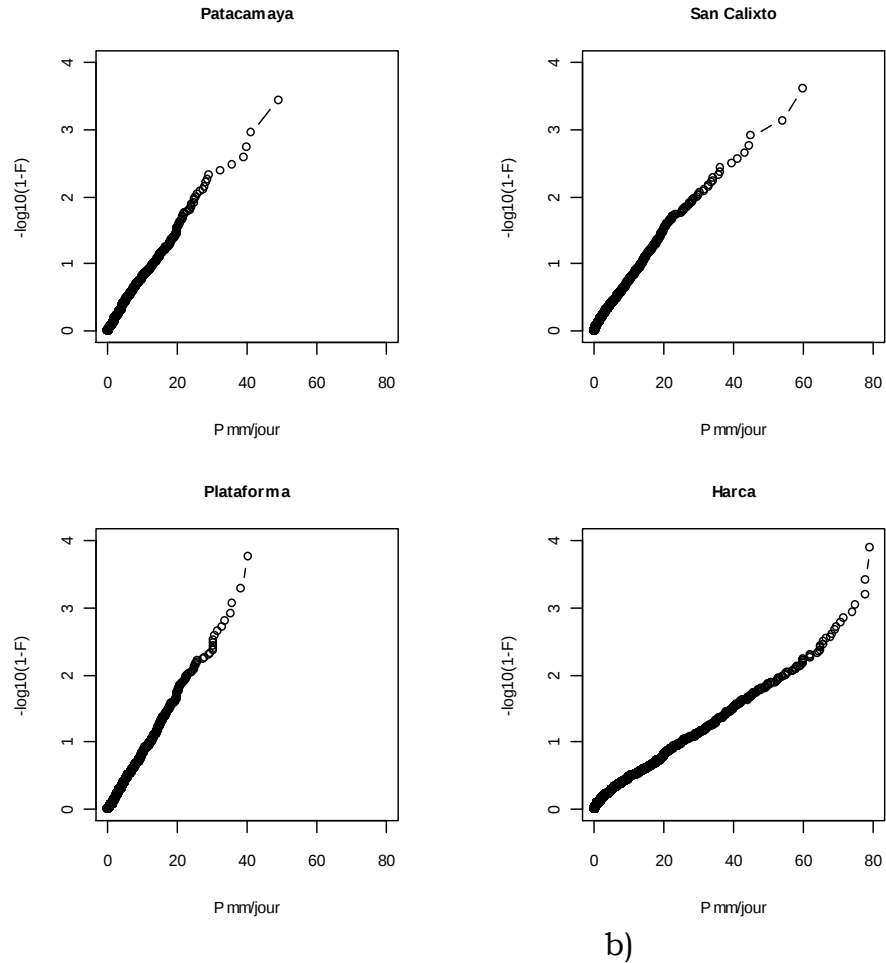


Figure III 5.- a) Distribution de la précipitation journalière en mm (1992-2010) exprimée comme la fonction du pourcentage de la précipitation annuelle. b) Fonction de répartition de la pluie [1992-10]. En abscisses la pluie journalière et en ordonnées la fréquence empirique

III.2.3 Occurrences et intensités des précipitations journalières

Dans cette section nous cherchons à caractériser comment le nombre de jours pluvieux, d'une part, les intensités journalières, d'autre part, varient au cours de l'année et comment ces fluctuations déterminent le cycle saisonnier moyen à chacune des stations. Pour mener à bien ce type d'étude on doit définir un seuil permettant de séparer jours pluvieux et jours non pluvieux. Alors que dans la section précédente, on a fixé ce seuil à 0,1 mm (résolution minimale dans nos séries), on peut choisir un seuil plus élevé pour des études plus fines, dans la mesure où la précipitation qui tombe à de faibles intensités journalières a un impact négligeable sur les bilans d'eau continentaux (reprise évaporatoire quasi immédiate).

Nous avons donc mené dans un premier temps une étude de sensibilité à ce seuil de séparation pluie/non pluie. La méthode choisie pour cela a été de calculer les corrélations entre la pluie annuelle du cycle moyen, le nombre de jours pluvieux (NJP) et l'intensité moyenne des jours pluvieux au-dessus des seuils. Les seuils pour identifier le NJP ont été testés à 1, 2 et 5 mm

(pour chaque seuil on ne garde que les valeurs au-dessus de ce seuil). Comme le montre le Tableau III.5, et comme on pouvait s'y attendre à partir de la Fig. III.6. NJP est très sensible au choix du seuil : Par exemple, Patacamaya, San Calixto et Plataforma, présentent 41, 34 et 31 jours de différence entre 1 et 2 mm respectivement (il y a 41 (respectivement 34 et 31) jours pluvieux supplémentaires dans l'année lorsqu'on prend un seuil de 1 mm au lieu de 2 mm). A Harca on a 22 jours de plus avec un seuil de 1mm. Au seuil de 1mm on capture plus de 95% de la pluie annuelle sur les quatre pluviomètres.

Le seuil 5 mm est très discriminant puisque l'on ne conserve alors que 114 jours pluvieux par an à Patacamaya, 113 à SC et 124 à Plataforma, en représentant moins de 70% du total annuel. D'une manière générale on voit que ce paramètre très simple est très structurant puisqu'aux trois seuils considérés ici (1, 2, 5 mm), la hiérarchie est la même avec NJP diminuant régulièrement de l'Amazonie vers l'Altiplano le long de l'axe Nord-est Sud-ouest.

Tableau III 5.-Nombre de jours du cycle moyen (1992-2010) qui sont au-dessus de seuils à 1, 2 et 5 mm/j. Pourcentage de la pluie annuelle qui corresponde chaque seuil.

	1mm/j		2mm/j		5mm/j	
	NJP	% P an	NJP	% P an	NJP	% P an
Patacamaya	283	98	242	95	114	63
SC	319	98	285	96	133	62
Plataforma	334	98	303	96	124	64
Harca	360	99	338	98	248	88

En ce qui concerne l'intensité moyenne au cours d'un jour pluvieux, elle a été calculée à partir de l'équation III.3 ci-dessous :

$$I = P / \text{NJP} \quad (\text{Eq.III.3})$$

Où :

I : Intensité journalière (mm/jour)

NJP : Nombre de jours pluvieux (jours)

P : Précipitation annuelle (mm)

III.2.3.1 Sensibilité au seuil en relation a la précipitation annuelle

Le coefficient de détermination sur 19 ans nous indique le niveau de relation entre la pluie annuelle et le NJP, d'une part, entre la pluie annuelle et l'intensité, d'autre part, aux trois seuils considérés. (Fig. III-6).

La pluie annuelle et le NJP sont bien corrélés surtout à San Calixto pour les seuils de 1 et 2 mm ($r^2 > 0.7$). Plataforma présentent de la même manière une bonne corrélation avec le NJP surtout à 2 mm ($r^2 > 0.7$). Avec un seuil de 5mm, on voit une relation encore plus forte entre le NJP et la pluie sur les

quatre pluviomètres ($r^2 > 0.5$) par rapport aux seuils de 1 et 2 mm. A 5 mm, la corrélation avec l'intensité reste toujours faible sur les trois premiers pluviomètres ($r^2 < 0.4$), et elle diminue un peu à Harca ($r^2 = 0.62$). Il est intéressant de voir que pour ces trois stations le r^2 avec NJP est supérieur au r^2 avec l'intensité pour les trois seuils et que c'est l'inverse pour Harca. Le régime amazonien semble donc se caractériser par une plus forte sensibilité aux variations d'intensité

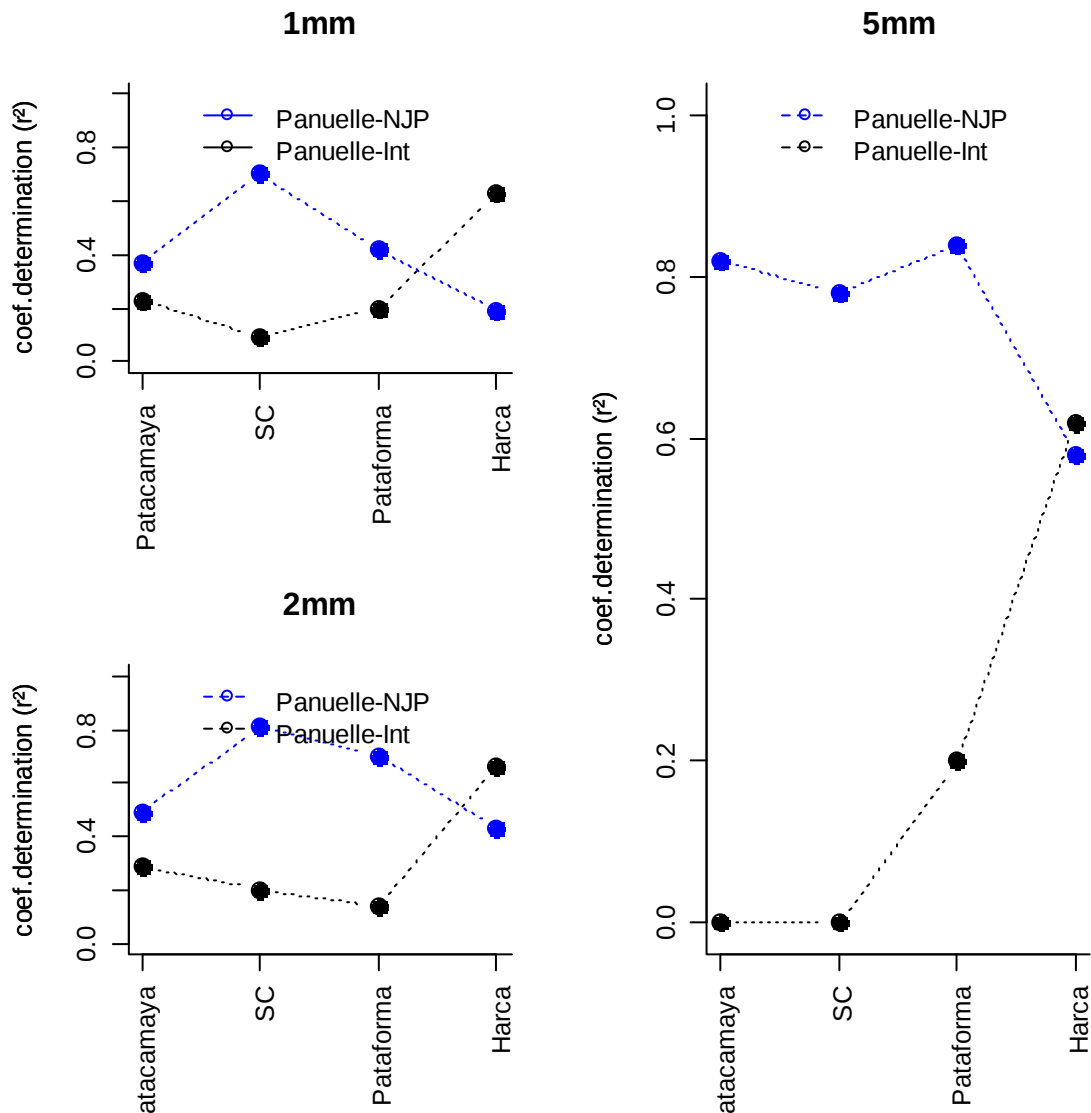


Figure III 6.- Coefficient de détermination de la précipitation total annuelle (1992-2010, 19 points) entre la pluie, le nombre de jours pluvieux (en bleu) de l'année et l'intensité (en noir).

Le tableau III.6 montre les statistiques de la pluie interannuelle, le NJP (avec les seuils de 1 mm, 2 mm et 5 mm) et l'intensité. Ce tableau confirme les résultats obtenus dans la Fig.III.6. Nous voyons que les coefficients de déterminations sont plus forts entre le NJP et la pluie annuelle sur l'Altiplano la ville de La Paz et Plataforma. Cependant lorsque l'on est plus proche de la vallée du Zongo à Harca c'est l'inverse avec une corrélation plus forte entre la pluie et l'intensité. Les coefficients de variation confirment que

sur l'Altiplano et la Ville de la Paz les NJP contrôlent la fluctuation interannuelle de la pluie, car ils montrent une variabilité plus forte que la variabilité des intensités (CV plus élevée et une corrélation non significative à un seuil de 95% entre la précipitation et les NJP). En revanche, à Plataforma les NJP et les intensités présentent des coefficients de variation similaires pour les seuils de 1 et 2mm, donc nous pouvons dire que pour ces seuils les deux variables ont une bonne représentativité de la pluie annuelle. A 5 mm, le NJP semble plus contrôler la pluie avec un r^2 significative et un CV faible. Finalement, à Harca c'est l'intensité qui a une variabilité plus forte avec des corrélations significatives entre la précipitation et l'intensité, par rapport aux NJP quel que soit le seuil (1, 2 ou 5 mm).

Tableau III 6.- Statistiques interannuelles de la pluie, du Nombre de jours pluvieux annuel (NJP*) et de l'intensité moyenne de la précipitation journalière (I*) sur l'année, aux seuils de 1mm, 2mm et 5mm. Statistiques calculées sur la moyen de 19 ans (1992-2010 ; 19 points). En Italique des corrélations pas significatives avec un niveau de confiance de 95%.

Seuil : 1 mm								
	R ²		Pluie (mm)		NJP (j)		Intensité (mm/j)	
Station	P-NJP	P-I	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Patacamaya	0,37	0,23	381	0,23	59	0,21	6,39	0,19
SC	0,70	0,09	576	0,17	82	0,20	7,03	0,10
Plataforma	0,42	0,20	787	0,16	126	0,17	6,43	0,17
Harca	0,19	0,63	2141	0,14	165	0,19	11,70	0,29

Seuil : 2 mm								
	R ²		Pluie (mm)		NJP (j)		Intensité (mm/j)	
Station	P-NJP	P-I	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Patacamaya	0,49	0,29	362	0,23	47	0,19	7,74	0,16
SC	0,81	0,20	562	0,17	67	0,17	8,53	0,07
Plataforma	0,70	0,14	765	0,15	102	0,14	7,90	0,13
Harca	0,43	0,58	1972	0,14	142	0,19	13,60	0,28

Seuil : 5 mm								
	R ²		Pluie (mm)		NJP (j)		Intensité (mm/j)	
Station	P-NJP	P-I	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Patacamaya	0,82	0,00	289	0,31	26	0,25	15,16	0,10
SC	0,78	0,00	467	0,20	40	0,20	14,79	0,10
Plataforma	0,84	0,20	581	0,18	54	0,20	14,84	0,10
Harca	0,61	0,62	1861	0,24	101	0,11	20,10	0,09

Cette analyse a permis de comparer les influences respectives des nombre de jours pluvieux et de l'intensité moyenne journalière sur la précipitation annuelle durant les dernières 19 années. D'après la Fig. III-6 et le tableau III.6, on voit que pour les 3 seuils considérés, NJP* (*Nombre de jours pluvieux sur l'année*) est nettement mieux corrélé à la précipitation annuelle que ne l'est I* (*Intensité moyenne de la pluie journalière sur l'année*),

pour les stations de Patacamaya, San Calixto et Plataforma. A Patacamaya et San Calixto, cette meilleure corrélation est largement liée à un effet d'échelle, la variabilité interannuelle de NJP* étant plus forte que celle de I*. Par contre, à Plataforma, les variabilités interannuelles de NJP* et I* sont équivalentes, ce qui indique clairement un contrôle par co-fluctuation et non par simple effet d'échelle. Pour ces trois stations le seuil de 2 mm apparaît comme étant le plus discriminant, avec des R² de 2 à 12 plus forts entre NJP* et P* qu'entre I* et P*.

La situation est inversée à Harca où, pour les seuils de 1 et 2 mm, I* est nettement mieux corrélé à la pluie annuelle que ne l'est NJP*, avec un effet d'échelle très nette (le CV de I* est quasi deux fois plus élevé que celui de NJP*); au seuil de 5 mm, la corrélation I*-P* reste plus élevée que celle entre NJP* et P*, mais dans une moindre proportion.

La première conclusion qui s'impose est donc que le régime pluviométrique de Plataforma est, en matière de variabilité interannuelle, de type « Altiplano », avec un contrôle de la variabilité par NJP, alors que dans la vallée du Zongo, le contrôle se fait par la variabilité de I.

Plus de 90% des pluies annuelles tombent lors de pluies de plus de 2 mm/j pour chaque station, et 98% au seuil de 1mm/j (Tableau III-5). L'analyse des relations entre la pluie et le NJP ou l'intensité est donc similaire pour les seuils de 1 et de 2 mm. Ainsi, dans l'analyse ci-dessous nous utiliserons les seuils de 1 et 5 mm bien discriminants car pour ces deux seuils la relation entre le NJP et la pluie annuelle est forte et il y a une grande différence de pourcentages de précipitations totales annuelles.

III.2.3.2 Cycle saisonnier du Nombre de Jours Pluvieux et des intensités

Après avoir étudié les relations entre la pluie et les facteurs NJP et I au niveau interannuel, nous allons ici les examiner sous l'angle de la variabilité intra saisonnière.

On compare sur la Fig. III-7 les cycles saisonniers de la pluie annuelle, de NJP > 1mm (a) et NJP > 5mm (b) et des intensités correspondantes. Pour faciliter la comparaison les signaux ont été lissés en calculant les valeurs centrées réduites (Eq.III.4) puis en effectuant sur ces valeurs des moyennes mobiles sur 11 jours [Le barbé et Lebel, 1997].

$$\frac{V - \mu}{\sigma}$$

(Eq. III-4)

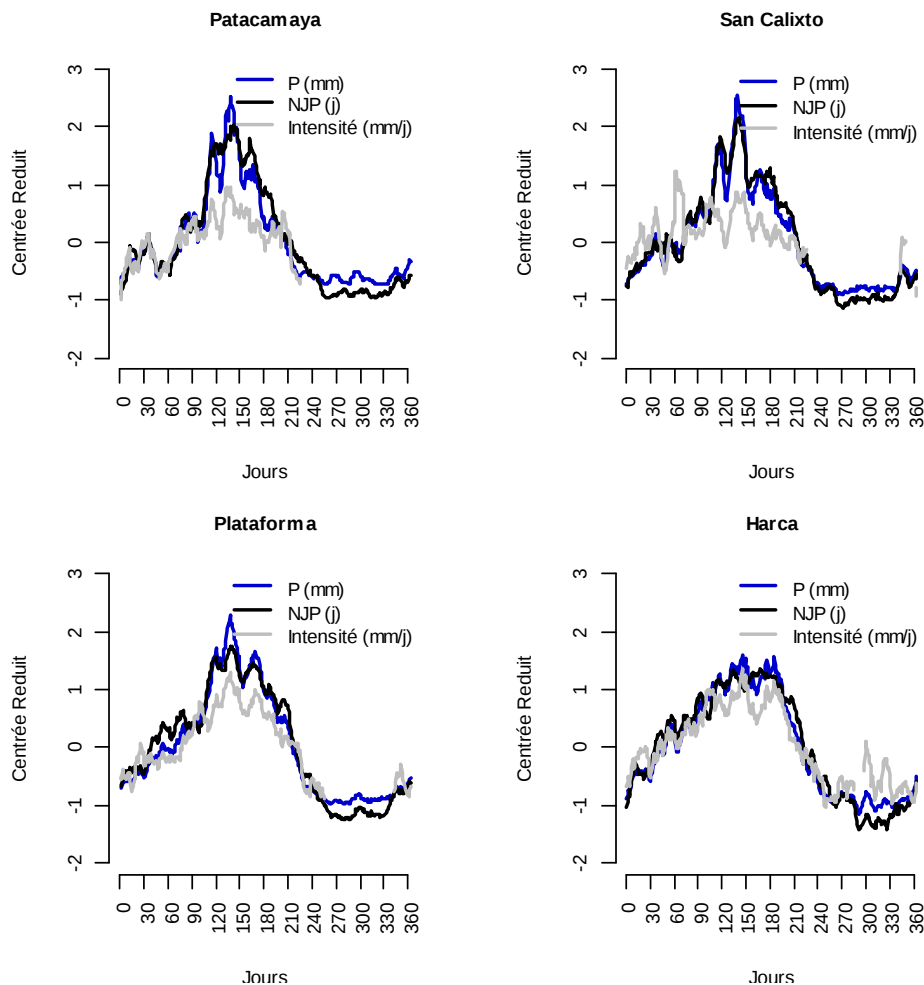
Où

μ : Moyenne de toute la période (mm/j)
 σ : Ecart type (mm)

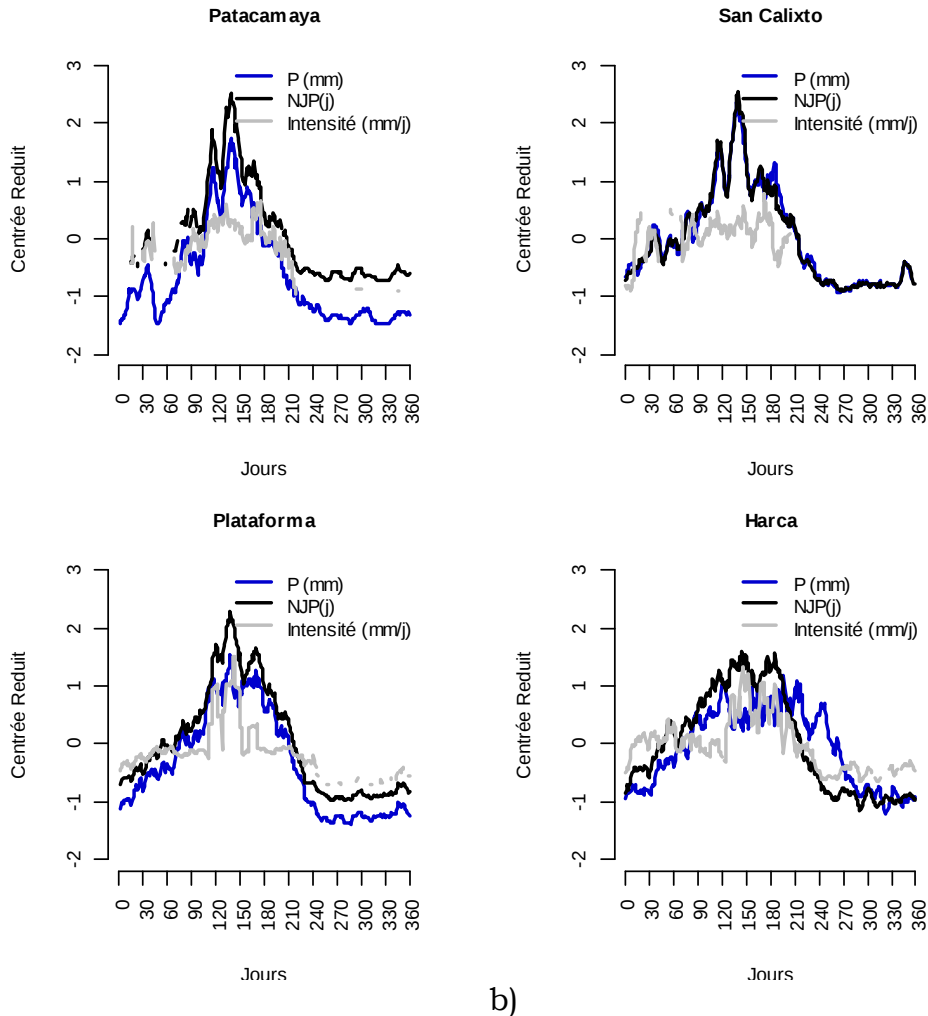
Au contraire de ce qui a été observé par ces derniers auteurs sur les pluies du Sahel, ici le nombre de jours pluvieux et l'intensité présentent

pour les 4 stations un cycle saisonnier semblable à celui de la pluie elle-même, en particulier en ce qui concerne les pics et les creux du cœur de saison des pluies (avec un seuil de 1mm). Ces derniers semblent donc résulter d'une co-fluctuation de ces deux variables. Cependant on remarque qu'à Patacamaya, San Calixto et à Plataforma, la variabilité du nombre de jours de pluie est plus forte que celle des intensités, laissant présager que *NJP* joue un plus grand rôle que *I* dans la détermination du cycle saisonnier de la pluie. C'est notamment lors de la forte augmentation de la pluie fin novembre que l'on note une augmentation similaire du nombre de jours de pluie, alors que l'intensité ne croît que bien plus faiblement. A Harca, la situation est un peu différente, les fluctuations de *NJP* et de *I* étant du même ordre, sauf au cœur de la saison des pluies où le signal *NJP* « colle » mieux au signal de la pluie que ne le fait *I*.

Au seuil de 5 mm, on voit que le *NJP* joue aussi un rôle plus important que *I* dans la détermination du cycle saisonnier. Cela est particulièrement visible aux pluviomètres de l'Altiplano et Plataforma, où l'intensité est peu représentative. En revanche, à Harca la fluctuation de l'intensité est cohérente avec celle de la précipitation saisonnière.



a)



b)

Figure III 7.- Cycles moyens du Nombre de jours pluvieux à 1mm (a) et 5mm (b), de l'intensité (mm/j) et de la précipitation journalière (mm) sur une période s'étalant de 1992 à 2010. Données représentées en valeurs centrées réduites (Eq.III.-4) sur une fenêtre glissante de 11 jours

Ce que montre la Fig. III-7 au premier ordre, c'est que pour trois stations, le cycle saisonnier de NJP est plus proche du cycle saisonnier de la pluie journalière que ne l'est celui de l'intensité ; on peut donc affirmer (et cela se voit dans les valeurs moyennes calculées par sous-période dans le tableau III.7 ci-dessous) que les grands traits du cycle saisonnier de la pluie pour ces trois stations est contrôlé par le cycle saisonnier de NJP. Par contre pour Harca les deux variables NJP et I ont un fort cycle saisonnier.

On va maintenant s'intéresser aux fluctuations à l'intérieur de chacune des trois grandes phases de la saison des pluies : installation de la saison (a), cœur de la saison (b), et saison sèche (c). Le tableau III.-7 montre le coefficient de détermination (r^2) et les coefficients de variation (CV), entre le cycle saisonnier de la pluie journalière avec le NJP (au seuil de 1 mm) et l'intensité, durant ces trois phases du cycle saisonnier.

Les coefficients de détermination montrent que durant la phase d'installation de la saison des pluies, le NJP a une meilleure relation avec la

pluie annuelle, surtout pour les stations de l'Altiplano et Plataforma. Cependant Harca présente une plus forte relation Pluie – Intensité, relation moins marquée pour Pluie-NJP (corrélation pas significative à 95%). Les coefficients de variation (CV) montrent que sur l'Altiplano et Plataforma, le NJP présente un CV plus fort que l'intensité. Par contre, l'intensité à Harca a un CV égal à 0.5 alors que pour les NJP il est de 0.45. Il y a donc confirmation du contrôle de l'intensité sur la pluie saisonnière à Harca et du contrôle du NJP sur l'Altiplano et à la Plataforma, essentiellement du fait d'un effet d'échelle (la variable qui varie le plus est celle qui a le plus grand contrôle).

Le cœur de la saison des pluies est particulier : les coefficients de déterminations et le niveau de signification à 95% montrent que NJP et l'intensité déterminent la fluctuation de la pluie durant cette saison ($r^2 > 0.5$) sur l'Altiplano et Plataforma. En plus il n'y a pas de grande différence entre les coefficients de variation du NJP et l'intensité. Nous pouvons ainsi expliquer que sur l'Altiplano et Plataforma ces deux variables contrôlent la saison la plus importante de l'année (70% de la pluie annuelle). En revanche, il est notable à Harca, que l'intensité explique la variance de la pluie (80%). Les coefficients de variation montrent une variabilité plus forte sur les intensités par rapport aux NJP, en confirmant que cette variable contrôle la pluie du cœur de la saison de pluie à Harca.

La saison sèche représente moins de 12% pour l'Altiplano et 16% à Harca de la pluie annuelle. Les coefficients de détermination montrent que le NJP explique plus de 65% de la variance de la pluie, sur les pluviomètres de l'Altiplano et Plataforma et 32% pour les pluviomètres d'Harca, là aussi du fait d'un effet d'échelle (CV de NJP plus fort que celui de I).

Si on s'intéresse maintenant aux différences de régime entre les phases de la saison des pluies, on remarque que : i) à Patacamaya il y a en moyenne une augmentation entre l'installation et le cœur de la saison des pluies de 1,37mm (de 4,03 mm à 5,4mm) ; de 4,2 NJP (de 2,4 à 6,6 NJP) et de 1,19mm/j pour l'intensité (de 4,91 à 6,1mm/j). ii) San Calixto présente une augmentation de la pluie de 1,04 mm (de 4,6 mm à 5,7mm), de 4,58 NJP (de 3,79 à 8,37 NJP) et de l'intensité de 0,18 mm/j (de 6,58 mm à 6,76mm). iii) A Plataforma, l'augmentation est de 1,94 mm de la pluie (de 3,87mm à 5,81mm), de 6,8 NJP (de 6 à 12,82 NJP) et d'une intensité de 2,53 mm/j (de 4,28 à 6,81mm). iv) Ces augmentations sont plus fortes à Harca, ainsi la pluie moyenne journalière révèle une hausse de 5,25 mm (de 5,98mm à 11,23 mm), de 6,5 de NJP (de 6,7 à 13,26 NJP) et 4,16 mm/j de l'intensité (de 7,34mm/j à 11,5 mm /j).

Le changement de saison entre le cœur de la saison de pluie et la saison sèche (avril - août) est caractérisé par une diminution de la pluie, de NJP et de l'intensité journalière. Cet affaiblissement entre ces deux phases est évident sur les quatre pluviomètres étudiés. i) Patacamaya révèle une baisse en moyenne de 1,4 mm (de 5,4mm à 4mm), de 5,71 NJP (de 6,6 à 0,9) et d'une intensité de 1,43 mm/j (de 6,1mm à 4,67mm). ii) San Calixto présente

une diminution de 2,2mm de la pluie moyenne journalière (de 5,7mm au 3,5mm), de 6,71 de NJP (de 8,37 à 1,67) et de 2,23 mm/j sur l'intensité (de 6,7 au 4,53). iii) Plataforma montre une baisse de 2,67 mm (de 5,8 à 3,14) ; 10,12 de NJP (de 12,82 NJP à 2,7 NJP); et d'une intensité de 2,91 mm/j (de 6,81 à 3,9). Harca présente une diminution de la précipitation moyenne de 4,6 mm (de 11,23 à 6,61), de 5,81 NJP (de 13,26 à 7,38) et d'une intensité de 3,9 mm/j (de 11,5 à 7,6).

Tableau III 7.- Relation entre fluctuations de la pluie journalière et fluctuations de NJP, d'une part, fluctuations de l'intensité, d'autre part, au seuil de 1mm. Statistiques calculées sur le cycle moyen de 19 ans (1992-2010) pour trois sous-périodes : a) Phase d'installation de la saison de pluie (septembre-novembre), b) cœur de la saison (décembre-mars), c) saison sèche (avril-août). En Italique les valeurs qui ne sont pas significatifs a un niveau de 95%.

a) Installation de la saison de pluie									
		R²		Pluie		NJP		Intensité	
Station	% du cumul de l'installation de la saison des pluies	P-NJP	P-Intensité	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Patacamaya	16,5	0,68	0,49	4,03	1,01	2,40	0,74	4,91	0,59
SC	19,49	0,52	0,20	4,66	0,62	3,79	0,56	6,58	0,55
Plataforma	19,19	0,69	0,37	4,87	0,34	6,00	0,42	4,28	0,33
Harca	21	0,28	0,74	5,98	0,74	6,70	0,45	7,34	0,50

b) Cœur de la saison de pluie									
		R²		Pluie		NJP		Intensité	
Station	% du cumul du cœur de la saison des pluies	P-NJP	P-Intensité	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Patacamaya	73,90	0,50	0,47	5,40	0,56	6,66	0,38	6,1	0,42
SC	68,59	0,58	0,52	5,70	0,51	8,37	0,31	6,76	0,34
Plataforma	69,30	0,56	0,62	5,81	0,27	12,82	0,23	6,81	0,26
Harca	61,00	0,33	0,78	11,23	0,31	13,26	0,18	11,5	0,31

c) Saison sèche									
		R²		Pluie		NJP		Intensité	
Station	% du cumul de la saison sèche	P-NJP	P-Intensité	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Patacamaya	9,40	0,73	0,30	4,00	1,56	0,95	1,30	4,67	0,76
SC	11,19	0,68	0,45	3,50	0,68	1,65	0,97	4,53	0,62
Plataforma	11,78	0,80	0,21	3,14	0,71	2,70	1,01	3,9	0,63
Harca	16,00	0,32	0,78	6,61	0,84	7,38	0,59	7,6	0,58

Une analyse similaire à celle décrite précédemment a été faite le seuil de 5mm (pour déterminer le NJP) (tableau III-8). Durant la période d'installation de la saison des pluies, environ 80% du total annuel, nous voyons que le Nombre de jours pluvieux au-dessus de ce seuil explique fortement les fluctuations de la pluie de cette saison et ce pour les quatre pluviomètres. Le même constat prévaut pour les deux autres périodes. Dans les trois cas, il semble que l'influence plus forte de NJP n'est pas seulement liée à un effet

d'échelle mais également à une meilleure co-fluctuation entre NJP et la pluie journalière qu'entre I et la pluie journalière.

Les moyennes de la pluie, de NJP et des intensités montrent une augmentation entre la phase d'installation de la saison de pluie et le cœur de cette saison, et aussi une diminution entre cette dernière phase et la saison sèche (comportement similaire que celui observé pour avec un seuil de 1 mm). Les coefficients de variation et les corrélations entre la précipitation et les NJP, montrent que durant la phase d'installation de la saison de pluies, les NJP ont une relation plus forte avec la précipitation par rapport à l'intensité sur les quatre pluviomètres. Nous voyons le même résultat durant le cœur de la saison de pluie où la variabilité interannuelle et la relation est plus forte sur NJP que sur l'Intensité pour l'Altiplano et Plataforma ($CV > 0.41$). Ceci ne s'observe pas à Harca qui a un CV de 0.32 pour le NJP et 0.32 pour les intensités. Les coefficients de variation et la relation pas significative avec l'intensité durant la saison sèche, indiquent une plus forte variabilité interannuelle sur le NJP surtout sur les trois premiers pluviomètres (Patacamaya, San Calixto et Plataforma).

Entre l'installation et le cœur de la saison de pluie, Patacamaya présente une augmentation moyenne de 1,9 de NJP (de 0,84 à 2,74) et une diminution de 2.4 NJP (2,74 à 0,34) durant la saison sèche. San Calixto révèle une hausse de NJP entre la première et deuxième phase de 2,7 j. et de 0,68 mm/j pour l'intensité. Par contre entre la phase deux (cœur de la saison de pluie) et la phase trois (saison sèche) cette station présente une diminution en moyenne de 3,87 NJP, un résultat similaire est observé à Patacamaya. Plataforma montre des valeurs plus hautes, la phase 2 présente en moyenne 4,2 NJP de plus par rapport à la phase 1, et aussi une intensité plus forte de 0.3 mm/j. Cependant le changement de saison (de phase 2 à la phase 3) montre qu'il existe 5.77 NJP de moins durant la saison sèche que durant le cœur de la saison avec une diminution de 1,42 mm/j sur l'intensité. Finalement Harca montre qu'avec ce seuil il y a une augmentation de 4,63 NJP entre la phase 1 et 2, mais on voit une hausse d'intensité de 2.78 mm/j ce qui est plus important que sur les autres stations. Le changement de la phase 2 à la phase 3 montre une diminution en moyenne de 4.14 NJP et d'une intensité de 2.3mm/j pour l'intensité (de 20,9 mm/j à 18,58 mm/j).

Tableau III 8.- Relation entre fluctuations de la pluie journalière et fluctuations de NJP, d'une part, fluctuations de l'intensité, d'autre part, au seuil de 5mm. Statistiques calculées sur 19 ans (1992-2010) pour trois sous-périodes du cycle saisonnier : a) Phase d'installation de la saison de pluie (septembre-novembre), b) cœur de la saison (décembre-mars), c) saison sèche (avril-août). En Italique les valeurs qui ne sont pas significatives à un niveau de 95%.

Installation de la saison de pluie									
		R ²		Pluie		NJP		Intensité	
Station	% du cumul de l'installation de la saison des pluies	P-NJP	P-Intensité	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Patacamaya	16,50	0,83	<i>0,19</i>	4,03	1,01	0,84	1,21	13,11	0,38
SC	19,49	0,75	<i>0,10</i>	4,66	0,70	1,71	0,79	14,02	0,42
Plataforma	19,19	0,79	<i>0,10</i>	4,87	0,56	2,38	0,71	13,86	0,31
Harca	21,00	0,63	<i>0,10</i>	5,98	0,55	2,97	0,74	18,12	0,41

Cœur de la saison de pluie									
		R ²		Pluie		NJP		Intensité	
Station	% du cumul du cœur de la saison des pluies	P-NJP	P-Intensité	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Patacamaya	73,90	0,70	<i>0,01</i>	5,40	0,56	2,74	0,61	16,79	0,45
SC	68,59	0,71	<i>0,03</i>	5,70	0,51	4,48	0,52	14,7	0,33
Plataforma	69,30	0,73	<i>0,00</i>	5,81	0,37	6,55	0,41	14,16	0,25
Harca	61,00	0,43	<i>0,26</i>	11,23	0,31	7,60	0,32	20,9	0,22

Saison sèche									
		R ²		Pluie		NJP		Intensité	
Station	% du cumul de la saison sèche	P-NJP	P-Intensité	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Patacamaya	9,40	0,79	0,43	4,00	1,56	0,34	1,79	10,61	0,42
SC	11,19	0,80	<i>0,18</i>	3,50	1,43	0,61	1,57	12,89	0,43
Plataforma	11,78	0,87	<i>0,14</i>	3,14	1,28	0,78	1,51	12,74	0,34
Harca	16,00	0,32	<i>0,11</i>	6,61	0,67	3,46	0,82	18,58	0,55

En résumé :

- i) Si on considère globalement chaque phase de la saison des pluies, on constate que l'augmentation de la pluie lorsque l'on passe de la phase d'installation à celle du cœur de saison des pluies, est fortement liée à l'augmentation du nombre de jours pluvieux pour les trois stations de Patacamaya, San Calixto et Plataforma. Par exemple, pour le seuil de 5 mm à Patacamaya le NJP passe d'une moyenne de 0,84 à 2,74 jours d'une saison à l'autre, alors que de son côté l'intensité passe de 13,11 à 16,79 mm/j. De même, la saison sèche est caractérisée par une baisse de NJP (de 2,74 à 0,34), l'intensité, pour sa part, baisse de 16,7 à 10,6 mm/j. Néanmoins, à Harca l'augmentation de NJP depuis

l'installation de la saison de pluie vers le cœur est moins évidente par rapport aux autres pluviomètres. Toujours au seuil de 5 mm, le NJP passe en moyenne de 2,97 à 7,6 et les intensités de 18,2 à 20,9 mm/j. La transition du cœur de la saison de pluie à la saison sèche est plus notable. On voit une diminution de 7,6 NJP à 3,46 NJP, et aussi une baisse de l'intensité de 20,7 à 18,58 mm/j.

- ii) A l'intérieur de chacune de ces trois périodes, par contre, les résultats sont plus contrastés et dépendent du seuil choisi. Durant l'installation de la saison des pluies le NJP contrôle la variabilité saisonnière sur les stations de Patacamaya, San Calixto et Plataforma, que ce soit aux seuils de 1 mm ou de 5 mm. Par contre à Harca ce sont les intensités qui régulent la pluie de cette phase, au seuil de 1 mm. De plus à Harca au seuil de 5 mm, le NJP a une influence plus forte que l'intensité : il contrôle 63% des précipitations de cette période.
- iii) Le cœur de la saison des pluies représente environ 70% de la pluie annuelle sur l'Altiplano et 60% dans la vallée du Zongo. Au seuil de 1 mm, les valeurs de r^2 et de CV montrent qu'à Harca, l'intensité contrôle largement la variabilité de cette saison. Cependant, à Patacamaya, San Calixto et à la Plataforma, les relations P-NJP et P-I sont similaires. A ce seuil de 1 mm, il n'y a donc pas de hiérarchie claire entre les influences respectives de ces deux variables en ce qui concerne leur impact sur les fluctuations de la pluie journalière. Au seuil de 5 mm, par contre, plus de 70% de la fluctuation de la pluie journalière est expliquée par le NJP sur l'Altiplano et à la Plataforma. A Harca NJP et I expliquent chacun 43% et 26% respectivement des fluctuations de la pluie journalière.
- iv) Durant la saison sèche, c'est le NJP qui contrôle la pluie saisonnière tant pour un seuil de 1 mm que de 5 mm, et ce pour toutes les stations (sauf Harca que à 1mm ce l'intensité qui contrôle la pluie).

III.3 VARIABILITE INTERANNUELLE

Cette section consacrée à l'étude de la variabilité interannuelle s'appuie sur l'utilisation de données mensuelles – et non plus journalières – ce qui permet d'étendre l'analyse à la période 1973-2010 et d'inclure plus de stations. On procèdera en deux temps.

Tout d'abord dans les sections III.3.1, III.3.2 et III.3.3, on considère l'ensemble des 38 ans pour comparer les fluctuations de la pluie annuelle observées aux 4 stations et on caractérise globalement la relation avec El Niño/La Niña et la variabilité Pacifique et Atlantique. Dans ces parties, on considère une période de 19 ans pour comparer la variabilité de NJP aux seuils de 1, 2 et 5 mm calculés à partir de données journalières.

Dans un deuxième temps (section III.3.4), on va s'intéresser à quelques années spécifiques pour analyser si le cycle saisonnier de ces années particulières diffère sensiblement du cycle saisonnier moyen.

III.3.1 Fluctuations interannuelles des cumuls annuels (1973-2010)

Pour l'analyse de la variation de la précipitation, on considère l'ensemble des 38 années pour comparer les fluctuations interannuelles de la pluie observées aux 4 stations. Ensuite, on analyse la variabilité interannuelle de NJP (à partir des seuils 1, 2 et 5 mm) durant 19 ans (1992-2010). Finalement, nous caractérisons globalement la relation entre la pluie annuelle avec trois indices de l'océan pacifique pour déterminer la relation avec El Niño et La Niña (SOI, MODOKI et MEI) et deux indices de l'océan Atlantique Tropical (NATL, SATL), sur les 11 stations décrites dans l'introduction du chapitre

La Fig.- III-8 montre la chronique des indices pluviométriques calculés selon l'équation III-5 [Balme, et al., 2006]. Nous analysons les quatre pluviomètres représentatifs de chaque zone.

$$I_i = (P_i - P_{\text{moy}}) / \alpha \quad (\text{III-5})$$

Avec :

I_i = Indice pluviométrique de l'année i

P_i = Cumul pluviométrique de l'année i (mm)

P_{moy} = Pluie moyenne sur la période totale (mm)

α = Ecart type sur cette période

En considérant que l'observation de valeurs respectivement supérieures à 0.8 ou inférieures à -0.8 (valeurs nettement visuelles pour identifier les quatre années les plus excédentaires et déficitaires) à au moins deux stations sur la même année, définissent respectivement les années sèches et humides, nous pouvons identifier 8 années sèches (1977, 1982, 1983, 1989, 1990, 1992, 2002, 2005) et 4 années humides (1974, 1986, 1997, 2001). Les cycles saisonniers et la distribution des intensités journalières propres à ces années seront analysés en section III.3.4 ci - après.

De plus, cette figure nous montre que la relation entre la pluie annuelle et El Niño/La Niña n'est pas forcément évidente. C'est-à-dire que toutes les années El Niño/La Niña ne sont pas cataloguées comme sèches/humides. Par exemple, pour les années 1973, 1987 et 1998 (classées comme Niño) les valeurs de pluies ne sont pas toutes déficitaires. Nous notons pour la Niña, que seulement deux années (1974 et 2001) coïncident avec des années excédentaires. La Niña peut être aussi marquée comme une année déficitaire (comme pour les années 1989 et 2009). Pour éclaircir cette question, une analyse plus approfondie de la relation El Niño/La Niña - Pluie annuelles est faite dans la section III.3.3.

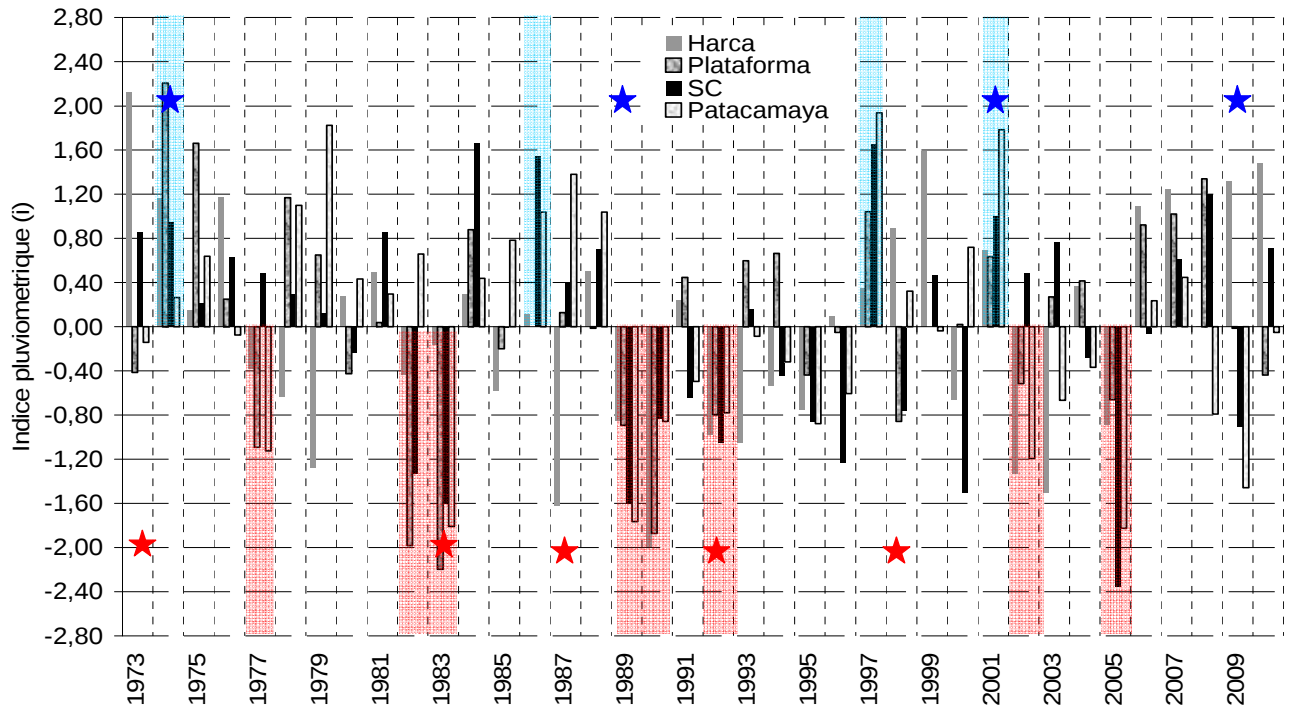


Figure III 8- Indices pluviométriques $i = (P_i - \bar{P}) / \bar{P}$, pour la période 1973-2010 pour les stations de Harca, Plataforma, San Calixto (SC) et Patacamaya. Les étoiles en rouge indiquent les années El Niño et en bleu la Niña obtenues à partir du SOI. Les marques bleues et rouges montrent les années humides et sèches, respectivement (voir texte).

Les statistiques de la variabilité interannuelle de chaque pluviomètre sont illustrées dans le tableau III.9. Comme le décrit la Fig.- III.4, la moyenne nous montre que les stations de l'Altiplano sont celles qui présentent les précipitations les plus faibles par rapport aux valeurs de la Plataforma et de Harca. Les coefficients de variations indiquent que Patacamaya et Plataforma sont les pluviomètres avec la plus forte variabilité : coefficients de variation respectivement de 0.23 et 0.28. Inversement, San Calixto et Harca montrent un coefficient de seulement 0.16 et 0.13, donc une faible variabilité autour de la moyenne.

Les années qui présentent un maxima de précipitation sont différentes selon chaque pluviomètre. A Patacamaya, l'année 1997 est celle avec la plus forte précipitation des derniers 30 ans et montre une augmentation de 44% par rapport à la moyenne. A San Calixto l'année 1984 montre une augmentation de 27% ; à la Plataforma, l'année 1974, une augmentation de 34% et finalement, à Harca, l'année 1973 présente une hausse de 27%.

En revanche, les années qui montrent des minimas, coïncident pour Patacamaya et San Calixto (année 2005) et aussi pour Plataforma et Harca (année 1990). Les deux premiers pluviomètres présentent une diminution de 40% de la pluie pendant cette année. Plataforma montre une réduction de 45%, et à Harca, on observe 26% de diminution par rapport à la moyenne.

Tableau III 9.- Statistiques des valeurs annuelles entre 1973-2010, de Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca

	Patacamaya	San Calixto	Plataforma	Harca
Moyenne (mm)	409	607	821	2187
Ecart-Type (mm)	94,6	99,9	232,9	287,1
CV	0,23	0,16	0,28	0,13
PMAX (mm)	592	773	1130	2797
PMIN (mm)	237	371	448	1615

Les quatre pluviomètres qui représentent chaque zone climatique, montrent une relation assez faible (corrélations non significatives au seuil de 95%) les uns par rapport aux autres, ce qui est la conséquence de la situation géographique de chacun (Tableau III.10). Il existe une légère co-fluctuation entre Patacamaya - San Calixto et Plataforma - San Calixto, cependant cette co-fluctuation représente seulement 30% de la variabilité interannuelle. Harca révèle la plus faible relation avec les autres pluviomètres ($r^2 < 0,11$) donc un comportement interannuel différent de la ville de La Paz et de l'Altiplano (Fig. III.8)

Tableau III 10.- Matrice de coefficients de détermination annuels (r^2) entre Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca. Période de données 1973-2010. En Italique les valeurs qui ne sont pas significatives à un niveau de 95%.

R²	Patacamaya	San Calixto	Plataforma	Harca
Patacamaya	1,00	<i>0,29</i>	<i>0,20</i>	<i>0,02</i>
San Calixto	<i>0,29</i>	1,00	<i>0,30</i>	<i>0,11</i>
Plataforma	<i>0,20</i>	<i>0,30</i>	1,00	<i>0,08</i>
Harca	<i>0,02</i>	<i>0,11</i>	<i>0,08</i>	1,00

Cette relation entre pluviomètres est aussi présentée sur la Fig.-III.8. On note que les trois premiers pluviomètres ont une fluctuation interannuelle similaire sur la majorité des années. Cependant la variabilité de Harca ne coïncide pas forcément avec ces pluviomètres. Par exemple, l'année 2010, excédentaire à Harca et SC, est déficitaire à Patacamaya et à la Plataforma.

III.3.2 Fluctuation interannuelle du Nombre de jours pluvieux

Sachant que le NJP contrôle la variabilité interannuelle, nous voulons analyser sa fluctuation interannuelle durant les dernières 19 années (Fig.III.-9). Pour cela, nous devons revenir aux données journalières sur les quelles est basé le calcul de NJP (voir introduction de ce chapitre). On reprend ici les mêmes seuils que ceux utilisés en section III.2.3 (1 ; 2 et 5 mm/j) pour étudier la co-fluctuation interannuelle entre cumuls, nombre de jours pluvieux (NJP) et intensités des jours pluvieux.

Que ce soit sur l'Altiplano et la ville de la Paz (Patacamaya et San Calixto) ou dans la vallée du Zongo (Plataforma, Harca), la variabilité

interannuelle est similaire pour les 3 seuils choisis, à l'exception de Harca où on note une diminution pour les années 1992 et 1993 avec le seuil de 5 mm/j.

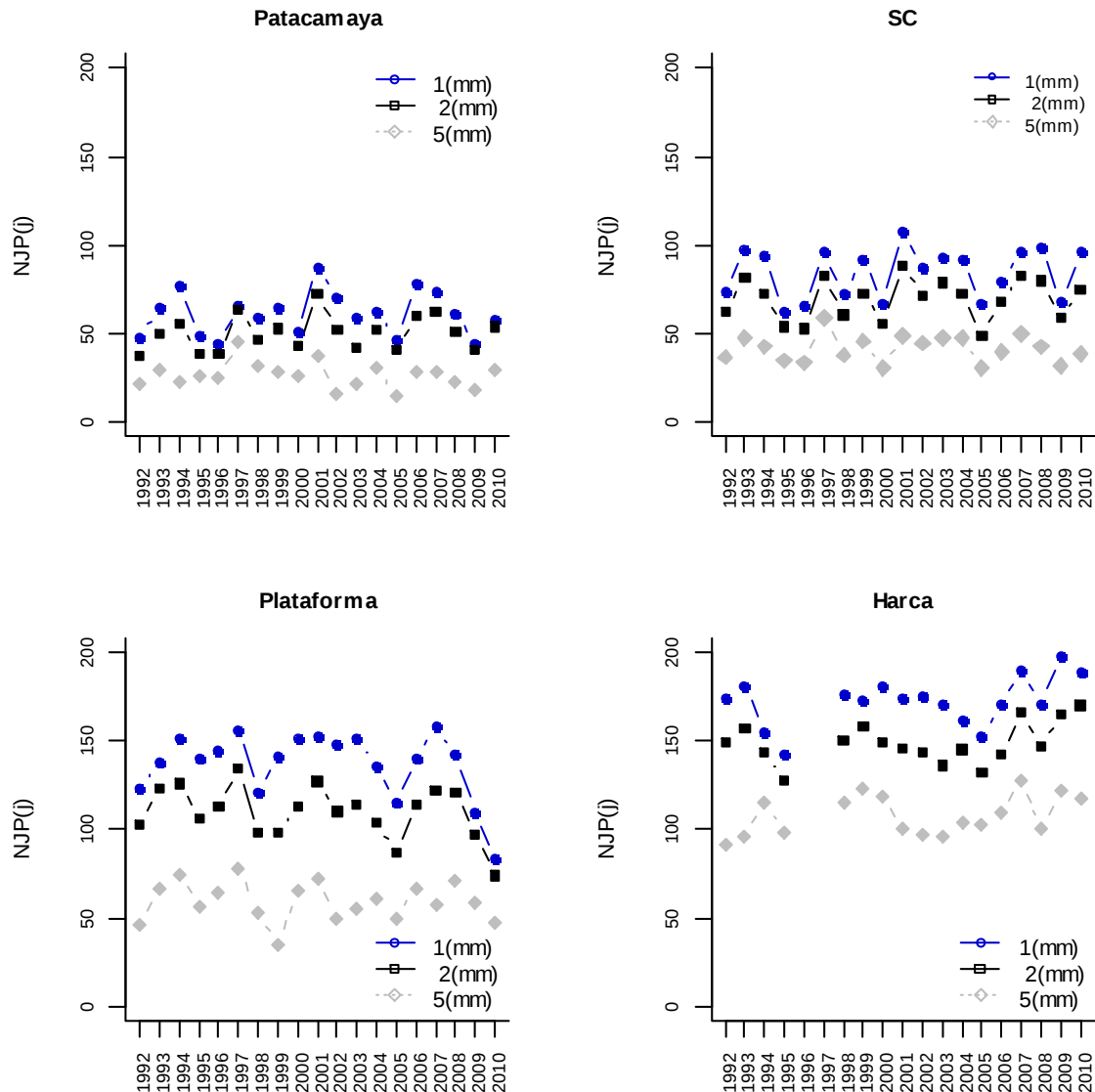


Figure III 9- Fluctuation annuelle de nombre de jours pluvieux pour des intensités de 1 ; 2 et 5 mm/j pour la période de 1992 – 2010.

Le tableau III.-11 présente les statistiques annuelles de Nombre de jours pluvieux avec les seuils de 1, 2 et 5 mm /j. La moyenne de chaque pluviomètre montre qu'entre 1 et 2 mm/j, la différence est d'environ 15 jours. Cette différence est plus grande entre les seuils 2 et 5 mm/j. A Patacamaya et à San Calixto, nous notons environ 25 jours de plus avec un seuil de 2 mm/j et 50 jours sur Plataforma et Harca.

La variabilité interannuelle sur les quatre pluviomètres est plus forte avec un seuil de 5 mm/j mais reste cependant faible ($CV < 0.27$). Avec 1 et 2 mm/j, cette variabilité est encore plus faible ($CV < 0.2$) surtout à Harca où le CV exprime moins de 1% de variabilité.

Tableau III 11.- Statistiques de Nombre de jours pluvieux à 1, 2 et 5 mm pour les stations de Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca.

	Patacamaya			San Calixto			Plataforma			Harca		
	1	2	5	1	2	5	1	2	5	1	2	5
Moyenne	61,5	50,4	26,9	84,7	69,7	41,9	136,9	109,7	59,4	172,6	148,6	107,8
Ecart-Type	12,41	9,81	7,34	14,14	11,82	7,62	18,94	14,88	11,10	14,04	11,67	11,42
CV	0,20	0,19	0,27	0,17	0,17	0,18	0,14	0,14	0,19	0,08	0,08	0,11

Cette analyse nous indique que les nombre de jours pluvieux identifiés à 1, 2 et 5 mm suivent une même variabilité interannuelle. Dans la période d'étude (1992-2010) ils ne présentent pas de tendance à l'augmentation ou à la diminution, au contraire ils présentent une variabilité assez faible par rapport à la pluie annuelle.

III.3.3 Variabilité liée aux anomalies climatiques de l'océan Pacifique et l'océan atlantique Tropical

Plusieurs études de la variabilité interannuelle des précipitations sur l'altiplano [Vuille, et al., 2000 ; Garreaud 2000] et sur l'Amazonie [Zeng, 1999 ; Liebmann et Marengo 2001 ; Lavado, et al., 2012] ont mis en évidence ses relations avec El Niño/ La Niña. Nous allons donc mener ci-après une analyse spécifique sur ce sujet. Pour être plus précis dans l'interprétation des résultats nous employons 11 stations à pas de temps mensuel, qui permettent d'étudier l'influence de ce phénomène sur l'ensemble de la région.

III.3.3.1 Influence des anomalies du pacifique et l'océan atlantique tropical sur la pluie annuelle

La variabilité interannuelle de la pluie et sa relation avec El Niño/ La Niña ont été analysées par des coefficients de corrélations (r) et avec un niveau de signification de 95%, entre la pluie annuelle et 5 indices décrits au chapitre I : le SOI (Southern Oscillation Index), le Niño MODOKI, le MEI (Multivariate ENSO Index), la température de la surface de la mer de la partie sud de l'Atlantique (SATL :Southern Tropical Atlantic) et de la partie nord (NATL: Northern tropical Atlantic).

Les moyennes des mois DJF (décembre, janvier et février) des indices sont comparées à la pluie annuelle (année hydrologique : Août-Juillet) de onze pluviomètres (Tableau III-12) les plus représentatifs de la zone d'étude (Tableau III-1). Un calcul avait déjà été effectué par [Ronchail et Gallaire, 2006], mais sur une période plus courte.

Tableau III 12.- Coefficient de corrélation (r) entre la pluie annuelle (Août-juillet) et la moyenne des mois DJF (Décembre, janvier, février) des indices SOI, Niño Modoki, MEI 1973 à 2010 (38 points), NATL et SATL. (1983-2010) (28 points). Les coefficients les plus forts et significatifs à 95% sont signalés en italiques soulignés.

Coef. corrélation	SOI	Modoki	MEI	NATL	SATL
Harca	0,25	-0,24	-0,14	0,35	0,33
Sainani	<u>0,62</u>	-0,43	-0,52	0,20	0,16
Botijlaca	<u>0,51</u>	-0,24	-0,48	-0,14	-0,03
Plataforma	0,27	0,06	-0,3	-0,17	-0,03
Chuquiaguillo	0,01	0,21	0,03	-0,36	-0,22
El Alto	0,29	0,18	-0,21	-0,08	-0,06
San Calixto	0,26	0,04	-0,18	-0,15	-0,19
Villa Copacabana	0,2	0,06	-0,2	-0,31	-0,26
Collana	0,23	-0,02	-0,24	-0,24	-0,19
Patacamaya	0,16	0,07	-0,12	-0,28	-0,15
Ayo Ayo	0,13	-0,13	-0,11	-0,31	-0,31

Les coefficients de corrélations positifs révèlent une augmentation de la précipitation annuelle durant un signal d'ENSO positif (Niña), et une diminution durant un signal négatif (Niño).

L'indice SOI montre une corrélation positive sur toutes les stations, en indiquant une augmentation de la précipitation annuelle tant sur l'Altiplano que dans la vallée du Zongo, durant El Niño. Les plus fortes corrélations sont à la vallée du Zongo, surtout sur les stations comprises entre 2400 et 4000m d'altitude (Botijlaca et Sainani).

Les corrélations avec le Niño Modoki montrent une diminution de la pluie dans la vallée du Zongo et sur les stations plus éloignées de l'Altiplano. Cependant, sur ces dernières, la corrélation est trop faible pour dire qu'il y a une vraie diminution. A noter que des corrélations négatives plus élevées sont aussi enregistrées à Botijlaca et Sainani. Chuquiaguillo et El Alto présentent des corrélations positives plus fortes par rapport au pluviomètre de Patacamaya, en révélant une augmentation de la pluie durant le Niño.

Le MEI révèle des corrélations plus fortes dans la vallée du Zongo et sur quelques stations de la ville de La Paz. Ceci est en contradiction avec les résultats obtenus avec l'indice SOI. Les corrélations avec le MEI sont des valeurs négatives sur toutes les stations, en indiquant des précipitations plus faibles dans la zone d'étude durant El Niño. Comme pour SOI et le Niño Modoki, nous observons les plus fortes corrélations à Botijlaca et Sainani. Des valeurs similaires sont aussi observées sur l'ensemble des pluviomètres de la ville de La Paz. Ainsi, nous pouvons conclure que selon cet indice, les stations les plus éloignées de la cordillère, ont le signal le plus faible.

Le NATL montre que les valeurs de corrélations les plus fortes sont trouvées pour les pluviomètres situés dans la vallée du Zongo. Cependant, pour cette zone les valeurs des coefficients de corrélations du NATL restent plus faibles que celles obtenues avec les indices SOI, Modoki et MEI. Les

corrélations à la Paz et sur l'Altiplano sont, au contraire, plus fortes que dans le cas des SOI, MEI et Modoki. Le SATL montre de plus fortes corrélations à Harca et Sainani (situées aux plus basses altitudes de la vallée du Zongo). Au contraire, à Botijlaca et Plataforma (situées aux plus hautes altitudes de la vallée du Zongo), ces valeurs sont plus faibles par rapport aux indices SOI, MEI et Modoki. A La Paz et sur l'Altiplano, cet indice montre des corrélations similaires avec la NATL. Ainsi, avec ces deux indices, nous pouvons expliquer plus de 20% de la covariance de la variabilité annuelle des deux régions. L'Altiplano et la ville de La Paz subissent donc une influence plus forte des événements produits sur l'Atlantique par rapport à ceux produits sur le Pacifique.

Les corrélations les plus fortes sont visibles pour les indices SOI et MEI et notables surtout aux pluviomètres de la vallée du Zongo. Cependant, les valeurs restent assez faibles et il est difficile d'en conclure qu'il existe une influence directe de ce phénomène sur la pluie annuelle de l'Altiplano et dans la vallée du Zongo.

Un travail de comparaison avec les résultats obtenus par Ronchail et Gallaire, 2006, a été fait sur la même période (1973 - 2001). Nous avons trouvé que les années 1999 à Plataforma, 2000 à Botijlaca et 2001 à Harca et Sainani présentent des valeurs différentes sur les deux bases de données. Néanmoins, cette variation reste globalement faible. Cette analyse a permis non seulement de comparer les bases de données, mais aussi de vérifier la relation des précipitations avec El Niño/ La Niña, entre 1973-2001. Les corrélations durant cette période sont plus fortes que celles décrites dans le tableau III.11, surtout dans la vallée du Zongo. Cette relation est expliquée par les plus fortes intensités des phénomènes El Niño et la Niña avant l'année 2000. Il faut noter que depuis cette année, ces événements sont moins intenses.

III.3.3.2 Analyse à l'échelle trimestrielle

Une analyse plus ciblée a été faite en comparant la moyenne des mois de décembre-janvier-février (DJF) des indices Niño/Niña avec quatre moyennes trimestrielles de la pluie : Septembre-Octobre-Novembre (SON), DJF, Mars-Avril-Mai (MAM), Juin-Juillet-Août (JJA).

La Fig. III-10 présente les cercles de corrélations entre : (i) Niño/Niña (DJF) et la Pluie(DJF) ; et (ii) Niño/Niña(DJF) et la Pluie (MAM). Seuls ces graphiques sont présentés car ce sont ceux qui montrent les plus fortes valeurs pour les coefficients de détermination. Les corrélations entre Niño/Niña (DJF) et les pluies (SON), (JJA) sont données en annexes 2.

Comme l'analyse du tableau précédent, nous mettons en évidence la faible relation existant entre la pluie et El Niño/La Niña. La plus forte corrélation est entre MEI (DJF) et la pluie (DJF) (le coefficient r vaut au maximum 0,36) sur deux pluviomètres de la vallée du Zongo (Sainani et Botijlaca). Cependant, ces valeurs expliquent seulement 36% de la variance

pendant les mois de décembre, janvier et février. L'indice MEI indique que pendant ces anomalies, tous les pluviomètres enregistrent une augmentation de la pluie. Ce phénomène est le plus marqué sur les stations de Sainani et Botijlaca.

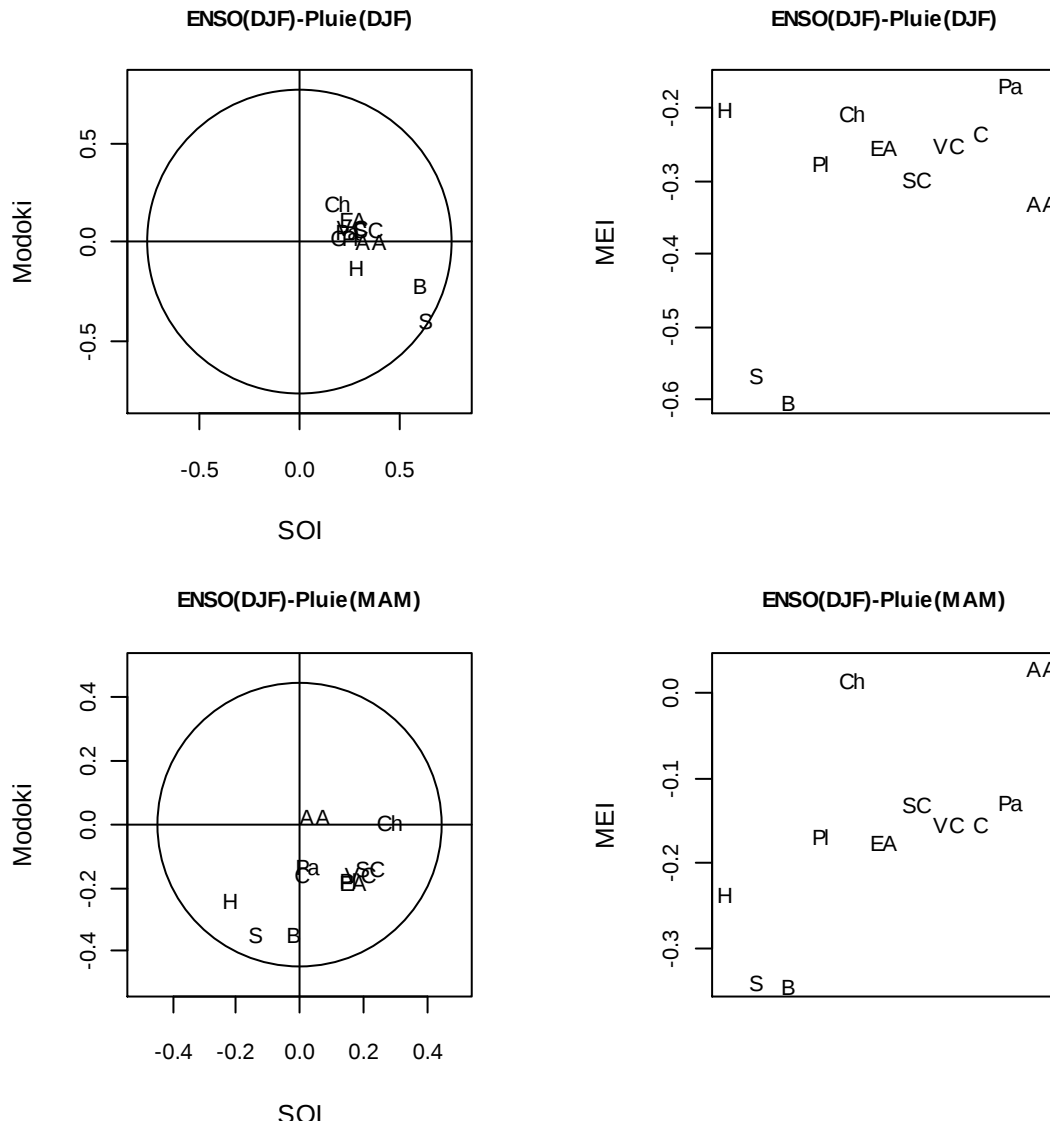


Figure III 10.- A gauche, Cercles de corrélation (r) entre El Niño/La Niña (SOI, Modoki) des mois décembre, janvier et février (DJF) avec la pluie moyenne DJF (gauche en haute) et MAM : mars, avril, mai (gauche en bas). A droite, coefficients de corrélation entre le MEI durant DJF avec la pluie DJF (droite en haute), et avec la pluie du MAM (droite en bas). Les lettres indiquent les noms des pluviomètres.- AA: Ayo Ayo, Pa: Patacamaya, C: Collana, EA: El Alto, Ch: ChuquiagUILlo, VC : Villa Copacabana, Pl : Plataforma, B: Botijlaca, S : Sainani, H :Harca.

De plus, nous pouvons voir que le Niño Modoki et le MEI présentent une influence plus forte à Harca, Sainani et Botijlaca (r valant au maximum 0.4) par rapport aux autres stations, et expliquent environ 15 % de la variabilité sur ces pluviomètres pendant les mois de mars, avril mai. Les autres stations indiquent que la variation par rapport à la moyenne est faible, durant une anomalie climatique comme le phénomène « El Niño ».

Les études de corrélation globale n'étant pas très concluantes, on va s'intéresser aux années où El Niño/La Niña sont les plus marqués. Depuis 1973, 5 phénomènes « El Niño » ont été identifiés [Lavado, et al., 2009] à partir de l'indice SOI (Fig. I-11) : 1972/73, 1982/83, 1986/87, 1991/92 et 1997/98 (voir les étoiles rouges sur la Fig.- III-8). En analysant la relation année par année nous voyons que durant le Niño 1983 (plus fort Niño des dernières 35 années), la pluie a été déficitaire à toutes les stations, avec un effet plus visible sur Plataforma, SC et Patacamaya où le déficit a atteint environ 50%. Par contre, en 1987 ce déficit de pluie se note seulement à la station de Harca (-20%) tandis qu'il y a une augmentation à Patacamaya (20%). L'année 1992 présente une diminution de l'ordre de 20% sur tous les pluviomètres, par contre pour l'année 1998 une diminution du même ordre de grandeur est uniquement trouvée à Plataforma et SC.

Sur la même période, 4 phénomènes « La Niña » ont été détectés : 1973/74, 1988/89, 2000/01 et 2008/09. Pour 1974 seule la station Harca présente une augmentation de la pluie, tandis que cette augmentation est plus faible à Plataforma, et qu'à San Calixto et Patacamaya on note des petits écarts autour la moyenne. L'événement de 1989 est lié à de faibles précipitations sur les quatre pluviomètres avec un effet plus marqué sur San Calixto et Patacamaya (diminution de la pluie de l'ordre de 40%) et un effet moindre sur Harca et Plataforma qui ont une diminution d'environ 25%. Les années 1999 et 2001 présentent une augmentation sur la pluie, qui affecte surtout la station de Harca et Plataforma, avec une augmentation d'environ 25%.

Ainsi dans la zone d'étude les événements El Niño sont généralement associés à des années déficitaires alors que les événements La Niña sont plutôt associés à des années excédentaires en pluies. Par contre le signal « El Niño » a des effets différenciés selon les années par exemple 1974 et 1998 sont des années où le signal est plus fort sur l'Altiplano (Patacamaya) que dans la vallée (Harca).

Par contraste avec les résultats de l'étude menée indistinctement sur toutes les années, on constate donc que ce sont les années à fort Niño caractérisé qui présentent une réponse significative de la pluviométrie. Cependant, même pour ces années, l'intensité du Niño n'explique pas toute la variabilité observée et les effets peuvent être spatialement hétérogènes, ce qui explique que les études de corrélation globales donnent peu de résultats significatifs.

III.3.3.3 Cycle saisonnier des Evénements El Niño/La Niña

Afin de vérifier la saisonnalité et la distribution annuelle de la pluie pendant les années El Niño, sur les quatre régions climatiques, on analyse les cumuls des trois «Niño» catalogués comme les plus forts depuis 1973 (1982/83, 1991/92, 1997/98) et on les compare avec la moyenne des précipitations journalières de la période 1982-2010. (Fig. III-11). A noter que

les données journalières de l'année hydrologique 1982-83 sont utilisées seulement dans l'analyse présente.

Sur toutes les stations analysées l'impact du phénomène «El Niño» montre des précipitations plus faibles par rapport à la moyenne, sauf pour l'année 1998. La station de Harca présente des pluies plus fortes sur toute l'année, et Patacamaya présente le même effet mais durant la saison sèche.

Nous notons que l'impact sur la saisonnalité de la précipitation n'est pas le même pour toutes les stations. Une modification sur le cycle saisonnier se met en place surtout à Patacamaya, San Calixto et Plataforma, avec une saison des pluies moins bien marquée pendant ces années. Nous notons que la fin de la saison des pluies arrive plus tôt par rapport à une année normale ; par contre il n'y a pas d'effet clairement identifiable sur le début de la saison.

L'année 1983 est marquée par une forte diminution de la pluie pour toutes les stations, mais le plus fort impact est constaté aux stations de Patacamaya et Plataforma qui affichent une diminution de l'ordre de 50%. De la même manière, San Calixto présente une diminution de l'ordre de 25%. L'année 1992 est caractérisée comme une année sèche qui résulte d'un arrêt précoce de la saison humide aux 4 stations. L'impact du Niño 1998 apparaît de son côté plus faible que celui des deux autres années, voire fonctionnant à l'opposé du comportement courant plus que la pluie est supérieure à la moyenne à Patacamaya et Harca, ce qui est cohérent avec l'analyse [Lau et Zhou, 2003]. D'une manière générale la réaction à ces années de fort Niño est moins marquée à Harca que sur l'Altiplano, Plataforma ayant sur ce plan un comportement plus proche des stations de l'Altiplano que de celles de la moyenne vallée du Zongo. Au final, le point le plus important à retenir est probablement que pour tous les cas documentés ici, la diminution de la pluie annuelle associée à un fort Niño est liée à un arrêt précoce de la saison des pluies.

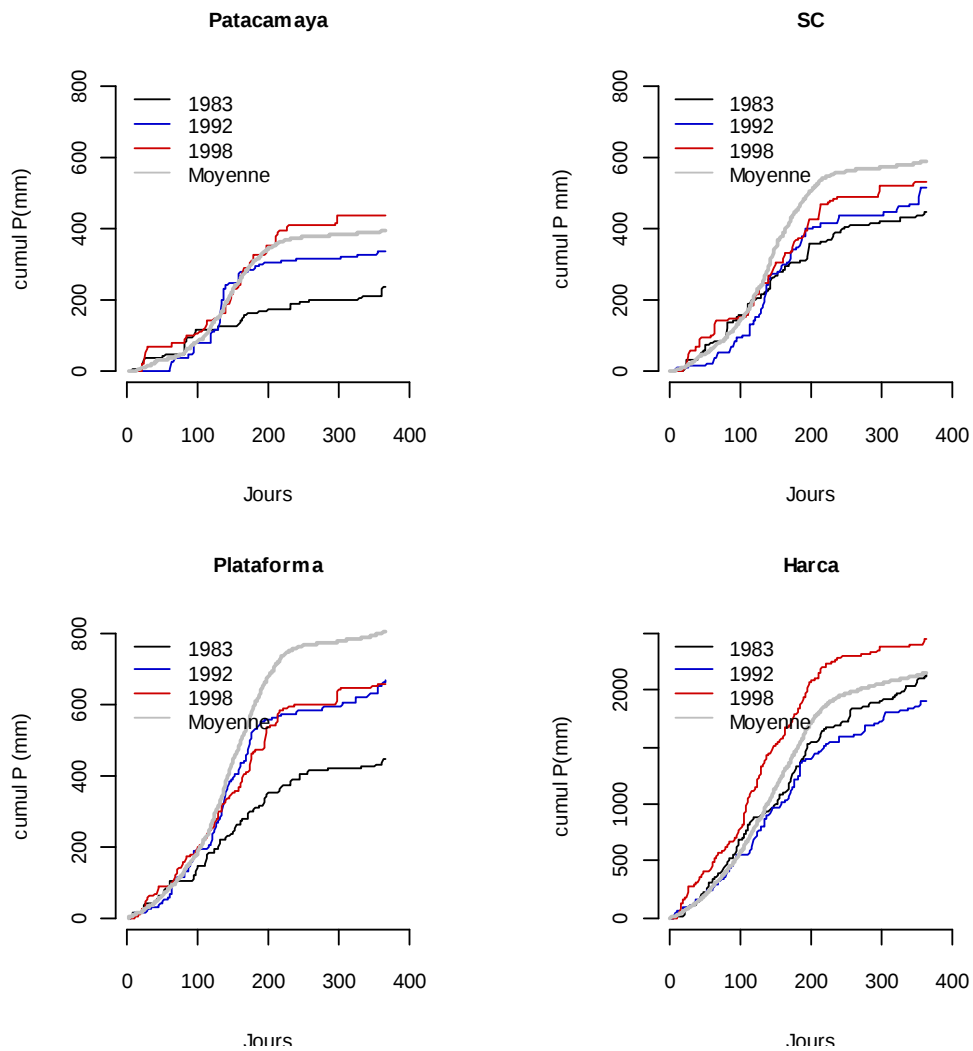


Figure III 11.- Cumuls des années cataloguées comme les Niño les plus forts : 1983, 1992, 1998 et cumul moyen de la période [1983-2010].

Ainsi, les résultats plus remarquables de cette sous- section sont :

- i) L'existence d'une variabilité interannuelle de la précipitation plus forte sur les pluviomètres de Patacamaya et Plataforma que sur les autres pluviomètres. Ces deux stations et San Calixto suivent en général une fluctuation interannuelle similaire durant 38 ans. Cependant la variabilité observée à Harca n'est pas bien en phase avec celle observée à ces pluviomètres.
- ii) Les nombre de jours pluvieux identifiés au seuil de 1, 2 et 5 mm suivent une même variabilité interannuelle. Dans la période d'étude (1992-2010) cette variabilité est faible, et ne montre pas une tendance d'augmentation ou diminutions dans le temps.
- iii) Les événements El Niño sont généralement associés à des années déficitaires alors que les événements La Niña sont plutôt associés à

des années excédentaires en pluies. Cependant, même s'il existe une liaison entre ces deux variables, la relation est trop faible pour affirmer qu'une année sèche/humide est causée par ce phénomène.

III.3.4 Cycle saisonnier des années humides et années sèches

Au-delà de la spécificité des années Niño/Niña, on observe sur la Fig. III.-12 des années sèches qui ne sont pas des années *Niño* et des années humides qui ne sont pas des années *Niña*.

Les composites de phases sèches et humides ont été calculés à partir de la moyenne des 3 années les plus sèches depuis 1992 (1992, 2002 et 2005) et des 2 années les plus humides (1997, 2001) identifiées dans la Fig. III.8. Les années sèches et humides avant 1991 de Harca et Plataforma n'ont pas été prises en compte à cause des lacunes dans les données journalières.

Durant une année typiquement humide la durée de la saison des pluies est plus longue, surtout à Patacamaya, San Calixto et Plataforma, et se caractérise par des épisodes pluvieux plus intenses que la normale, un fait déjà relevé par [Garreaud, et al., 2000]. Pour Patacamaya et San Calixto le démarrage de la saison est plus tôt et la fin de la saison humide est marquée par des épisodes plus intenses que la moyenne. Harca montre deux périodes de fortes précipitations en décembre et à la fin du mois de mars ce qui provoque une augmentation de la valeur de la pluie annuelle.

Pendant les années sèches une diminution par rapport à la moyenne de la durée de la saison des pluies est visible, surtout à Patacamaya, San Calixto et Plataforma. Le démarrage de la saison des pluies est moins intense et la fin est en avance par rapport à une année normale. En plus, on note de fortes intensités entre les jours 90 et 120 (15 déc. -15 janv.) qui dépassent la moyenne. Harca montre un cycle similaire à celui de la moyenne mais avec des intensités plus faibles que la normale, surtout durant le mois de janvier.

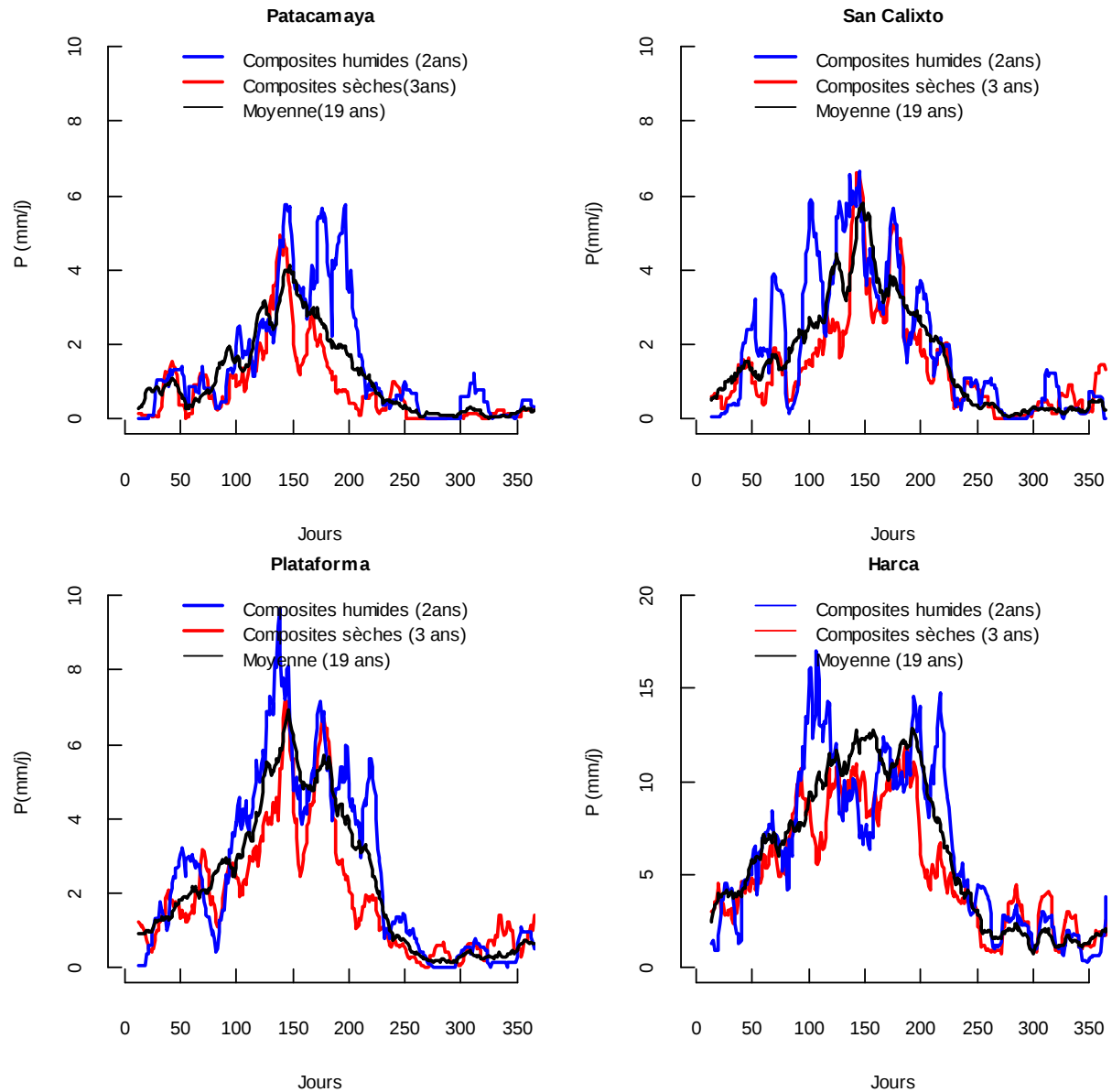


Figure III 12.- cycle saisonniers des composites secs (1992,1998, 2005), composites humides (1997,2001) et de la moyenne des 19 ans (1992-2010). Pluie annuelle à Patacamaya : 395mm, San Calixto : 600mm, Plataforma : 800mm et Harca : 2160mm

Il semble donc que la durée du ‘cœur’ de la saison des pluies contrôle en grande partie la quantité annuelle des précipitations, surtout sur la région de l’Altiplano. Par contre, il est difficile de conclure ici concernant les phases de démarrage ou de fin de saison des pluies, du fait du petit nombre d’années disponibles et de la forte variabilité d’échantillonnage associée, se manifestant notamment par des fluctuations brutales en cours de cycle. (cf. chapitre IV)

III.4 VARIABILITE DECENNALE

III.4.1 Variabilité des cumuls annuels sur la période 1950-2010

Nous avons analysé à l'échelle décennale les séries temporelles de plus de 60 ans sur l'Altiplano (pluviomètres: Ayo Ayo et Patacamaya) et à La Paz (San Calixto), en utilisant l'indice pluviométrique qui est calculé selon l'équation III-5 [Balme, 2004]. La variation des indices pluviométriques sur la période 1950-2010 est présentée sur la Fig. III-13

On note que les variations sont assez similaires pour les 3 séries. Deux périodes plutôt sèches sont identifiées, particulièrement à La Paz, pendant les décennies 1950-59 et 1960-69. Cette dernière décennie est la plus sèche de toute la période considérée, aussi bien pour la ville de La Paz que pour l'Altiplano.

Après 1970, nous mettons en évidence deux périodes plutôt pluvieuses durant les décennies 1970-79 et 1980-89. Les décennies 1990-99 et 2000-2009 sont caractérisées par un climat plutôt sec, mais moins sec que la période 1960-69. Cette dernière période sèche est particulièrement marquée pour Patacamaya. Cette oscillation décennale de la zone d'étude est liée à la fluctuation de la PDO (voir chapitre I), car la majorité des épisodes chauds (El Niño) surviennent durant la phase positive de la PDO [Seiller et al, 2012].

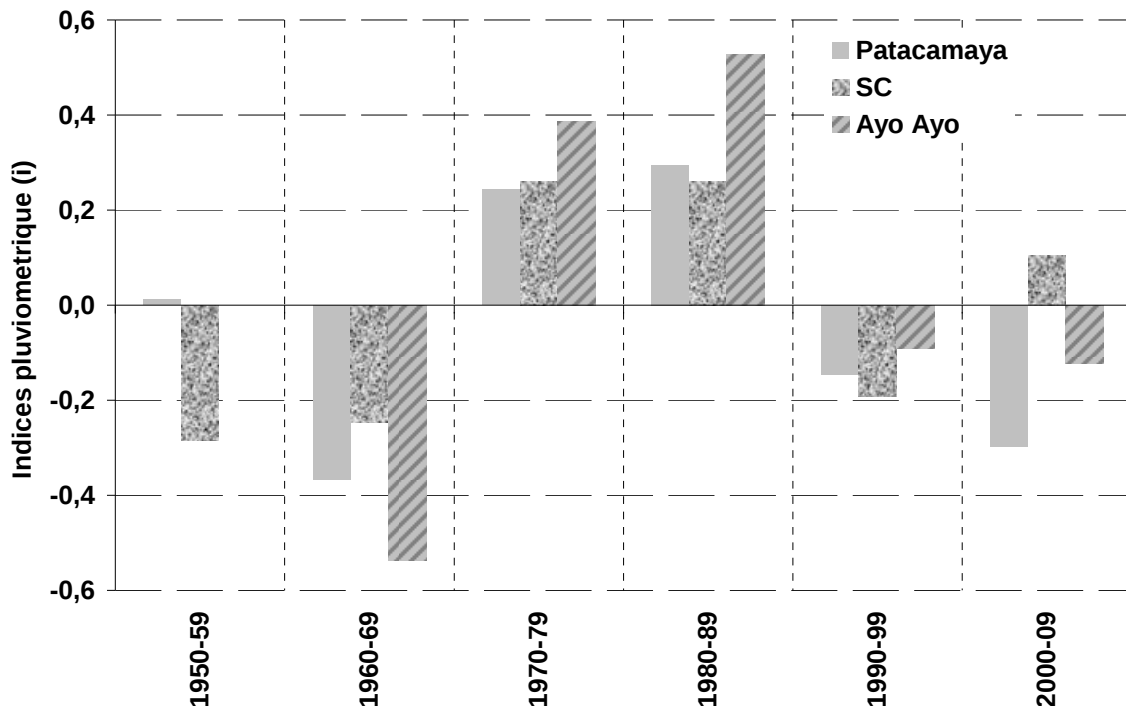


Figure III 13.- Indice pluviométrique $I_i = (P_i - P) / \bar{a}$ (équation III.5), calculé à partir de la moyenne de chaque décennie depuis 1950 pour les pluviomètres Patacamaya, Ayo Ayo et San Calixto (SC).

III.4.2 Variabilité du cycle saisonnier durant les dernières 3 décennies

On cherche ici à voir si on peut détecter d'éventuelles modifications du cycle saisonnier sur la période 1981-2010. Pour cela on analyse Harca Plataforma, San Calixto (SC) et Patacamaya à partir des données journalières. La variation est examinée en séparant 3 décennies [1981-1990], [1991-2000] et [2001-2010] pour Patacamaya et SC et en deux décennies [1992-2000] et [2001-2009] pour Plataforma et Harca (Fig. III.-14).

Comme en section III.2.1 le cycle saisonnier est représenté avec une fenêtre glissante de 11 jours et on va s'intéresser à d'éventuels changements dans les trois phases identifiées dans cette section : l'installation, le cœur de la saison de pluie et la saison sèche.

Le cycle saisonnier de Patacamaya montre que durant les deux premières décennies, l'installation de la saison des pluies (0 à 120 nombre de jours : comptés à partir du 1^{er} septembre) est similaire. Néanmoins, la dernière décennie présente une diminution d'environ 30% sur cette phase d'installation. Le cœur de la saison des pluies est caractérisé par une augmentation abrupte de 1.5mm/j à 4mm/j en décembre sur les trois dernières décennies, par contre la période ayant les plus fortes intensités (qui dure environ une semaine) est décalée plus tard dans l'année d'environ 10 jours pour la décennie 2001-2010. La saison sèche présente une diminution de la pluie similaire durant les trois décennies, cependant en termes de quantité la dernière décennie révèle une baisse de 25 % par rapport à la première décennie.

Le pluviomètre du SC montre une installation de la saison des pluies similaire sur les dernières trois décennies. Comme à Patacamaya le pic de la saison de pluie est décalé de quelques jours pour la période 2001-10, et les intensités sont plus fortes, atteignant 7 mm/j.

Plataforma présente une installation de la saison des pluies plus lente que Patacamaya et San Calixto durant les décennies 1991-2000 et 2001-2010. Par contre le cœur de la saison des pluies est plus intense durant la dernière décennie, surtout entre les jours 140 et 160 (janvier).

Harca montre une installation de la saison des pluies similaire durant les deux périodes. Par contre, les intensités sont plus fortes durant le cycle 2001-10 que durant la décennie 1991-2000. En plus, ces période de fortes événements pluvieux a une durée de 60 jours (jour 100 à 160 : du 9 : Décembre au 67 février) par rapport aux autres stations.

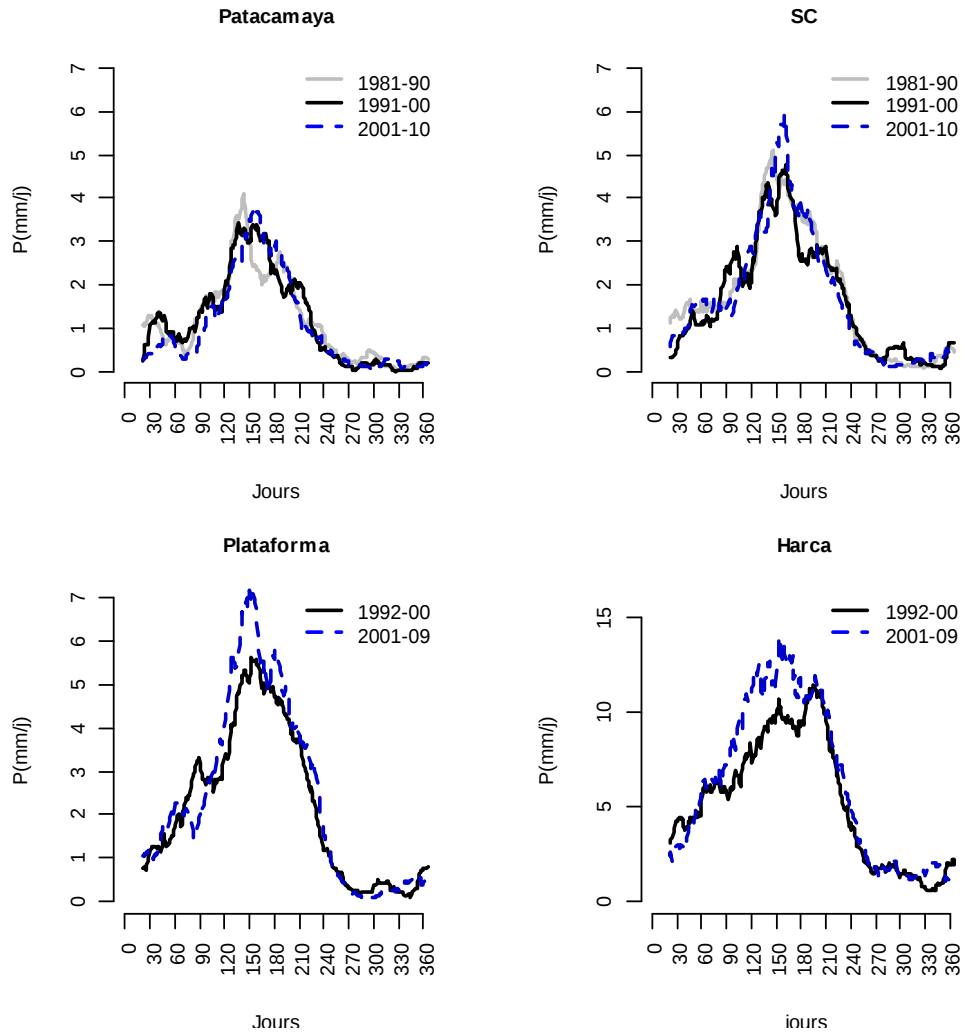


Figure III 14.- Variation journalières de a) Patacamaya pour les décennies 1981-90, 1991-00, 2001-10 b) San Calixto : Périodes 1981-90, 1991-00, 2001-10 c) Plataforma : période 1992-00, 2001-09 d) Harca : période 1992-00, 2001-09. En abscisse la Pluie journalière en mm et en ordonnées le nombre de jours depuis le début de l'année hydrologique au 1^{er} septembre (Jour 1).

Après cette analyse nous pouvons remarquer les points suivants :

- Patacamaya présente un cycle saisonnier similaire durant les dernières trois décennies, cependant en termes de quantité la période 2001-10 présente une diminution de 30% durant l'installation de la saison des pluies et 25% durant la saison sèche par rapport à la première période.
- Plataforma a un cycle assez similaire durant les deux décennies, cependant durant la dernière décennie, le cœur de la saison des pluies présente une augmentation de 16% par rapport à la décennie précédente.
- Harca montre une notable augmentation de la pluie entre l'installation et le cœur de la saison des pluies. En termes de quantité, la dernière décennie présente durant la phase d'installation de la saison des

pluies et durant la saison sèche une augmentation de 15% de la pluie moyenne et de 20% durant le cœur de la saison des pluies.

- La dernière décennie présente une faible modification du cycle moyen sur les quatre pluviomètres. Cependant nous constatons que durant la dernière décennie il y a une diminution de la pluie durant l'installation de la saison de pluies à Patacamaya tandis qu'à Harca il y a plutôt une augmentation.

III.4.3 Variation de la distribution de la pluie journalière sur les deux dernières décennies

Deux périodes de neuf années ont été utilisées pour analyser les fluctuations de la distribution statistique des pluies journalières [1992-2000] et [2001-2009]. Nous avons considéré les événements pluvieux supérieurs à 0.1 mm/j (Fig. III.-15)

Aux stations Patacamaya, San Calixto et Harca la variation de la pluie annuelle entre la décennie 1992-00 et la 2001-09 est faible (moins de 5% du total annuel moyen). Par contre à Plataforma, la pluie moyenne de la décennie 2001-09 excède de 10% celle de la décennie précédente. La Fig.-III.15 compare les distributions des pluies journalières entre les deux dernières décennies selon la représentation de l'équation III.2. A San Calixto et à Harca les distributions de la pluie sont assez similaires entre ces deux décennies, en accord avec peu de changement du total annuel. A San Calixto on peut noter plus d'événements très intenses durant la deuxième décennie, mais ces événements représentent moins de 2% du total annuel. Par contre à Patacamaya, la première décennie (1992-00) semble avoir connu davantage d'événements de pluies supérieurs à 5 mm/j. A Plataforma, l'augmentation des totaux annuels lors de la deuxième décennie semble lié à une plus grande fréquence des fortes pluies (>15 mm/j).

Au final il est assez difficile de conclure à une fluctuation significative des pluies entre les deux décennies considérées [Vuille, et al., 2008] ; on note que les tendances observées sont différentes selon les stations et qu'une ou deux années particulières peuvent avoir un grand poids dans ce type d'analyse. Une analyse plus fine basée sur l'utilisation de tests de tendances ou de ruptures serait nécessaire pour parvenir à des résultats plus solides.

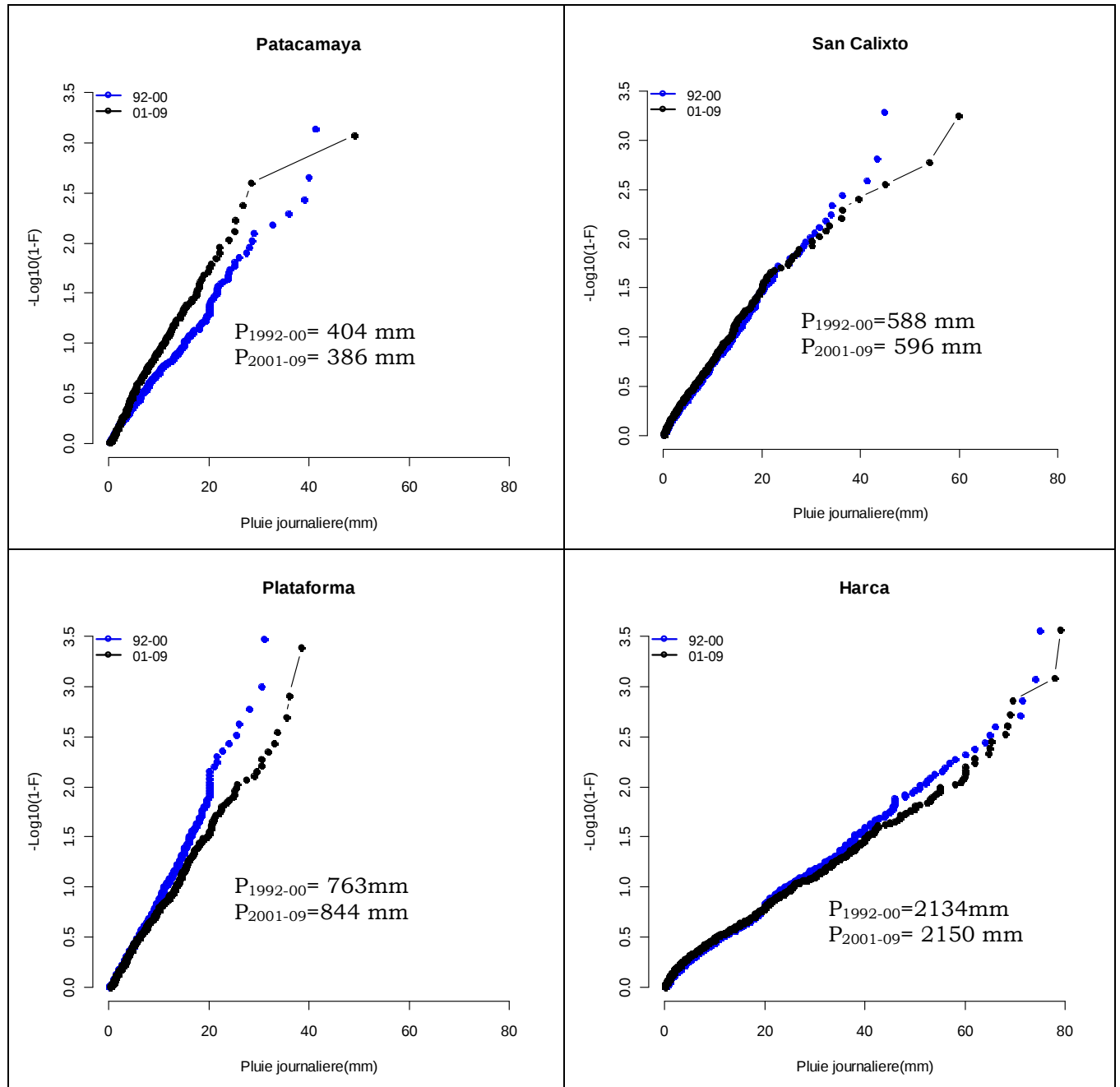


Figure III 15.- Composites sur deux périodes 1992-00 et 2001-09. En abscisses la pluie journalière et en ordonnées la fréquence empirique a) Patacamaya. b) San Calixto c) Plataforma d) Harca.

III.4.4 Variation d'échelle décennale du cycle saisonnier

Les données utilisées dans la section III.4.1 permettent de faire une analyse des cycles saisonniers sur les derniers 60 ans aux 3 stations : Ayo Ayo, Patacamaya et San Calixto (Fig. III-16). Cette analyse a été faite avec la moyenne journalière de trois périodes : [1951-70], [1971-90] et [1991-10].

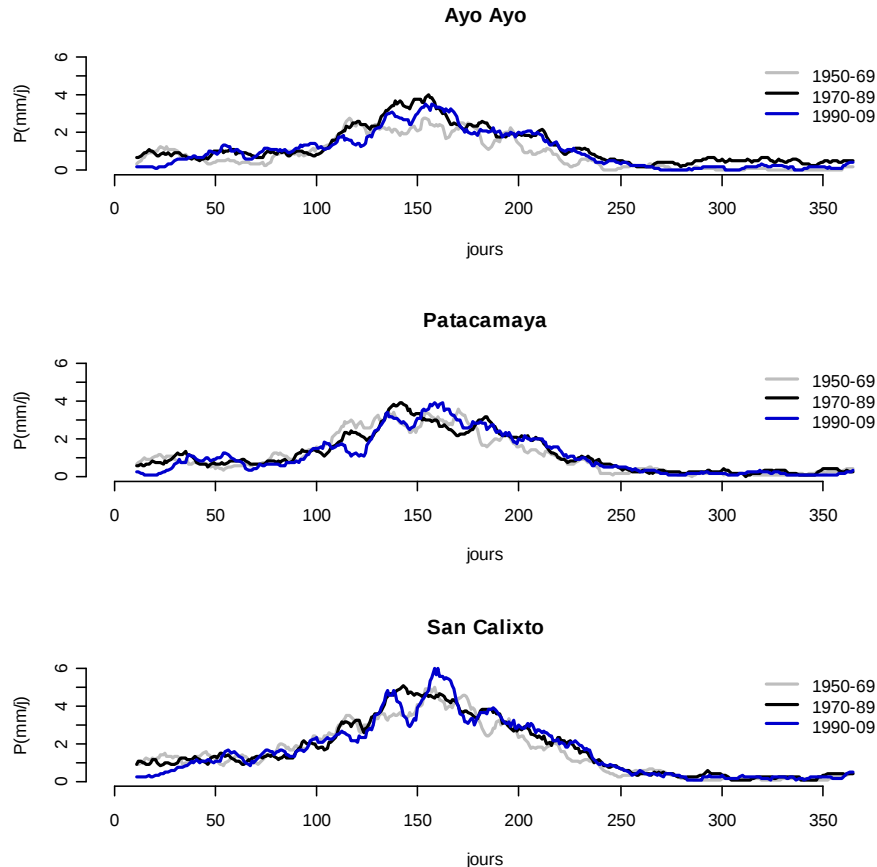


Figure III -16.- Moyenne glissante sur 11 jours à Ayo Ayo, Patacamaya et San Calixto. Cycles moyens sur 3 décennies : 1950-69, 1970-89 et 1990-09. En abscisse la Pluie journalière en mm et en ordonnées les jours, début de l'année hydrologique (Jour 1) est le 1er septembre

Sur nos 3 stations, des changements dans le cycle saisonnier sont visibles lorsque l'on compare la période 1950-1969 et la période 1990-2009. Les trois pluviomètres (Patacamaya, San Calixto et Plataforma) montrent que durant la première période [1951-1970], l'installation de la saison de pluie arrive à partir de la deuxième semaine de novembre (jour 75) et les précipitations augmentent progressivement pour arriver aux intensités maximales en février. A partir de la deuxième semaine de mars (jour 175) les intensités sont plus faibles et il apparaît une diminution progressive de la pluie vers la saison sèche. Ce cycle saisonnier semble s'être un peu modifié durant les deux dernières périodes [1971-90] et [1991-10]. Pour ces 2 périodes, durant les premiers 45 jours de l'année hydrologique les intensités de pluie sont plus fortes que pour la première période avec une différence de 1 à 1.5 mm/j. Les deux dernières périodes montrent que pendant le cœur de la saison de pluie l'installation est plus abrupte que durant la première période. Nous notons des intensités plus fortes par rapport à la première période qui atteignent jusqu'à 6 mm/j à SC et 4 mm/j à Ayo Ayo et Patacamaya sur la période qui s'étend entre les jours 150 et 175 (fin janvier). De plus, à Ayo Ayo et Patacamaya la première période a une durée de saison des pluies d'environ 4 mois (déc. - mars), alors que durant les deux dernières périodes cette durée est plus courte. Cette réduction semble liée à un retard

du démarrage de la saison (d'environ 10 jours), puisque la fin est plutôt similaire durant les trois décennies.

III. V CONCLUSIONS DU CHAPITRE

A partir d'une analyse de la variabilité pluviométrique à différentes échelles temporelles (décennale, interannuelle, saisonnière et journalière) nous avons pu établir un certain nombre d'éléments nouveaux concernant l'évolution du régime pluviométrique le long d'un gradient allant de l'Altiplano aux vallées amazoniennes en franchissant la cordillère des Andes :

- Le régime pluviométrique dans la zone suit un gradient NE-SO et est contrôlé par deux facteurs principaux : l'altitude dans la vallée du Zongo et la latitude sur l'Altiplano. Ces observations coïncident avec des études précédentes [Ronchail, et al., 1995, Ronchail et Gallaire., 2006]. Ainsi quatre zones avec un régime pluviométrique similaire ont été détectées : L'Altiplano, la ville de La Paz, la section moyenne et la section haute de la vallée du Zongo
- La méthode du vecteur régional nous a permis d'étudier les données récoltées sur 26 stations, réparties autour de la vallée du Zongo, la Ville de La Paz et l'Altiplano. Il faut noter que cette méthode n'est pas fiable pour la vallée du Zongo. Le gradient altitudinal empêche la détermination d'une station représentative de la vallée. De ces pluviomètres, 11 sont représentatifs de chaque région : 4 de l'Altiplano (Ayo Ayo, Collana, El Alto, Patacamaya) ; 3 de la ville de la Paz (Chuquiaguillo, Villa Copacabana et San Calixto) ; 2 de la section haute de la vallée (Botijlaca et Plataforma) et 2 de la section moyenne (Sainani et Harca). Cependant, pour l'analyse temporelle journalière, nous avons sélectionnée seulement 4 de ces 11 stations (Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca).
- Un objectif de ce travail était d'identifier les pluviomètres qui représentent le mieux la précipitation journalière du glacier. Pour cette raison on a analysé par corrélations (r^2), les pluviomètres P4 et P5 (les plus représentatifs de la précipitation du glacier) avec 11 pluviomètres représentatifs de la zone d'étude. Les stations de Botijlaca, Plataforma et Chuquiaguillo présentent les plus fortes valeurs de corrélation. Toutefois la plus forte valeur de r^2 dépasse à peine 0.5 à Plataforma et Botijlaca. Bien que Plataforma soit le pluviomètre journalier le plus proche du glacier, on voit qu'il représente seulement 50% de la variabilité journalière des précipitations du glacier.
- L'analyse temporelle de la précipitation journalière nous amène à identifier une alternance entre une saison des pluies et une saison sèche sur les quatre régions en étude. Cependant il existe une nette différence entre le régime pluviométrique du Zongo moyen et celui des

trois autres stations (Patacamaya, San Calixto et Plataforma). Ainsi, trois saisons ont été identifiées : l'installation, le cœur de la saison des pluies et la saison sèche. La principale différence du cycle saisonnier est que dans la vallée du Zongo il est difficile d'identifier un «cœur de saison de pluie » bien marquée, car son installation démarre plus tôt qu'ailleurs et est plus progressive. Par contre dans la partie haute de la vallée, la ville de la Paz et l'Altiplano cette phase est bien visible avec une rupture assez marquée dans le cycle saisonnier.

- Les nombre de jours pluvieux (NJP), contrôlent largement la variabilité interannuelle de la précipitation sur les trois pluviomètres de Patacamaya, San Calixto et Plataforma. Par contre, à Harca c'est plutôt l'intensité qui contrôle la variabilité interannuelle de la pluie. A une échelle plus fine, on peut dire que durant l'installation de la saison des pluies et la saison sèche, les NJP contrôlent la précipitation sur les trois premiers pluviomètres. De même, l'augmentation de la pluie lorsque l'on passe de la phase d'installation à celle du cœur de saison des pluies, est fortement liée à l'augmentation du nombre de jours pluvieux pour ces trois stations. Par contre, à Harca les deux premières phases sont plutôt contrôlées par l'intensité, alors que l'intensification du cœur de saison, est lié à la fois à de plus fortes intensités journalières moyennes et à une plus grande fréquence de pluie.
- Au cours des 38 dernières années, on relève 8 années particulièrement sèches (1977, 1982, 1983, 1989, 1990, 1992, 2002 et 2005) et 4 années particulièrement humides (1974, 1986, 1997, 2001). Les années sèches présentent des écarts plus forts par rapport à la moyenne que les années pluvieuses. Les fluctuations interannuelles à Patacamaya, San Calixto et Plataforma sont assez bien en phase, alors que Harca se comporte assez différemment.
- Les événements El Niño sont généralement associés à des années déficitaires alors que les événements La Niña sont plutôt associés à des années excédentaires en précipitations. Cependant, même s'il existe une liaison entre ces deux variables, la relation est trop faible pour affirmer qu'une année sèche/humide est avant tout associée à ce phénomène.
- A une échelle décennale, l'Altiplano et la ville de La Paz présentent une période particulièrement sèche durant les années 60-70 et deux périodes particulièrement humides pendant les années 70-80 et 80-90. Les décennies 1990-99 et 2000-2009 sont caractérisées par un climat plutôt sec, mais moins sec que la période 1960-69. Cette fluctuation peut être liée à la PDO, pendant que la PDO est en phase positive/ négative l'Altiplano et la Ville de la Paz expérimentent une période sèche/ pluvieuse

La variation du cycle moyen durant les deux dernières décennies révèle une augmentation de la précipitation durant le cœur de la saison des pluies. Cette caractéristique est observée surtout à Harca et, de manière moins nette, à Plataforma et San Calixto. Cette augmentation est liée à l'existence d'évènements pluvieux plus forts par rapport à la décennie précédente.

CHAPITRE IV

CARACTERISATION DE LA SAISON DES PLUIES

Dans ce chapitre nous étudions quatre méthodes destinées à identifier les différents stades de la saison des pluies, année par année et non plus seulement en moyenne climatologique. Deux méthodes sont basées sur l'intensité journalière des pluies (mais incluent aussi le nombre de jours pluvieux) : i) la méthode '*pentades*' utilise le calcul des moyennes des précipitations tombées en cinq jours ; ii) dans la méthode '*points d'interception sur le cumul*' (nommée PIC) les changements de saison sont identifiés à partir de ruptures de pente dans la courbe du cumul des précipitations. Deux autres méthodes sont basées sur le nombre de jours pluvieux : i) La méthode *NJP* s'appuie sur le comptage du nombre de jours pluvieux sur une fenêtre glissante de 21 jours ; ii) la méthode *NJP consécutif* prend en compte le nombre moyen de jours pluvieux consécutifs sur une fenêtre glissante de 21 jours. Dans les deux cas, un jour est compté comme pluvieux si la pluie est supérieure à 1 mm selon l'analyse du chapitre 3.

Comme mentionné dans le chapitre d'introduction générale, l'identification de différentes composantes dans le cycle saisonnier des précipitations a un intérêt tant climatologique qu'hydro-glaciologique. Il n'existe pas de méthode universellement éprouvée pour ce faire et c'est pourquoi nous avons choisi ici d'en tester plusieurs, inspirées directement ou indirectement de travaux réalisés dans d'autres régions du globe. En comparant les périodes identifiées par les différentes méthodes on espère obtenir une vision plus objective de ce qui caractérise la saison des pluies dans les Andes Centrales et mettre en relation la variation de ces caractéristiques avec les variations interannuelles des cumuls saisonniers, d'une part, et avec les régimes de fonte glaciaires, d'autre part.

IV.1 NOTION D'ANNEE CLIMATIQUE

Dans la section I.2.2 nous avons présenté une description générale des variabilités mensuelle et saisonnière de la pluie sur l'Altiplano et dans la ville de La Paz. Ci-dessous nous analysons la pluie mensuelle exprimée en pourcentage du total annuel pour chaque station étudiée (Patacamaya, San Calixto, Plataforma, Harca) (Fig. IV.1). A Patacamaya, San Calixto et Plataforma, plus de 70% de la pluie annuelle intervient entre les mois de décembre et avril, mais seulement 60% à Harca dans la vallée du Zongo. Cette concentration des pluies peut être reliée au 'cœur' de la saison des pluies. Après la saison des pluies, nous voyons une forte diminution de la pluie mensuelle à partir de mai. La saison sèche peut être définie en moyenne de mai à juillet ; cette période ne correspond en moyenne qu'à 10% de la pluie annuelle sur l'Altiplano et 15% dans la vallée. Finalement, nous voyons une ré-augmentation de la pluie à partir du mois d'août, qui devient plus visible à partir de septembre, marquant l'installation de la saison des pluies. Cette phase (août-novembre) concentre environ 20% de la pluie annuelle sur l'Altiplano et 25% dans la vallée de Zongo et peut être définie comme une saison intermédiaire entre saison sèche et saison des pluies.

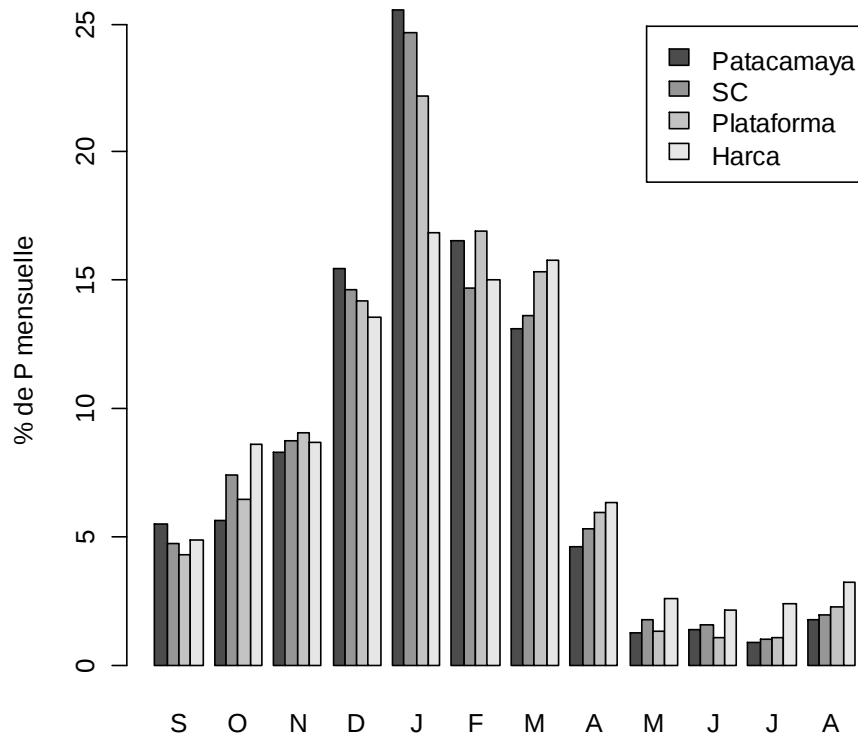


Figure IV 1.- Moyenne mensuelle des précipitations en pourcentage du total annuel.
Pluviomètres : Patacamaya, San Calixto (SC), Plataforma et Harca sur une période de 37 ans (1973-2010).

Généralement, les travaux réalisés dans les Andes centrales définissent l'année hydrologique de début septembre à fin août, car d'un point de vue hydrologique septembre est le mois où la nappe phréatique commence à augmenter son niveau par recharge, après la saison sèche [Ribstein, et al, 1995]. Cependant, si l'on cherche à caractériser l'année hydrologique à partir de la pluie journalière, nous voyons que le mois d'août présente une tendance à la remontée des précipitations après la saison sèche et peut donc marquer le début de l'installation de la saison des pluies. Ceci se voit bien sur la Fig.- III.4 qui représente le cycle saisonnier moyen des précipitations. Pour cette raison nous considérons dans ce chapitre et le chapitre V l'année hydrologique comme allant du 1^{er} août au 31 juillet.

IV.2 LIMITES ET DUREE DE LA SAISON DES PLUIES : ASPECTS METHODOLOGIQUES

Dans cette section on va s'intéresser à l'aspect méthodologique de cet exercice particulier qui consiste à délimiter une saison des pluies sous les tropiques. Comme on l'a déjà vu au chapitre III, il commence à pleuvoir aux alentours de La Paz dès le mois d'octobre (voire septembre), mais de manière souvent dispersée. Ce qui va nous intéresser ici c'est donc plutôt le « cœur »

de la saison des pluies, une période où la probabilité de séquences sèches de plusieurs jours est au plus bas. La durée de ce cœur de saison des pluies (D) est calculée à partir de la différence entre sa fin et son début :

$$D = DFP - DDP \quad (\text{Eq. IV-1})$$

Avec :

D : Durée du cœur de la saison des pluies (jours)

DFP : Date de la fin du cœur de la saison des pluies

DDP : Date de démarrage du cœur de la saison des pluies

Par raccourci, on utilisera parfois simplement l'expression « début de la saison des pluies » et « fin de la saison des pluies » mais ces termes doivent s'entendre de manière relative (à une période de pluie assez fréquente) et non absolue (il peut pleuvoir en dehors des limites ainsi définies). Tester des méthodes robustes permettant de discriminer entre période de pluies éparses et périodes de pluies plus continues est donc l'enjeu de cette section.

Différentes méthodes pour déterminer DDP et DFP ont été développées à partir de données pluviométriques journalières, par exemple en Amazonie [Marengo, et al., 2001], en Afrique [Sivakumar, 1988 ; Balme, 2004] et en Australie [Nicholls, 1988 ; Brubaker et al, 1993, Joseph, et al, 1991], en Argentine [Antonio de la casa, et al., 2009]. Dans notre cas, nous avons développé des méthodes basées sur la bibliographie citée précédemment mais aussi en considérant des critères et des seuils adaptés aux climats de la vallée du Zongo et de l'Altiplano. Nous avons, d'une part, des méthodes basées sur l'intensité ou le cumul de la pluie, et d'autre part des méthodes basées sur le comptage de jours pluvieux. Dans le premier groupe, nous avons deux méthodes : *i)* la méthode des *Pentades* est basée sur la moyenne de l'intensité des pluies sur 5 jours . *ii)* la méthode *des points d'interception sur le cumul* est basée sur l'identification de ruptures de pente sur le cumul de la pluie journalière. Dans le deuxième groupe nous avons : *i)* la méthode *NJP*.- comptage du Nombre de Jours Pluvieux (NJP) sur une fenêtre glissante de 21 jours. *ii)* la méthode *NJP consécutifs*.- comptage du nombre moyen de jours pluvieux consécutifs sur une fenêtre glissante de 21 jours. Pour faciliter la lecture des graphes qui illustrent les résultats obtenus avec cette méthode, une table des pentades et des dates correspondantes est donnée en annexe 3.

IV.2.1 Méthode des Pentades

La méthode des pentades a été appliquée dans différentes régions de l'Amazonie Brésilienne, avec des données pluviométriques et de rayonnement solaire par [Horel, et al., 1989; Marengo, et al., 2001], pour l'identification des dates de démarrage et de fin de la saison de pluie. Cette méthode considère l'intensité moyenne des pluies sur cinq jours consécutifs (nommées dans le texte comme pentades), ce qui permet de lisser le bruit du signal journalier.

IV.2.1.1 Mise en œuvre de la méthode et représentation du cycle saisonnier.

La Fig. IV.2 montre le cycle saisonnier moyen sur 19 ans (1992-2010) pour les stations de Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca, formé à partir des pentades. Comme nous l'avons décrit dans la section III.2.1, les pluviomètres avec un type de climat plutôt altiplanique semblent présenter un démarrage de la saison des pluies plus abrupt que dans la vallée du Zongo. En considérant ce «saut abrupt» entre l'installation et la saison des pluies proprement dite, nous pouvons identifier que la première phase (installation de la saison) est située entre les pentades 1 et 27 (5 août - 13 décembre). La deuxième phase (cœur de la saison de pluies) peut être définie en moyenne entre les pentades 27 et 50 (13 décembre - 7 avril). Par contre, à Harca il est plus difficile de distinguer une phase d'installation de la saison des pluies : le début de la saison des pluies n'est pas clairement visible, cependant il y a un petit redressement autour le pentade 20, et la fin tombe autour de la pentade 52 (17 avril).

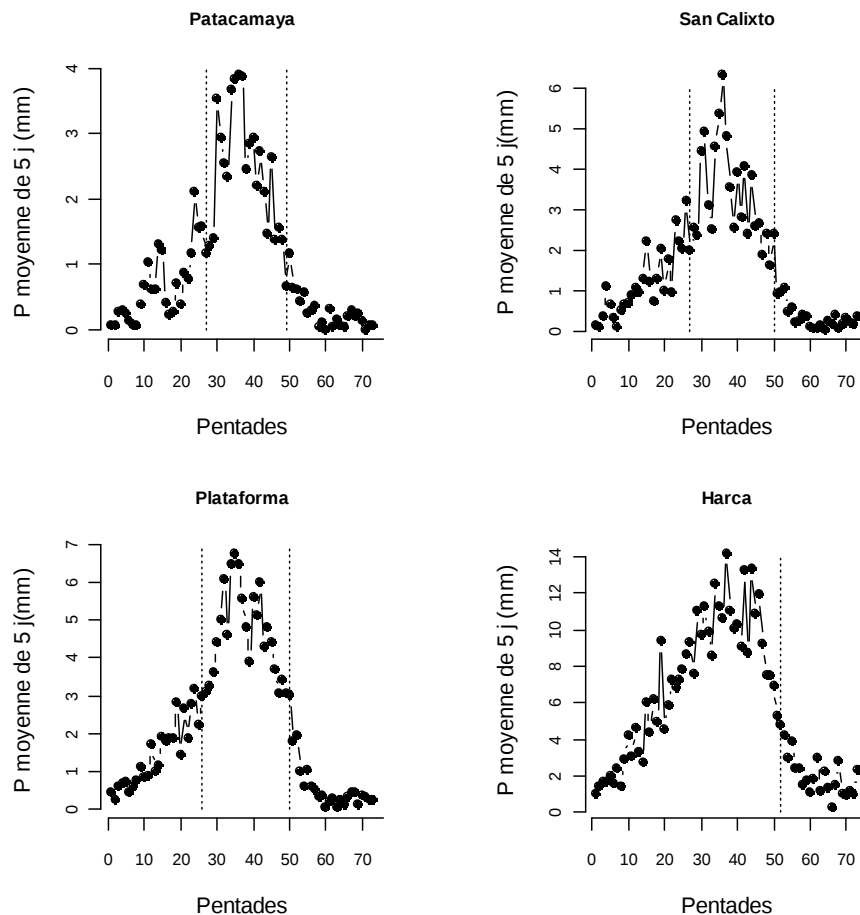


Figure IV 2.- Cycles saisonniers moyens des pluies (1992-2010) à Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca, formés à partir des pentades (chaque point représente la moyenne de cinq jours consécutifs, 74 points dans l'année). La pentade 1 représente la moyenne du 1^{er} au 5 août et la pentade 74 représente la moyenne du 27 au 31 juillet. Les lignes pointillées indiquent les séparations entre les phases d'installation, du cœur, et de fin de la saison des pluies (déterminées visuellement à titre indicatif). A Harca il n'est pas possible d'identifier clairement la DDP, c'est pourquoi la première ligne en pointillés a été omise.

IV.2.1.2 Seuils et critères pour déterminer la durée de la saison des pluies

Afin de déterminer de manière plus objective que précédemment, les dates de démarrage et de fin des pluies pour chaque pluviomètre, nous avons appliqué deux critères basés sur le travail de Marengo et al. [2001] : la DDP sera celle qui remplit la condition d'avoir au moins trois pentades (15 jours) sur quatre (20 jours) dépassant un seuil donné, et la DFP sera celle qui remplit la condition d'avoir au moins quatre pentades (20 jours) sur six (60 jours) qui soient inférieures à un seuil donné.

Dans le travail de Marengo et al. [2001] en Amazonie brésilienne, la condition de démarrage de la saison des pluies est d'avoir 6 pentades sur 8 au-dessus d'un seuil de 4 mm/5j. Dans notre cas nous avons revu ces valeurs pour les adapter à la climatologie des montagnes des Andes tropicales. Le Tableau IV.1 indique les seuils utilisés pour identifier le démarrage (DDP) et la fin (DFP) de la saison des pluies pour les quatre pluviomètres de l'étude. Ces seuils ont été obtenus visuellement d'après les moyennes pentadaires sur 19 ans (Fig. IV.-2).

Tableau IV.- 1.- Seuils pour déterminer la date de démarrage (DDP) et la fin (DFP) de la saison des pluies, avec la méthode de Pentades (moyenne sur 5 jours).

Méthode Pentades		
	seuil 1 (DDP mm/5j)	seuil 2 (DFP (mm/5j)
Patacamaya	2	1
San Calixto	3	1
Plataforma	4	1
Harca	8	3

Certaines années (1994 à Patacamaya, 1999 à Plataforma) ne remplissent pas ces critères et cette méthode échoue à identifier les différents stades de la saison des pluies. Ces années ne sont pas considérées dans les calculs. On notera que les seuils tant pour la DDP que pour la DFP, augmentent en allant de l'Altiplano (Patacamaya) vers la vallée du Zongo (Harca), du fait des caractéristiques différentes en intensité et fréquence de la pluie selon ces régions. Ainsi sur l'Altiplano un seuil de 10 mm/5j, maintenu pendant trois pentades sur quatre est significatif pour considérer que la saison des pluies a démarré. Dans la vallée du Zongo, les précipitations sont plus intenses et plus fréquentes que sur l'Altiplano et une pluie de 10 mm/5-j peut aisément se produire durant l'installation de la saison de pluie ou même pendant la saison sèche (chapitre III). Il est ainsi nécessaire d'avoir un seuil plus élevé pour représenter la saison de pluie dans la vallée du Zongo, soit 40 mm/5-j.

Les seuils pour déterminer la DFP sont plus bas que ceux de la DDP, du fait que durant la saison sèche les intensités et fréquences de la pluie restent très faibles. Vue la mise en place progressive de la saison sèche sur l'Altiplano et à Plataforma, les seuils de la DFP sont similaires dans ces

régions. Dans ces cas, un seuil de 5 mm/5-j est suffisant pour représenter le début de la saison sèche ou fin de la saison de pluies.

L'annexe 4 présente des tests de sensibilité des variables DDP et DFP à différentes valeurs de seuil. En raison de la distribution spatiale de la pluie, les valeurs de DDP et DFP sont plus sensibles aux valeurs de seuil sur l'Altiplano (sec) que dans la vallée du Zongo. Ainsi, une variation de seuils de 1mm/5j provoque sur le cycle saisonnier moyen de l'Altiplano une variation d'environ 5 pentades (25 jours) de la DDP et de 1 pentade (5 jours) de la DFP. Alors que dans la vallée du Zongo les DDP et DFP ne changent significativement (2 et 1 pentades, respectivement) qu'à partir d'une variation de seuil de 25 mm/5-j environ.

IV.2.1.3 Identification de la date de démarrage des pluies (DDP)

Les résultats (Fig. IV.3) indiquent qu'à Patacamaya, (à noter que l'année 1994 n'accomplit pas la condition) pour 9 années sur 18 la DDP tombe entre les pentades 25 et 30 (3 novembre – 28 décembre), pour 4 années entre les pentades 30 et 35 (28 décembre-22 janvier) et pour 3 années entre les pentades 20 et 25 (8 novembre -3 décembre). Sur ce pluviomètre la méthode n'identifie pas de saison des pluies en 1994 et cette année est omise des histogrammes

A San Calixto, durant 9 ans la DDP est située plutôt entre les pentades 25 et 30 (3 décembre – 28 décembre) : pour 5 ans entre les pentades 20 et 25 (8 novembre - 3 décembre) et pour 3 ans entre les pentades 30 et 35 (28 décembre - 22 janvier).

A Plataforma, la DDP est concentrée entre les pentades 25 et 30 (3 décembre – 28 décembre) pour 9 années ; pour 5 années la DDP est située entre les pentades 20 et 25 (8 novembre - 3 décembre), pour 3 années entre les pentades 30 et 40, et une année avant le 3 décembre (à noter que l'année 1999 n'accomplit pas la condition de DDP).

Finalement, Harca montre une distribution de la DDP concentrée entre les pentade 10 et 25 (19 septembre - 3 décembre) et donc une DDP plus précoce que sur les autres pluviomètres : 4 ans présentent une DDP située entre les pentades 10 et 15 (19 septembre- 14 octobre), 5 ans entre les pentades 15 et 20 (14 octobre - 8 novembre) et 3 années entre les pentades 20 et 25 (8 novembre - 3 décembre). Ce pluviomètre montre la variabilité interannuelle la plus forte des quatre pluviomètres étudiés. On peut noter que de nombreuses lacunes en 1996 et 1997 limitent l'analyse pour ce pluviomètre.

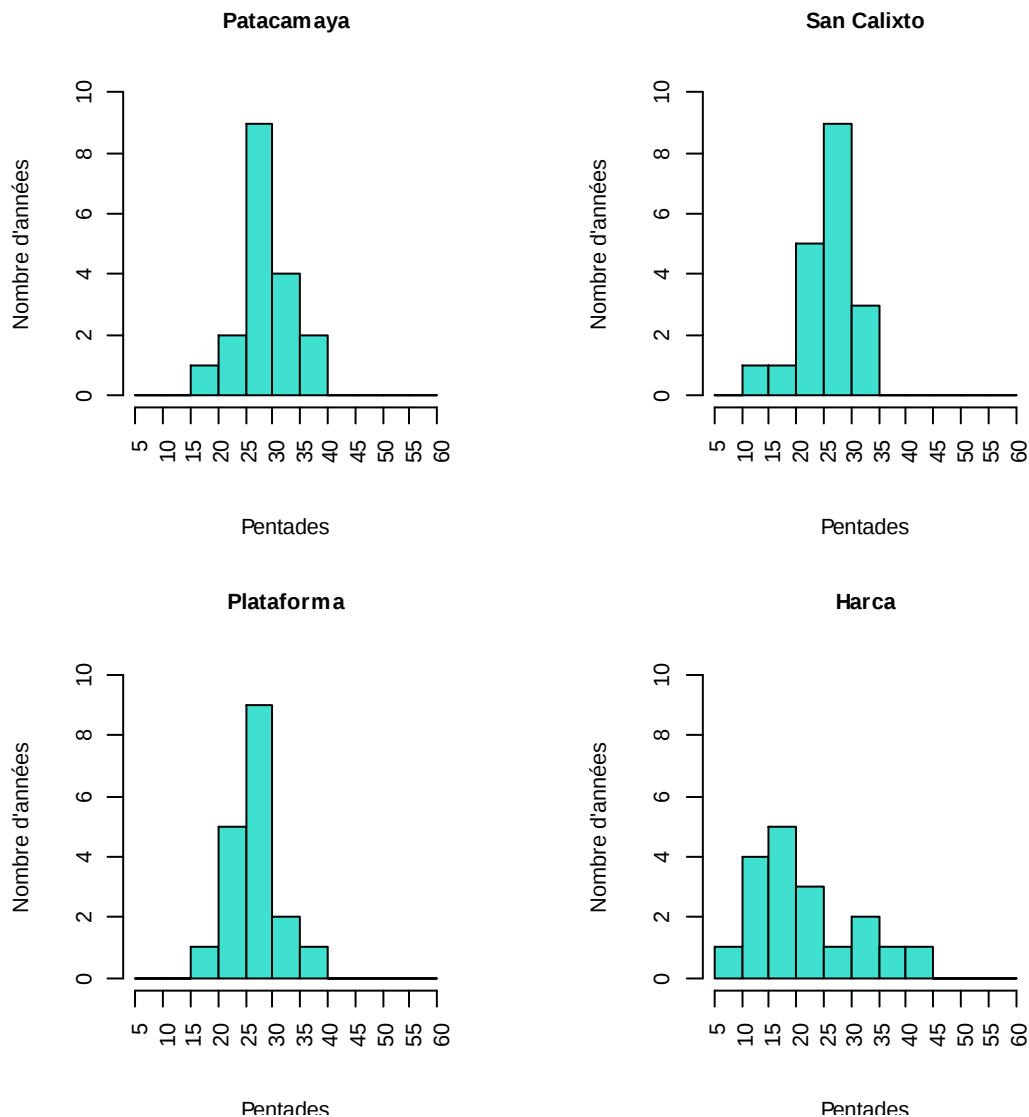


Figure IV 3.- Histogrammes de la date de démarrage des pluies (DDP) obtenue par la méthode des 'pentades' sur une période de 19 années (1992-2010) pour Patacamaya (sans 1994), San Calixto, Plataforma (sans 1999) et Harca (années 1996 et 1997 exclues). En abscisse la date représentée en pentades et en ordonnée le nombre d'années. Pentade 1 : 1-5 août ; Pentade 40 : 12 -16 février.

On peut conclure que, selon cette méthode, pour les pluviomètres altiplaniques et à Plataforma, la DDP est concentrée dans 50% des cas environ entre le 3 décembre et le 28 décembre (Pentades 25 – 30). A Harca la distribution de la DDP est plus étalée dans l'année et intervient plus tôt que sur l'Altiplano : entre les pentades 10 et 20 en général (19 septembre - 8 novembre).

IV.2.1.4 Identification de la date de fin de la saison des pluies (DFP)

Les histogrammes de la DFP (Fig. IV-4) montrent qu'à Patacamaya, durant 12 ans, la DFP est concentrée entre les pentades 45 et 50 (13 mars – 7 avril), et durant 6 ans, entre les pentades 50 et 55 (7 avril – 2 mai). San Calixto

montre que pour 16 ans la DFP se situe entre les pentades 45 et 50 (13 mars – 7 avril) et pour 3 ans entre les pentades 50 et 55. La distribution de DFP à Plataforma est asymétrique vers la droite, comme pour Patacamaya et San Calixto, avec une DFP comprise entre les pentades 45 - 55 (13 mars- 2 mai). A Harca 50% des années (9 ans) ont une DFP concentrée entre les pentades 50 et 55 (7 avril et 2 mai), donc 5 pentades (25 jours) plus tard que les autres stations. Le reste des années sont réunis surtout entre les pentades 45 et 50 (5 ans)

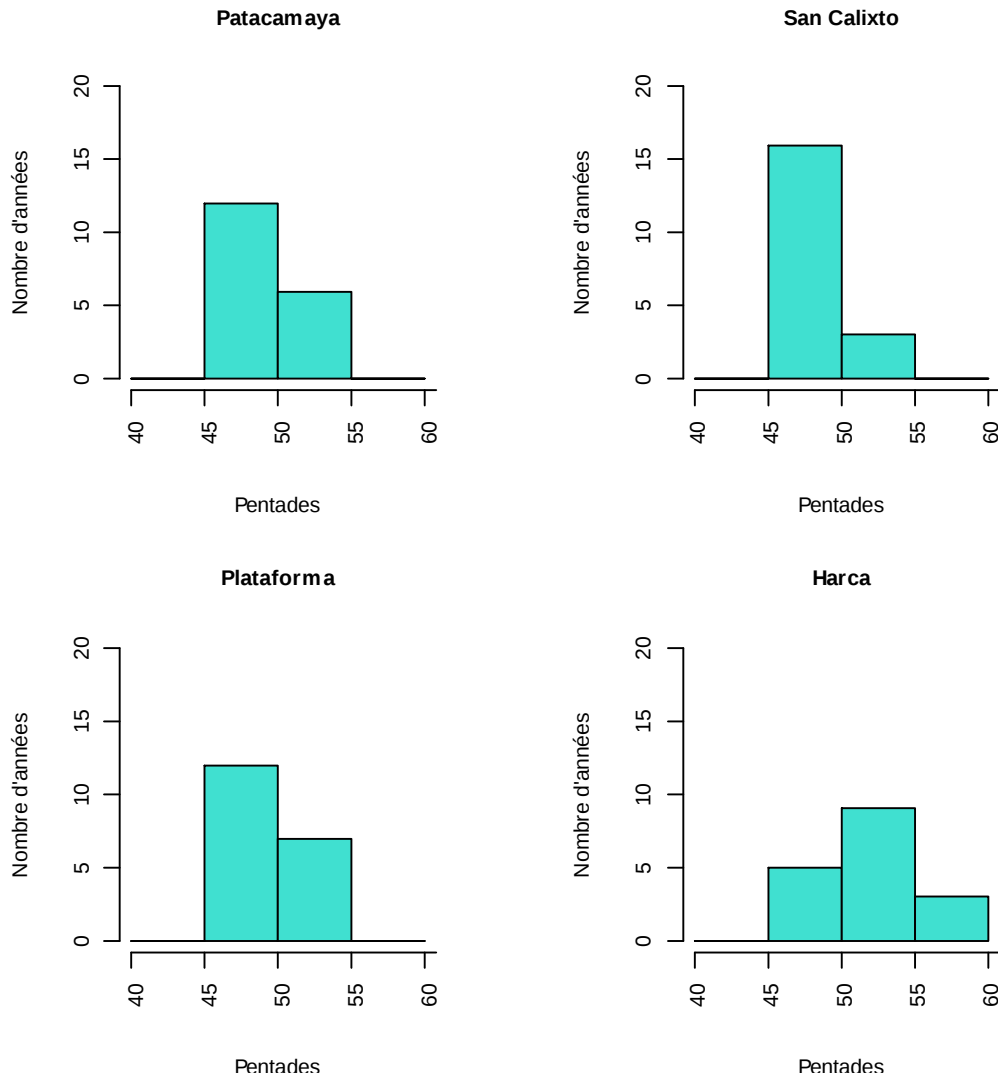


Figure IV 4- Histogrammes de la date de fin de saison des pluies (DFP) obtenus par la méthode des 'pentades' sur une période de 19 années (1992-2010), pour Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca (1996 et 1997 exclues). En abscisse la date représente le numéro de pentades et en ordonnée le nombre d'années. Pentades 40 : moyenne du 11 au 16 février pentade 60 : moyenne du 22 au 27 mai.

Cette méthode montre que sur la majorité des années Patacamaya, San Calixto et Plataforma présentent une DFP concentrée entre les pentades 40 et 45 et Harca entre les pentades 50 et 55, donc une DFP plus tardive que celle des autres stations. La distribution de la DFP à Plataforma et

Patacamaya sont assez similaires. Une analyse plus détaillée de la variabilité interannuelle de la DDP et DFP est faite dans la section IV.2.1.6.

IV.2.1.5 Durée de la saison des pluies

La durée de la saison des pluies est représentée par des graphiques de type boîtes à moustaches (Fig. IV.-5). Cette représentation graphique permet de représenter une distribution de valeurs sous forme simplifiée avec la médiane (trait épais), une boîte s'étendant du quartile 0.25 au quartile 0.75, et des moustaches qui s'étendent jusqu'aux premier et neuvième déciles. Les valeurs situées au-delà de ces maximums sont des valeurs exceptionnelles ou « outliers ».

Patacamaya présente une durée de la saison des pluies comprise entre 20 et 120 jours avec une médiane de 80 jours (Sans l'année 1994, car la DDP n'accomplit pas la condition donnée). Mise à part l'outlier à 158 jours observés en 1999, la plus longue durée est observée pour l'année 1997 avec 120 jours et la plus courte durée est observée en 2005 (20 jours). Les quantiles à 0.25 et 0.75 montrent une concentration entre 55 et 90 jours. A San Calixto la durée de la saison des pluies varie entre 55 et 170 jours. L'année 2003 est caractérisée comme l'année ayant la durée la plus longue de toute la période (170 jours) et 2005 la plus courte (55 jours). Plataforma (Sans l'année 1999, car la DDP n'accomplit pas la condition donnée) a une durée concentrée entre 60 et 120 jours, excepté pour un outlier très court à 20 jours en 2005. L'année 1993 présente la durée la plus longue (120 jours) et 1998 la plus courte de toute la série (20 jours). Ce pluviomètre montre la variabilité interannuelle la plus faible des quatre pluviomètres. Finalement Harca montre une forte dispersion des durées qui sont comprises entre 70 et 220 jours. La plus longue durée observée est en 1999 (220 jours) et la plus courte est en 2000 (75 jours), excepté pour un outlier très court à 55 jours en 2002. Les durées sont bien plus longues que pour les autres pluviomètres (médiane de plus de 5 mois).

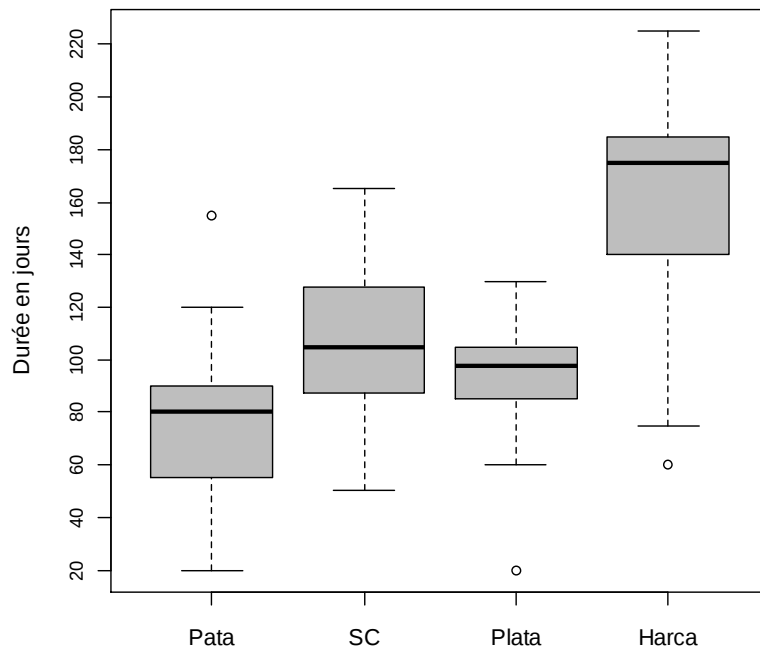


Figure IV 5.- Boîtes à moustache de la durée de la saison des pluies (1992-2010) pour Patacamaya (Pata, sans 1994), San Calixto (SC), Plataforma (Pla, sans 1999) et Harca (à l'exception des années 1996 et 1997) obtenues selon la méthode des « Pentades ». La ligne noire indique la médiane (quantile 0.5), la boîte s'étendant du quartile 0.25 au quartile 0.75, et les moustaches s'étendent jusqu'à la valeur distante d'au maximum 1.5 fois la distance interquartile. Finalement les valeurs extrêmes ou « outliers » sont représentées en cercles. En ordonnées la durée de la saison des pluies en jours

IV.2.1.6 Synthèse de la méthode.

Le tableau IV.2 montre les coefficients de détermination et le niveau de signification à 95% entre la durée de la saison des pluies et la DDP et DFP, et aussi entre la DDP et la DFP, à Patacamaya (DDP 18 points : sans 1994 et DFP 19 points), San Calixto (19 points), Plataforma (DDP 18 points : sans 1999 et DFP 19 points) et Harca (17 points, omission des années 1996 et 1997).

Les résultats montrent que sur les quatre stations la durée est bien mieux reliée à la DDP qu'à la DFP. De cette manière nous pouvons dire que le démarrage de la saison des pluies détermine grandement la durée. Les corrélations entre la DDP et la DFP sont très faibles, non significatives ($r^2=0.01$), et on peut donc considérer ces deux variables indépendantes l'une de l'autre.

Selon cette méthode, Harca est le pluviomètre qui montre la meilleure relation entre la DDP et la durée : les variations de DDP expliquent 90% de la variance de la durée. Il présente aussi le coefficient de détermination le

plus bas (non significatif) entre la DFP et la durée ($r^2=0.15$). Les stations sur l'Altiplano présentent aussi de bons coefficients de détermination entre DDP et durée : les variations de DDP expliquant plus de 60% de la variabilité de la durée. La relation entre DFP et Durée est plus forte à San Calixto et à la Plataforma ($r^2= 0.44$ et 0.34 respectivement), mais ces valeurs restent plus faibles que celles obtenues entre la DDP et la Durée.

Tableau IV.- 2.- Coefficient de détermination (r^2) de la durée avec les dates de démarrage (DDP) et de fin de la saison des pluies (DFP) et de la DDP avec la DFP (19 ans). En Italique les valeurs qui ne sont pas significatives au seuil de 95%.

R²	DDP-Durée	DFP-Durée	DDP-DFP
Patacamaya	0,74	0,36	<i>0,01</i>
SC	0,66	0,44	<i>0,01</i>
Plataforma	0,63	0,34	<i>0,01</i>
Harca	0,91	<i>0,15</i>	<i>0,01</i>

Les statistiques sur la moyenne interannuelle de 19 ans de la DDP et la DFP (Tableau IV.3, valeurs présentées en jours) montrent que la saison des pluies arrive d'abord à Harca (jour 110 : 18 novembre) et presque simultanément à Plataforma, à San Calixto et à Patacamaya vers le jour 140 (13 décembre). Par contre, la moyenne de la DFP montre une fin de la saison des pluies d'abord à Patacamaya (jour 224 : 8 mars), atteignant Harca environ 40 jours après (17 avril). Ainsi, cette méthode indique une saison des pluies qui arrive d'abord dans la vallée du Zongo avant d'atteindre l'Altiplano et qui finit d'abord sur l'Altiplano et persiste davantage dans la vallée du Zongo. Ce schéma est cohérent avec le trajet des masses d'air humides provenant des plaines de l'est de la cordillère.

Les écarts types montrent une variabilité interannuelle plus forte de la DDP que de la DFP, expliquant pourquoi la durée ($D=DDP-DFP$) est surtout contrôlée par la DDP (tableau IV.2). Patacamaya et Harca présentent les plus fortes écarts types de la DDP de quatre stations (25,7 et 46,1 jours respectivement). En revanche, Patacamaya et San Calixto montrent les plus forts écarts types de la DFP (16,3 et 17,4 respectivement)

Tableau IV.- 3.- Moyennes et écart types représentés en jours, de la date de démarrage des pluies (DDP) et la date de fin de saison (DFP) selon la méthode des 'pentades', moyenne sur 19 ans (1992-2010)

	DDP		DFP	
	Moyenne (date)	Ecart type en jours	Moyenne (date)	Ecart type en jours
Patacamaya	144 (22 décembre)	25,7	225 (12 mars)	16,3
San Calixto	132 (10 décembre)	22,4	238 (25 mars)	17,4
Plataforma	144 (22 décembre)	18,1	248 (4 avril)	13,4
Harca	110 (18 novembre)	46,1	266 (22 avril)	14,5

Un des avantages de cette méthode est qu'elle lisse les fluctuations des données journalières en s'appuyant sur des moyennes de cinq jours, ce qui permet d'éviter de diagnostiquer de manière prématurée une entrée en saison des pluies suite à un événement pluvieux fort, mais isolé. Les cycles moyens montrent une durée de la saison des pluies comprise entre 2 et 4 mois sur l'Altiplano et Plataforma et plus de 5 mois dans la vallée du Zongo. Ces résultats sont cohérents avec ce qui est déjà bien connu de la climatologie locale.

IV.2.2 Méthode de points d'interception sur le cumul annuelle (PIC)

IV.2.2.1 Mise en œuvre de la méthode et représentation du cycle saisonnier.

Cette méthode consiste à identifier visuellement pour chaque pluviomètre et pour chaque année deux points d'inflexion de la courbe du cumul des précipitations journalières. Ainsi, le premier point est considéré comme le début de la saison de pluie, et le deuxième comme la fin de la saison des pluies ou le début de la saison sèche. Des travaux faites sur la distribution de la précipitation ont permis développer cette méthode [Figueroa et Nobre, 1990 ; Lebel, et al., 2003 ; Sousou, et al., 2004 ; Sanches, 2006 ; Balme, 2006]

La Fig.- IV.6 montre la pluie cumulée en moyenne de 19 ans (1992-2010) sur les quatre pluviomètres. Nous pouvons remarquer : l'installation de la saison des pluies (en noir), le cœur de la saison de pluie (en bleu) et la saison sèche (en gris) représentés par des droites de régression sur les moyennes sur 19 ans. Ces droites sont déterminées en considérant a priori trois saisons de quatre mois au cours de l'année.

Ainsi, la phase d'installation de la saison de pluie s'étend d'août à novembre, la saison de pluie démarre en décembre et finit en mars, et la saison sèche s'étend d'avril à juillet. Cette figure montre aussi les intensités moyennes de pluies pour chaque saison déduites des droites de régression. Cependant cette analyse est faite seulement sur les moyennes sur 19 ans, car il n'y a pas forcément un changement de saison tous les quatre mois pour toutes les années. C'est pourquoi dans l'analyse de chaque année individuelle, nous déterminons les points d'inflexion visuellement pour identifier les changements de saison. Cette méthode ne nécessite donc pas de fixer des seuils sur les intensités de pluie pour déterminer les date de démarrage et de fin de pluies (DDP et DFP).

Sur les moyennes, la phase d'installation de la saison de pluies est symbolisée par une intensité modérée de 0.56 mm/j en moyenne à Patacamaya, 1,05 mm/j à San Calixto, 1,35 mm/j à Plataforma et 4.0 mm/j à Harca. A partir du mois de décembre (jour 120), on note une forte augmentation des intensités moyennes journalières, qui peut correspondre au début de la saison de pluie. Les intensités moyennes en saison des pluies sont de 2,60 mm/j à Patacamaya, 3.7 mm/j à San Calixto, 5,03 mm/j à

Plataforma, et 10.7 mm/j à Harca. Finalement, la saison sèche est caractérisée par un affaiblissement notable de la pluie. Cette phase montre les intensités les plus faibles de l'année, de l'ordre de 0.2 mm/j à Patacamaya, de l'ordre de 0.35 mm/j à San Calixto et Plataforma, et de l'ordre de 2,1 mm/j à Harca.

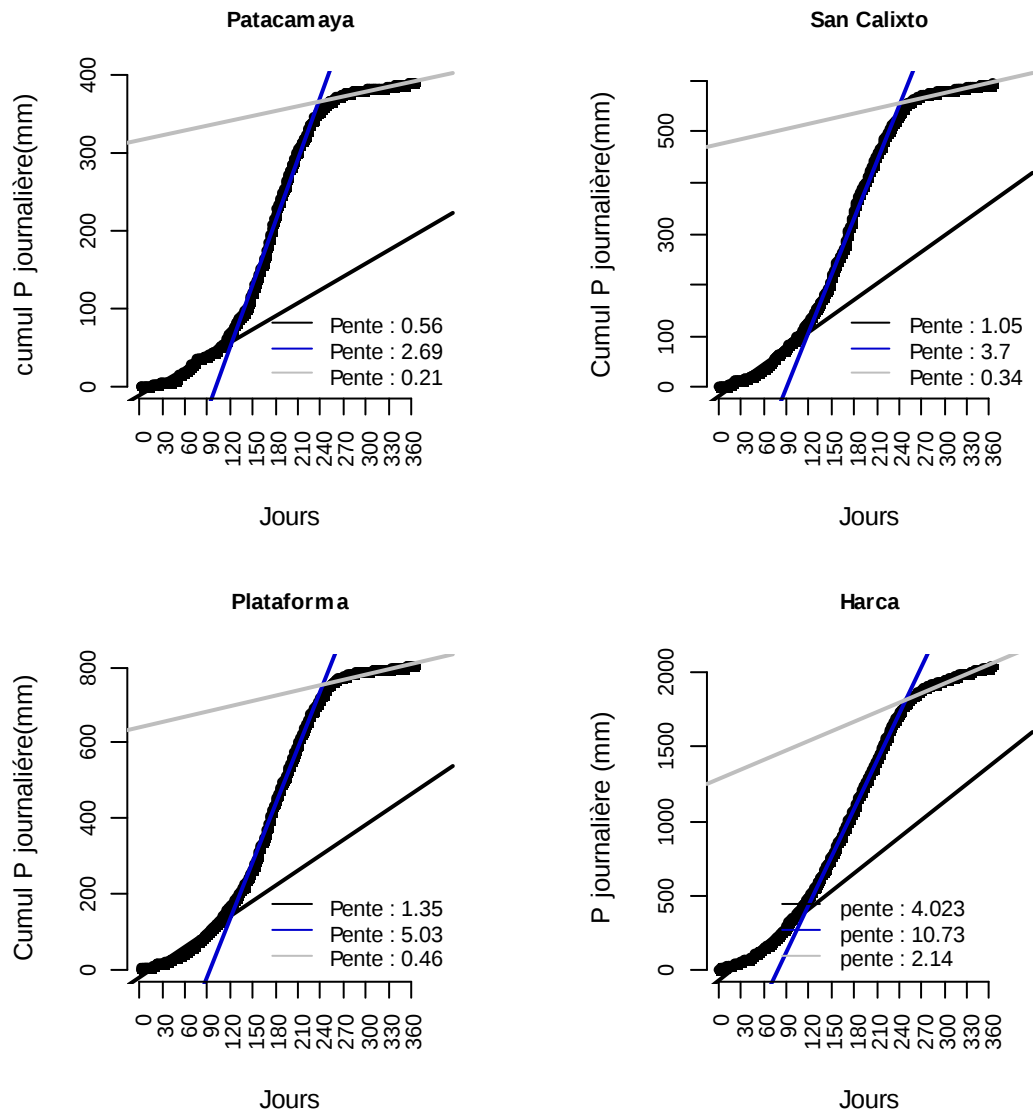


Figure IV 6.- Cumuls moyens des pluies sur 19 ans (1992-2010) pour les 4 stations. En abscisses les jours de l'année hydrologique qui commence le 1 août et en ordonnées la pluie cumulée. Les lignes représentent les pentes de régressions linéaires sur trois périodes : Installation de la saison des pluies en noir (entre les jours 0 et 120 : 1 août et 28 novembre), la saison des pluies en bleu (entre les jours 120 et 240 : 28 novembre – 27 mars) et la saison sèche en gris (entre les jours 240 et 365 : 27 mars- 31 juillet)

IV.2.2.2 Identification de la date de démarrage des pluies (DDP)

Les dates de démarrage des pluies (DDP) sont présentées dans les histogrammes de la Fig. IV.7. Les résultats indiquent qu'à Patacamaya la DDP tombe 9 ans sur 19 entre les jours 140 (18 décembre) et 160 (7 janvier).

Pour 5 ans, la DDP intervient entre les jours 120 et 140 (28 novembre – 18 décembre) et pour 4 ans entre les jours 100 et 120 (8 novembre - 28 novembre). San Calixto présente une concentration de la DDP (10 ans) entre les jours 120 et 140 (28 novembre - 18 décembre), et pour 6 ans entre les jours 140 et 160 (28 novembre - 7 janvier). La répartition est similaire à Plataforma où pendant 9 ans la DDP est située entre les jours 120 et 140, et pour 6 ans entre les jours 140 et 160. Finalement, Harca montre que durant 6 ans la DDP est située entre les jours 100 et 120 et pour 5 ans entre les jours 80 et 100, en indiquant une DDP plus précoce dans la vallée du Zongo que sur l'Altiplano. Cette station montre la variabilité interannuelle la plus forte des quatre pluviomètres avec une DDP qui varie entre les jours 80 et 160 (19 octobre – 7 janvier).

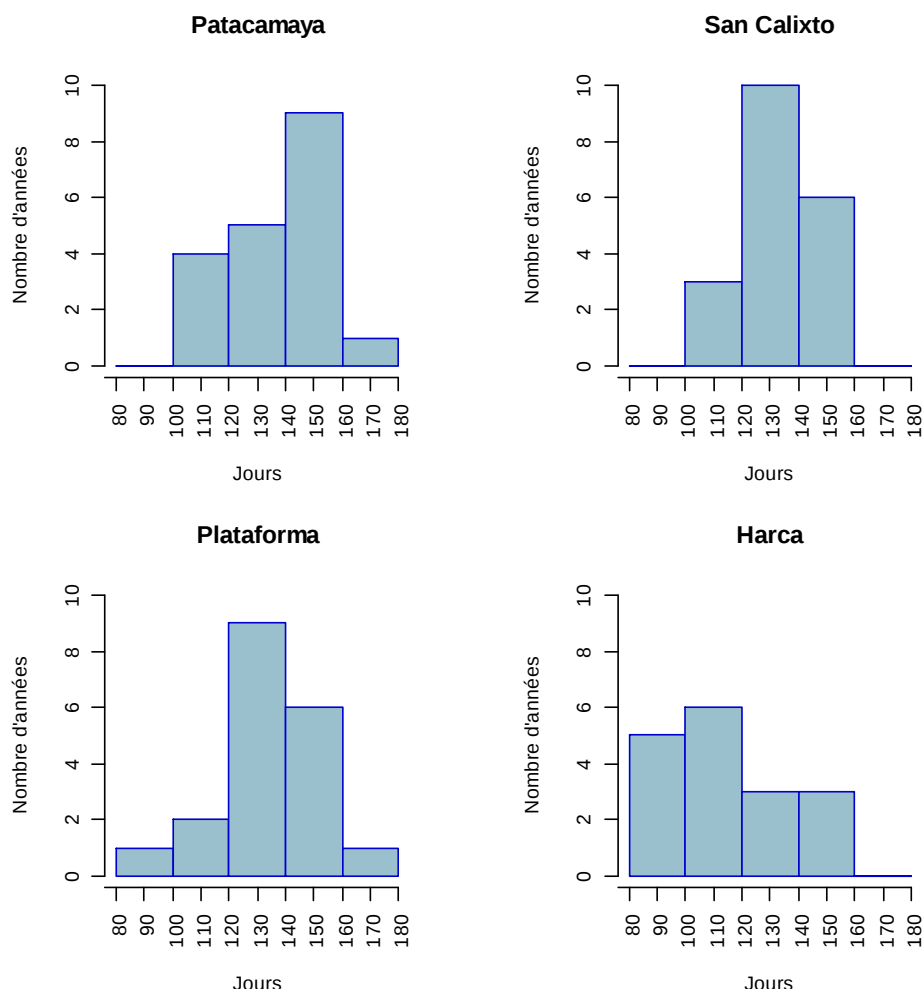


Figure IV 7.- Histogrammes de la date de démarrage des pluies à Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca (sans 1996,1997) selon la méthode PIC. En abscisse le numéro de jours en débutant le 1 août : le numéro 80 est le 15 octobre et le 180 est le 27 janvier. En ordonnée le nombre d'années

Selon la méthode, Patacamaya, San Calixto et Plataforma présentent une DDP plutôt concentrée entre les jours 120 et 160 (28 décembre et 7 janvier). Par contre à Harca, les DDP sont plus précoces et beaucoup moins concentrées ; s'étendant entre les jours 80 et 120. Une analyse plus détaillée

de la variabilité interannuelle de la DDP en comparaison avec les différentes méthodes est faite dans la section IV.2.2.5

IV.2.2.3 Identification de la date de fin de la saison des pluies (DFP)

Les résultats des DFP obtenues selon cette méthode sont présentés dans la Fig. IV.-8. A Patacamaya et San Calixto pour 80% des années la DFP est plutôt concentrée entre les jours 240 (27 mars) et 280 (6 mai). A Plataforma, la DFP est très concentrée entre les jours 260 et 280 (16 avril- 6 mai), avec la plus faible variabilité interannuelle de toutes les stations. A Harca, pour 8 années les DFP sont situées entre les jours 260- 280 (16 avril et 6mai), et pour 5 ans entre les jours 240 et 260 (27 mars- 16 avril). Ainsi à Harca, la DFP est légèrement plus tôt qu'aux autres stations mais la distribution est assez similaire qu'à Patacamaya et San Calixto.

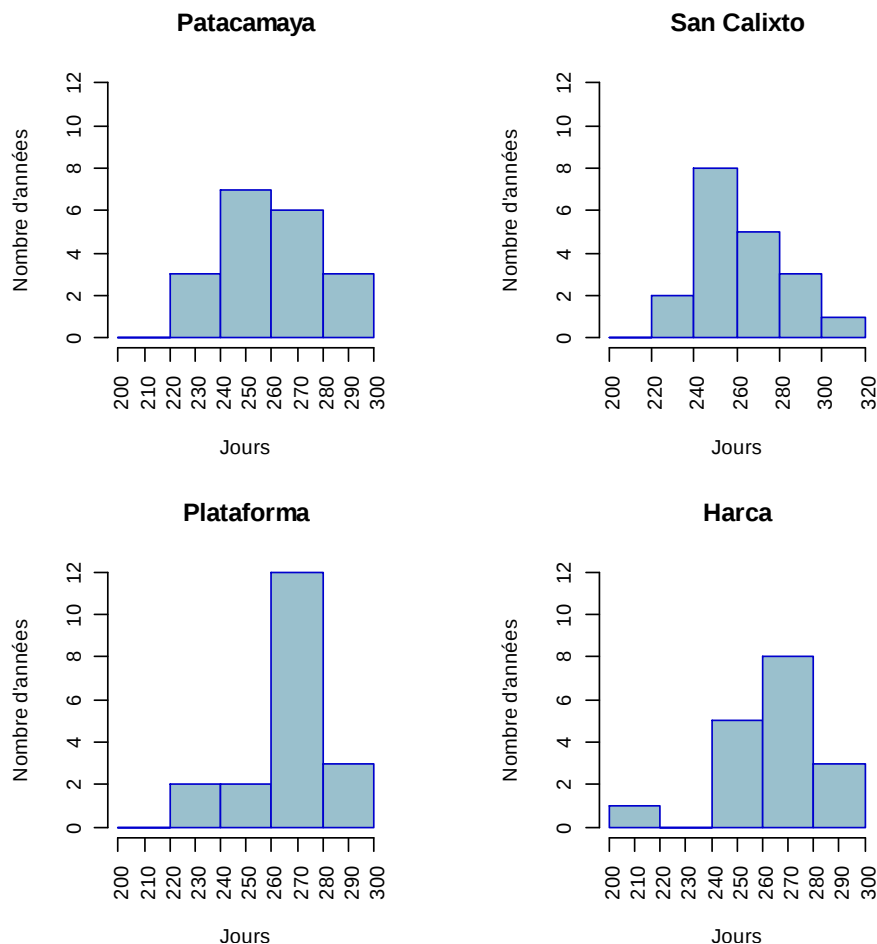


Figure IV 8.- Histogrammes de la date de démarrage des pluies à Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca (sans 1996,1997) selon la méthode PIC. En abscisse le numéro de jours en débutant le 1 août : le numéro 80 est le 15 octobre et le 180 est le 27 janvier. En ordonnée le nombre d'années

Patacamaya et San Calixto est plutôt concentrée entre les jours 240 et 260 (27 mars – 16 avril), cependant les histogrammes montrent une forte

variabilité interannuelle. Plataforma présente une DFP très concentrée entre les jours 260 et 280 (16 avril et 6 mai). Harca montre une DFP située entre les jours 260 et 280, comme à Plataforma mais avec une variabilité plus forte.

La distribution dans les histogrammes indique la dispersion des années de la série. Nous voyons que Patacamaya et San Calixto présentent une distribution asymétrique vers la droite. C'est-à-dire que la majorité des années ont une DFP après le jour 240 (27 mars). A Harca, la distribution de DFP est asymétrique vers la gauche, impliquant une DFP en général avant le jour 280 (6 mai).

IV.2.2.4 Durée de la saison des pluies

La Fig. IV.-9 montre la durée de la saison des pluies pour chaque pluviomètre représentée en boîtes à moustache. Les durées obtenues sont un peu plus longues à Harca que sur l'Altiplano mais restent similaires pour toutes les stations (entre 3.5 et 5 mois). Selon cette méthode Patacamaya présente une durée de saison des pluies concentrée entre 105 et 130 jours, avec une médiane de 110 jours. L'année 1992 a la durée la plus courte de toute la période (72 jours) et 2010 la plus longue (160 jours). De plus, la boîte à moustache révèle deux points extrêmes à Patacamaya : l'année 2003 (178 jours) et 2010 (190 jours).

San Calixto et Plataforma montrent des tailles de boîte similaires (limites entre Q1 et Q3), avec une durée comprise entre 80 et 150 jours. La plus courte durée à San Calixto et Plataforma est l'année 1992 (75 jours), qui coïncide avec Patacamaya. La plus longue durée est pour l'année 1995 à San Calixto et pour l'année 2000 à Plataforma (165 jours et 163, respectivement).

Harca montre en général une durée de saison des pluies plutôt concentrée entre 115 et 160 jours avec une médiane de 145 jours. L'année 1994 présente la durée de la saison des pluies la plus longue de la série : 190 jours, due à une DDP très précoce. L'année 1995 présente la plus courte durée, seulement 92 jours, causée par une DDP très tardive.

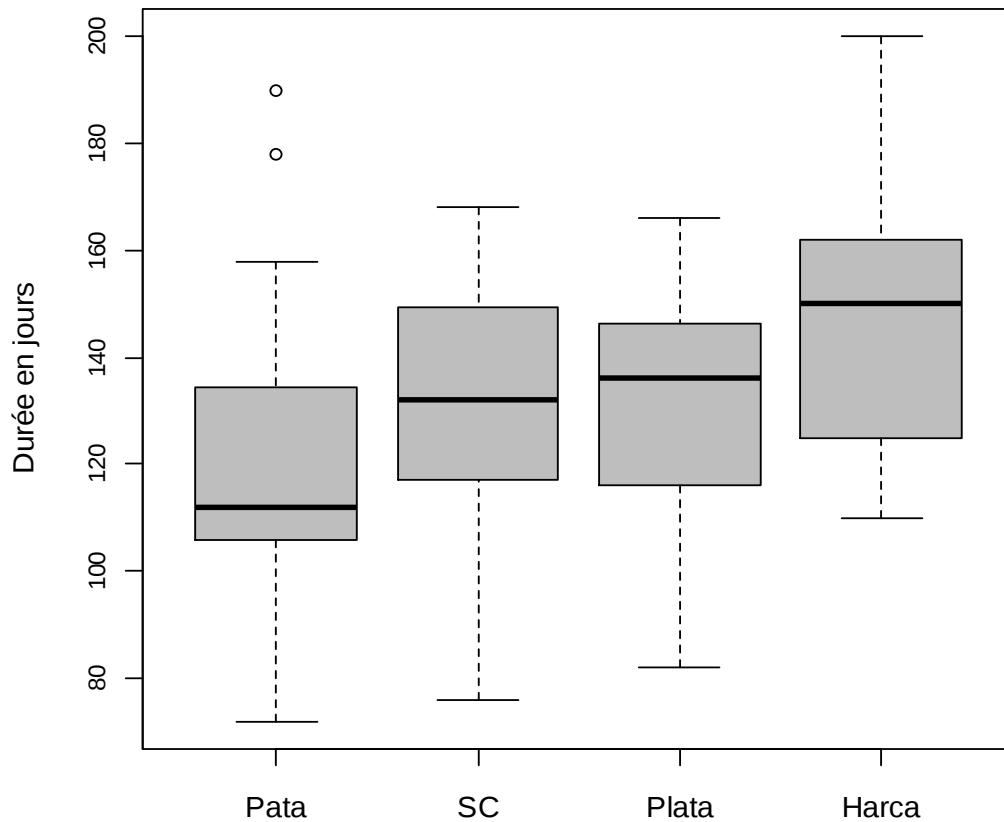


Figure IV 9.- Boîtes à moustache de la durée interannuelle de la saison des pluies (1992-2010) pour Patacamaya (Pata), San Calixto (SC), Plataforma (Pla) et Harca (à l'exception des années 1996 et 1997) obtenues selon la méthode « PIC ». La ligne noire indique la médiane (quantile 0.5), la boîte s'étendant du quartile 0.25 au quartile 0.75, et les moustaches s'étendent jusqu'à la valeur distante d'au maximum 1.5 fois la distance interquartile. Les valeurs extrêmes ou « outliers » sont représentées par de petits cercles. En ordonnées la durée de la saison des pluies en jours

A la différence de la méthode des Pentades, celle-ci montre que la durée de la saison de pluies est semblable sur les quatre pluviomètres. C'est-à-dire que la durée de l'Altiplano présente une longueur similaire à celle de Harca. Plus précisément, la durée de la saison de pluies est concentrée entre 110 et 150 jours (soient 3-5 mois) à Patacamaya, San Calixto et Plataforma, et entre 120 et 160 jours à Harca (soient 4 – 5 mois).

IV.2.2.5 Synthèse de la méthode

Cette méthode a permis d'identifier les dates de démarrage et de fin de la saison des pluies à partir du cumul des précipitations journalières pour chaque année. La principale caractéristique est que cette méthode ne nécessite pas de seuils sur les intensités pour déterminer la DDP et la DFP.

Elle repose sur une inspection visuelle (qualitative) des cumuls de chaque année.

La relation DDP-Durée présente des coefficients de détermination plus faibles par rapport à la relation DFP-Durée, sauf à Harca où la corrélation entre la DDP et la Durée est plus forte (*Tableau IV.4*). A Patacamaya, San Calixto et Plataforma la DFP explique plus du 50% de la variance de la durée tandis que la DDP en explique moins du 40%. Néanmoins à Harca, la DDP explique mieux la variance de la Durée (52%) que la DFP (30%).

Ces coefficients augmentent depuis l'Altiplano, représenté par Patacamaya vers la vallée de Zongo (Harca). En revanche, la relation DFP-Durée présente une augmentation de la vallée du Zongo vers l'Altiplano. Donc, selon cette méthode la durée de la saison semble plus contrôlée par la DDP dans la vallée du Zongo (Harca), et plus contrôlée par la DFP sur l'Altiplano.

Finalement nous notons que sur les quatre pluviomètres la DDP et la DFP sont très peu corrélées entre elles ($r^2 < 0.03$), comme pour la méthode des Pentades.

Tableau IV.- 4.- Coefficients de détermination (r^2) entre la durée de la saison des pluies et la Date de démarrage des pluies (DDP) et la date de la fin de saison des pluies (DFP). En Italique les valeurs qui ne sont pas significatifs a un niveau de 95%.

r^2	DDP-Durée	DFP - Durée	DDP-DFP
Patacamaya	0,21	0,71	0,01
SC	0,23	0,69	0,01
Plataforma	0,40	0,55	0,01
Harca	0,52	0,32	0,03

En moyenne sur 19 ans, le cœur de la saison des pluies selon cette méthode se met en place d'abord à Harca (jour 118 : 26 novembre) puis atteint San Calixto et Plataforma (jour 134: 12 décembre) et finalement Patacamaya (jour 138 : 16 décembre) (*Tableau IV.5*). En revanche, la fin de la saison des pluies semble se mettre en place d'abord à Patacamaya (jour 241 : 28 mars), puis à San Calixto et Plataforma vers le jour 260 (16 avril) et environ 8 jours après à Harca (jour 268 : 24 avril). Cette évolution de la saison des pluies de la vallée du Zongo vers l'Altiplano puis son reflux d'abord sur l'Altiplano paraît cohérente avec le trajet des masses d'air humides provenant de l'est.

Les écarts types de la DDP sont inférieurs à ceux de la DFP, expliquant pourquoi la durée ($D = DDP - DFP$) est surtout contrôlée par la DFP. Les écarts type de la DDP tendent par ailleurs à être plus faibles que ceux calculés pour la méthode des pentades si on ramène ces derniers en nombre de jours. A la différence des autres pluviomètres, Harca présente des écarts types plus forts sur la DDP que ceux de la DFP, ainsi une durée plus contrôlée par la DDP.

Tableau IV.- 5.- Moyennes et écart types représentés en jours, de la date de démarrage des pluies (DDP) et la date de fin de saison (DFP) selon la méthode PIC sur la moyenne sur 19 ans (1992-2010).

	DDP		DFP	
Pluviomètre	Moyenne (jours)	Ecart Type (jours)	Moyenne (jours)	Ecart type (jours)
Patacamaya	138	15,20	241	25,30
SC	132	14,60	262	23,10
Plataforma	134	18,80	265	18,60
Harca	118	22,20	268	18,50

Cette méthode montre que sur l'Altiplano et Plataforma, la DFP explique mieux la variabilité de la durée de la saison de pluies que la DDP. C'est un résultat différent de la méthode de Pentades, qui montre une durée largement contrôlée par la DDP.

Cette tendance peut être liée à des artefacts de la méthode. Sur l'Altiplano l'identification visuelle de la DFP est plus difficile que pour la DDP, en raison d'un démarrage souvent assez progressif de la saison sèche. Cette difficulté peut entraîner une surestimation de la variabilité inter-annuelle de la DFP, impliquant un contrôle artificiel de la durée par la DFP (tableaux IV.4 et IV.5). En revanche à Harca la DFP est généralement plus facilement identifiable que sur l'Altiplano, participant sans doute à une variabilité interannuelle de la DFP plus faible que la DDP. Ainsi les durées de saison des pluies déterminées par cette méthode sont sans doute peu fiables pour l'Altiplano et Plataforma, cependant cette méthode peut bien marcher sur les stations comme Harca où l'installation de la saison sèche est plus marquée.

IV.2.3 Méthode du Nombre de Jours Pluvieux (NJP)

Cette méthode examine le Nombre de Jours Pluvieux (NJP) supérieurs à 1 mm/j sur une fenêtre glissante de 21 jours, ce qui permet de lisser le bruit du signal journalier. L'idée de développer cette méthode vient de la forte relation observée au Chapitre III entre la précipitation annuelle et le nombre de jours pluvieux dans l'année.

IV.2.3.1 Cycle saisonnier caractérisé par la méthode de nombre de jours pluvieux

La Fig. IV.10 montre le cycle saisonnier moyen aux quatre stations selon cette méthode avec les trois phases déjà décrites dans le chapitre III : Installation de la saison des pluies, cœur de la saison des pluies et saison sèche. A Patacamaya et San Calixto, l'installation de la saison des pluies démarre au mois d'août et dure généralement jusqu'en décembre (jour 120 : 28 novembre). Ensuite, une forte augmentation du nombre de jours de pluie révèle le début du cœur de la saison des pluies qui s'étend jusqu'à environ la fin de mois d'avril environ (jour 270 : 26 avril). Une situation similaire se

produit à Plataforma, cependant le début du cœur de la saison des pluies est moins visible. Harca présente une installation progressive depuis le mois d'août jusqu'au maximum vers le jour 150 (28 décembre). Cette installation est plus progressive qu'à la Plataforma dont résulte un cœur de saison de pluie moins visible par rapport aux autres pluviomètres. La fin de la saison des pluies est marquée par une forte diminution du nombre de jours de pluies à partir de fin avril environ.

De plus, il est très intéressant de voir que la rupture dans la montée du nombre de jours, concomitante à toutes les stations et déjà remarquée au chapitre III, est encore bien identifiable malgré le lissage à 21 jours ; cela confirme que c'est un signal climatique fort.

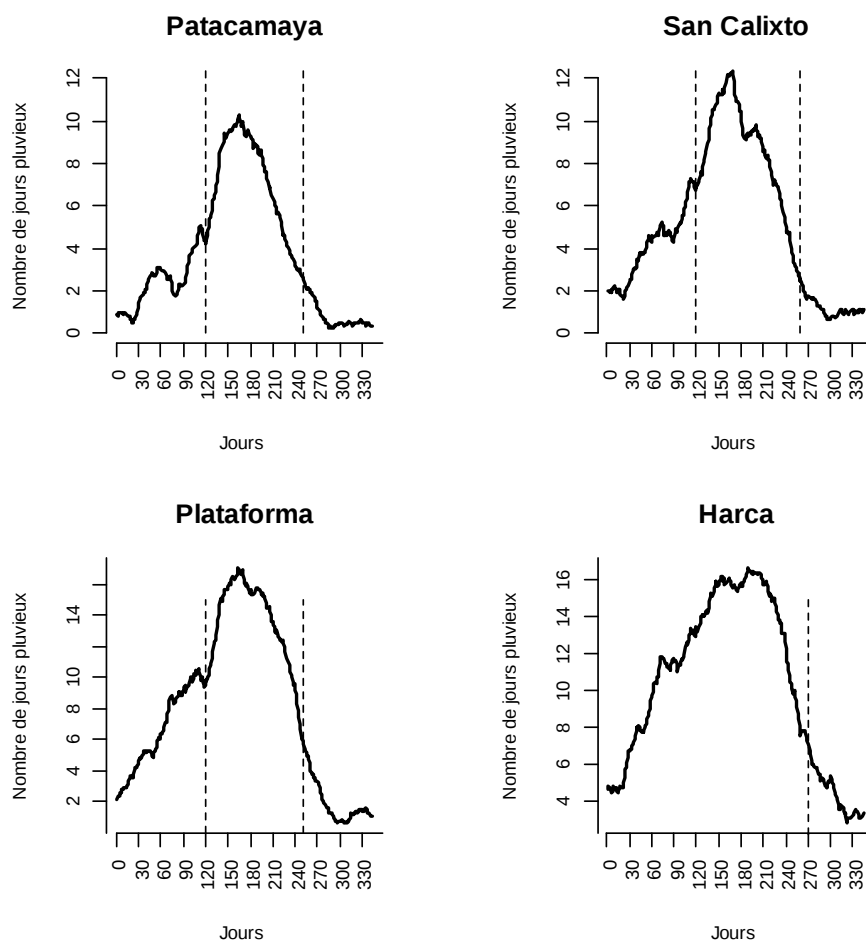


Figure IV 10.- Cycles saisonniers sur la moyenne de 19 ans (1992-2010) du nombre de jours pluvieux (NJP) calculés à partir d'un seuil de 1 mm/j sur une fenêtre glissante de 21 jours. Les lignes pointillées indiquent la séparation entre la phase d'installation, le cœur de la saison de pluie et la saison sèche (déterminées visuellement à titre indicatif). A Harca il n'est pas possible d'identifier clairement la DDP, c'est pourquoi la première ligne en pointillée a été omise.

IV.2.3.2 Seuils et critères pour déterminer la durée de la saison de pluie

Avec cette méthode nous pouvons obtenir une série lissée de données sur toutes les années. Pour identifier les DDP et DFP nous appliquons des seuils et critères similaires à la méthode de Pentades. Ces seuils sont obtenus visuellement depuis le cycle saisonnier de la moyenne de 19 ans de chaque pluviomètre (Fig. IV.-10).

Nous avons observé dans la méthode de Pentades que les seuils pour déterminer la DDP et la DFP augmentent de Patacamaya vers la vallée du Zongo, dû à de plus fortes intensités et fréquences de la pluie dans la vallée du Zongo par rapport à l'Altiplano (Voir annexe 4 pour le test de sensibilité de seuils). De même ici nous ne pouvons pas utiliser le même seuil pour tous les pluviomètres. Par exemple à Patacamaya et San Calixto, une augmentation de 1 NJP sur un seuil de 7 ou 8 NJP provoque une variation de la DDP de 6 jours et une variation de 2 jours de la DFP. Cependant à Plataforma et Harca, une variation de 1 NJP de ces seuils fait déplacer la DDP et la DFP de seulement 1 et 2 jours respectivement. Mais, si nous utilisons un seuil de 13 NJP à Patacamaya et San calixto, une augmentation ou diminution de seuil de 1 NJP cause une variation de la DDP de 8 jours, et de 2 jours de la DFP. Avec ce seuil de 13 NJP, Plataforma et Harca montrent une variation de 5 et 8 jours sur la DDP et 2 et 3 sur la DFP suite à une variation de seuil de 1 NJP. Les seuils présentés dans le tableau IV.6 sont le résultat de plusieurs tests de sensibilité afin d'identifier un seuil qui soit le plus représentatif pour le climat local. En plus, nous avons noté que l'installation de la saison sèche est plus progressive que le démarrage de la saison des pluies, ce qui fait que la DFP est moins sensible aux seuils que la DDP.

Tableau IV.- 6.- Seuils pour déterminer le démarrage (DDP) et la fin (DFP) de la saison de pluies, avec la méthode de NJP (Nombre de jours pluvieux). Données obtenues à partir de la moyenne de 19 ans.

Seuil	Seuil 1 DDP(NJP)	Seuil 2 DFP(NJP)
Patacamaya	7	4
SC	8	4
Plataforma	13	5
Harca	14	6

Associés aux seuils pour déterminer la DDP et la DFP, il faut déterminer des critères qui puissent diminuer la variabilité interannuelle de ces deux variables. Pour cette méthode, nous prenons comme critère que la saison de pluie démarre quand la première valeur de NJP sur une fenêtre glissante de 21 jours remplit la condition suivante : au moins 15 NJP sur 20 dépassent les seuils définis dans le tableau IV.6. Par exemple à Patacamaya, la DDP sera définie lorsque 15 NJP sur 20 dépasseront 7 jours de pluies. La condition pour la DFP sera la première valeur qu'au moins 20 NJP sur 30 soient inférieurs aux seuils du tableau IV.6. Par exemple à Patacamaya, la DFP sera définie lorsque 20 NJP sur 30 sont inférieurs à 4 jours de pluies.

IV.2.3.3 Date de démarrage des pluies (DDP)

Les histogrammes présentent la variation interannuelle de la DDP selon cette méthode (Fig. IV.11). Patacamaya montre pour 6 années une DDP située entre le jour 100 et 120 (18 novembre - 8 décembre), 6 années entre le jour 120 et 140 (8 décembre - 28 décembre) et 4 entre les jours 80 et 100 (29 octobre - 18 novembre). A San Calixto la DDP est tombée entre les jours 120 et 140 (8 décembre - 28 décembre) durant 6 ans ce qui représente seulement 31% du total des années. Durant 5 ans (26%) la saison des pluies débute entre le jour 100 et 120 (18 novembre - 8 décembre), 4 ans entre les jours 80 et 100 et finalement 4 ans entre les jours 140 et 160 (28 décembre-17 janvier). Plataforma montre que durant 12 ans sur 19 (63%) la DDP est située entre les jours 120 et 140. Ce pluviomètre montre la variabilité interannuelle la moins forte de toutes les stations. Finalement, Harca montre une DDP concentrée (6 ans) entre les jours 60 et 80 (9 octobre – 29 octobre), et 4 ans entre les jours 40 et 60 (19 septembre et 9 octobre).

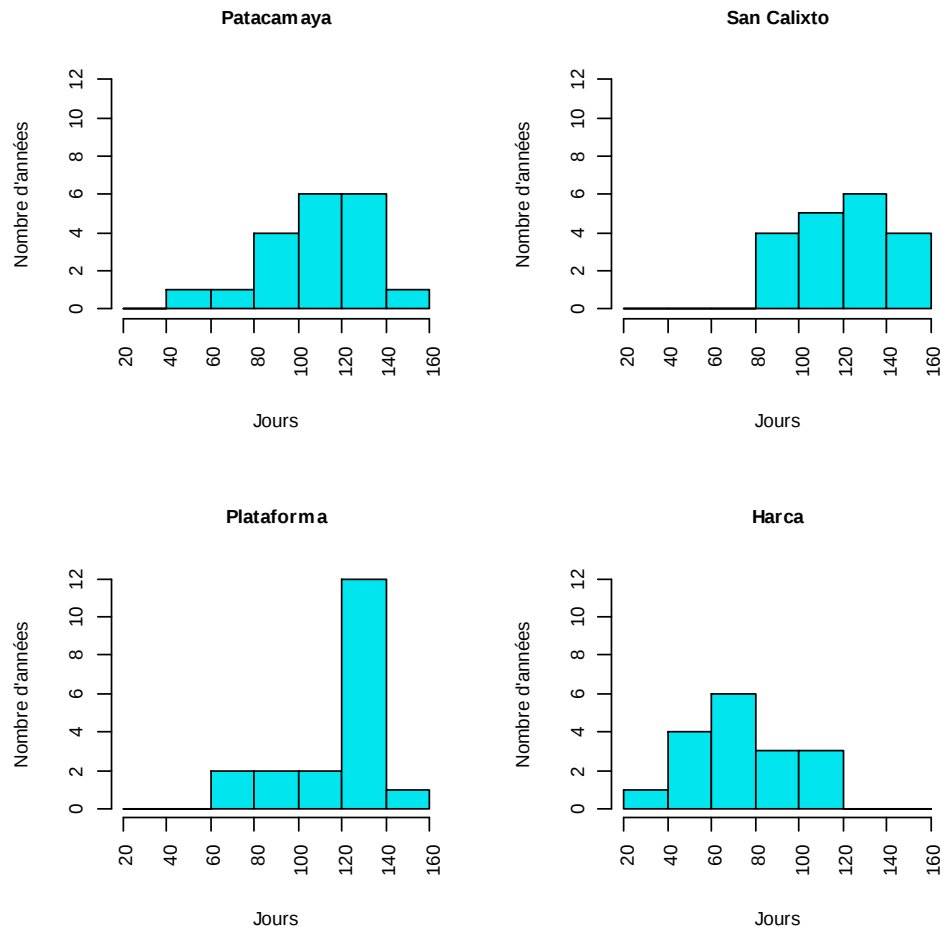


Figure IV 11.- Histogrammes de la date de démarrage des pluies à Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca (sans 1996 et 1997) selon la méthode de NJP. En abscisse la date exprimée en jours : jour 20 : 20 août et 160 : 7 janvier. Début de l'année hydrologique le 11 août.

Cette méthode montre une forte variabilité interannuelle de la DDP à Patacamaya, San Calixto et Harca. Les deux premiers pluviomètres montrent

que la DDP est située plutôt entre les jours 100 et 140 (8 novembre et 18 décembre), et à Harca entre les jours 40 et 80 (9 septembre -19 octobre). A Plataforma, la variabilité interannuelle est beaucoup plus faible par rapport aux autres pluviomètres. La plus forte concentration de la DDP est entre les jours 120 et 140 (28 novembre et 18 décembre).

IV.2.3.4 Date de fin de saison des pluies (DFP)

Une forte variabilité interannuelle de la DFP est visible sur les quatre pluviomètres (Fig. IV.-12). Patacamaya montre que pour 9 années sur 19 la DFP est située entre les jours 200 et 220 (16 février et 7 mars), 4 ans entre les jours 220-240 (7mars- 27 mars) et 4 ans entre les jours 240 - 260 (27 mars- 16 avril). San Calixto, présente la variabilité interannuelle la plus faible de tous les pluviomètres. Durant 10 ans la DFP tombe entre les jours 220 et 240 (7 mars et 27 mars), et durant 6 ans entre les jours 240-260 (27 mars - 16 avril). A Plataforma la plus forte concentration de la DFP (12 ans) est entre les jours 220 et 240 (7 mars –27 mars), durant 4 ans la DFP est située entre les jours 240 – 260 (27mars – 16 avril). A Harca, la DFP est concentrée entre les jours 240 et 280 (27 mars- 6mai), donc avec une forte variabilité interannuelle.

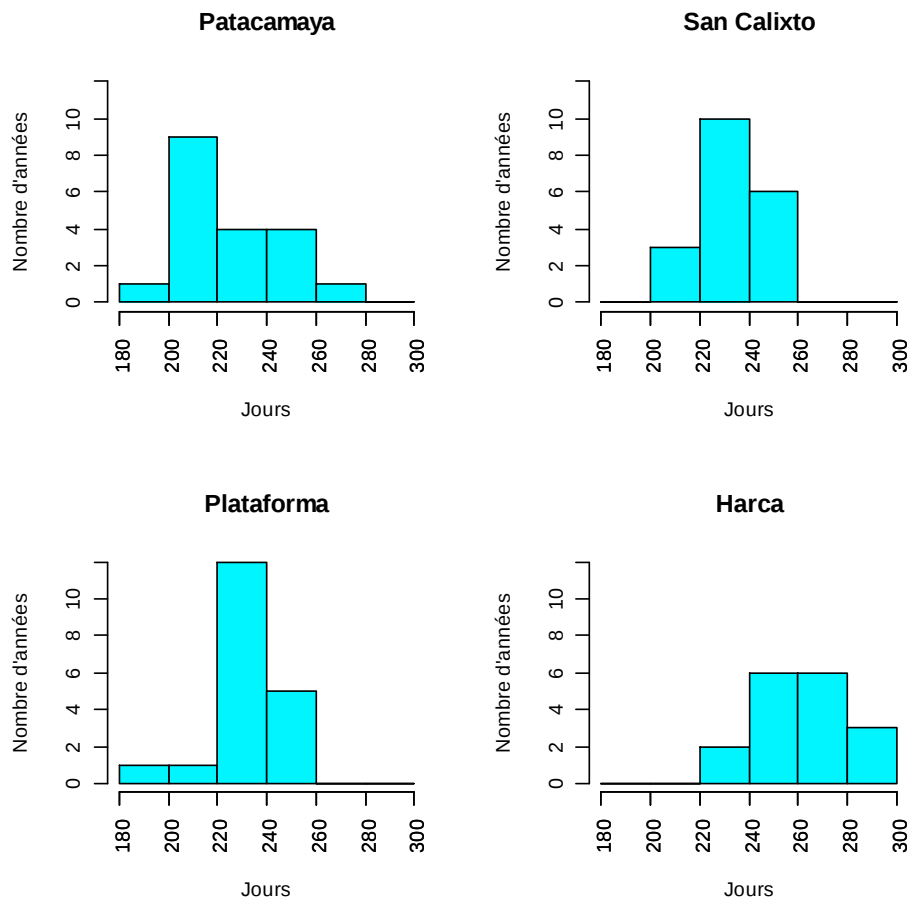


Figure IV 12.- - Histogrammes de la date de fin de saison des pluies (DFP) selon la méthode NJP, sur une période de 19 années (1992-2010) de Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca (sans 1996 et 1997). En abscisse la date exprimée en numéro de jours : 180 : 6 février, 300 : 5 juin. Début de l'année hydrologique le 11 août

Cette méthode montre que la DFP à Patacamaya est concentrée entre les jours 200 et 220 (7mars- 27 mars) et un début de la saison sèche plus précoce que pour les autres stations. San Calixto montre la plus faible variabilité interannuelle, car durant 16 années sur 19 la DFP est située entre les jours 220 -260 (7mars – 16 avril). Plataforma présente la plus faible variabilité interannuelle des quatre pluviomètres, en ayant une concentration de 12 ans entre les jours 220 et 240 (7 mars – 27 mars). Harca présente une forte variabilité interannuelle ce qui empêche de dire que la DFP converge vers un jour spécifique.

Finalement, la distribution des histogrammes à San Calixto, Plataforma et Harca, montrent que pour 90% des années la DFP est située après le jour 220 (7 mars) et peut aller jusqu'au jour 280 à San Calixto et Plataforma (6 mai) et 300 à Harca (26 mai).

IV.2.3.5 Durée de la saison des pluies

La durée de la saison des pluies est représentée par des boîtes à moustaches pour chaque pluviomètre (Fig. IV.13). Nous voyons qu'à Patacamaya pour 50% des années (10), la durée de la saison des pluies a une longueur comprise entre 90 et 140 jours. L'année 2007 est représentée comme celle ayant la plus longue durée de la saison des pluies (190 jours) et l'année 1996 représente la durée la plus courte (50 jours). Les limites Q1 et Q3 à San Calixto, révèlent que pendant 10 ans la durée est concentrée entre 90 et 120 jours. La valeur maximum est représentée par l'année 1993 (163 jours) et la minimum par l'année 1992 (75 jours). Plataforma montre que sur 75% des années (valeurs au-dessus de Q1 jusqu'à maxima), la durée est plus longue que celle de Patacamaya et San Calixto. En regardant les limites de cette boîte Plataforma a une concentration des années plutôt entre 110 et 130 jours. L'année 2006 présente la durée la plus longue de 19 ans (138 jours) – excepté pour les années 1994 et 2007 d'une durée exceptionnelle de 171 et 180 jours respectivement– et l'année 2010 la plus courte (53 jours). La taille de la boîte nous montre que San Calixto et Plataforma ont la variabilité la moins forte des quatre pluviomètres. Harca présente les durées plus longues de la saison des pluies ; comprises entre 170 et 220 jours. La barre maxima représente l'année 1998 (235 jours) et la barre minima représente l'année 2004 (152 jours).

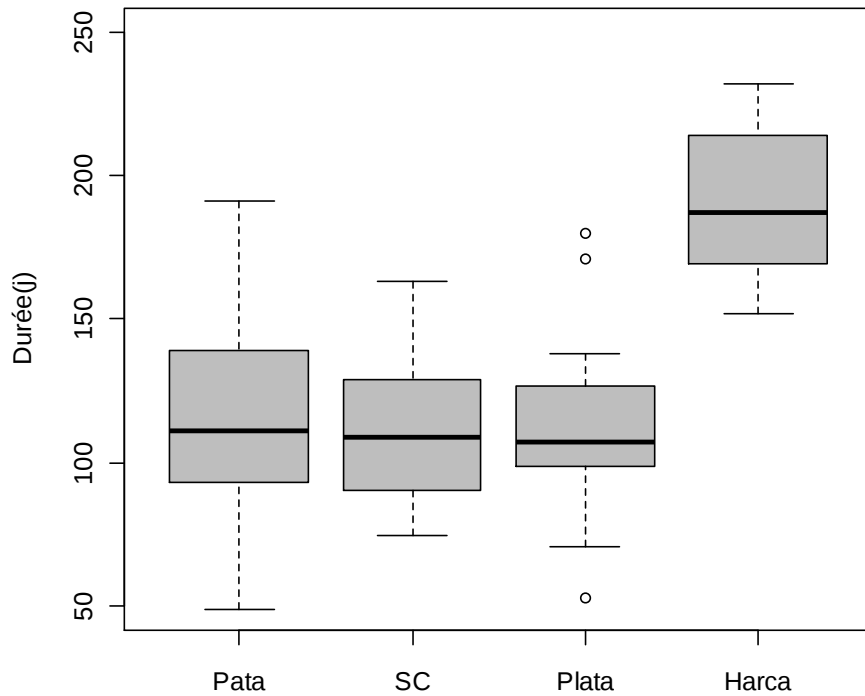


Figure IV 13.- Boîtes à moustache de la durée de la saison des pluies (1992-2010) pour Patacamaya (Pata), San Calixto (SC), Plataforma (Pla) et Harca (à l'exception des années 1996 et 1997) obtenues selon la méthode « NJP ». La ligne en noire indique la médiane, les limites de valeurs minimums (barre en bas déterminées par $Q1 - 1.5 \cdot (Q3 - Q1)$) et de valeurs maximums (barres en haut, déterminées à partir $Q3 + 1.5 \cdot (Q3 - Q1)$), les quantiles Q1 (0.25), Q2 (0.5), et Q3 (0.75), et finalement les valeurs extrêmes ou « outliers » représentées par des cercles. En ordonnées la durée de la saison des pluies en jours

En résumé, nous voyons que les boîtes de Patacamaya, San calixto et Plataforma présentent une taille similaire, c'est-à-dire une durée de saison des pluies proches (soit 3 et 5 mois). Par contre la durée pour Harca est plus longue que celle des autres pluviomètres (soit 6 à 7 mois). Ceci s'observe aussi avec la méthode des Pentades, mais avec une durée comprise entre 4 et 5 mois. En plus nous pouvons dire que Patacamaya et Harca ont une plus forte variabilité de la durée que San Calixto et Plataforma, causée par la forte fluctuation interannuelle de la DFP (Harca) et de la DDP (Patacamaya).

IV.2.3.6 Synthèse de la méthode

Afin de vérifier si la durée de la saison des pluies dépend plutôt de la DDP ou DFP, le tableau IV.7 montre les coefficients de détermination entre la Durée- DDP, Durée-DFP, et DDP-DFP.

Cette méthode montre qu'à Patacamaya tant la DDP que la DFP présentent des corrélations significatives avec la durée ($r^2 > 0.7$). Ces deux variables peuvent expliquer plus de 70% de la variabilité interannuelle de la

durée de la saison des pluies sur ce pluviomètre. Les pluviomètres San Calixto, Plataforma et Harca révèlent une durée largement contrôlée par la DDP. Cette variable contrôle plus de 70% de la variance à San Calixto et Plataforma, et plus de 60% à Harca.

A San Calixto, Plataforma et Harca la DFP explique moins de 50% de la variabilité de la durée de la saison de pluie, tandis qu'à Patacamaya la DFP exprime 71% de cette variabilité.

Pour finir, selon cette méthode il n'existe pas de relation significative entre la DDP et la DFP résultat similaire aux autres méthodes ; seule la station de Patacamaya présente une faible liaison entre ces deux variables, un fait qu'on n'observait pour aucune des deux méthodes précédentes.

Tableau IV.- 7.- Coefficient de détermination entre la durée avec la date de démarrage des pluies (DDP) et avec la date de fin de saison des pluies (DFP). Coefficient de détermination entre la DDP- DFP. En Italique les valeurs qui ne sont pas significatifs a un niveau de 95%.

R ²	DDP- Durée	DFP-Durée	DDP-DFP
Patacamaya	0,75	0,71	<i>0,22</i>
SC	0,74	0,42	<i>0,03</i>
Plataforma	0,71	0,50	<i>0,06</i>
Harca	0,61	0,21	<i>0,04</i>

Une analyse interannuelle sur la moyenne, les écarts types et les coefficients de variation de la DDP et la DFP est faite, afin de vérifier sa variabilité interannuelle par rapport à la moyenne (Tableau IV.8).

Nous voyons que le cœur de la saison de pluies se met en place d'abord à Harca (jour 79 : 2 novembre), et après 15 jours atteint le pluviomètre de Plataforma (jours 106 : 23 novembre). Patacamaya et San Calixto présentent un début de saison presque 30 jours après d'Harca ; jour 125 (13 décembre). En considérant que pour la zone d'étude, la source d'humidité est située à l'est, il est assez logique d'observer un démarrage de la saison des pluies plus tardif sur l'Altiplano que dans la vallée du Zongo. A propos de la DFP nous voyons qu'en moyenne Patacamaya, San Calixto et Plataforma ont une DFP plus précoce (jour 227 : 24 mars, 235 : 1 avril, et 236 : 2 avril respectivement) qu'à Harca (jour 255 : 25 avril) en environ 20 jours.

Les écarts types montrent qu'à Patacamaya et Harca la DDP et DFP présentent une variabilité interannuelle similaire (écart types proches). Par contre, à San Calixto et Plataforma la DDP présente des écarts-types notablement supérieurs à ceux de la DFP.

Tableau IV.- 8.- Moyennes et écarts annuelles de la date de démarrage des pluies (DDP) et la date de fin de saison (DFP) selon la méthode NJP (21 jours) pour chaque pluviomètre.

Pluviomètres	DDP		DFP	
	Moyenne (jours)	Ecart type (jours)	Moyenne (jours)	Ecart type (jours)
Patacamaya	125	22,58	227	21,00
San Calixto	124	19,48	235	13,20
Plataforma	106	60,80	236	16,87
Harca	79	29,24	255	24,46

Cette méthode est basée sur le nombre de jours pluvieux sur une fenêtre glissante de 21 jours qui permet de faire un lissage des données plus fine. La taille de cette fenêtre fait varier ce lissage, si nous prenons une fenêtre de 7 jours nous pourrions sélectionner plus d'événements, mais nous aurons une forte variabilité. Cela peut changer la DDP ou la DFP à partir d'un seul événement pluvieux, qui ne marque pas forcément le début ou fin de la saison. Le seuil de 1 mm pour déterminer le NJP, permet de prendre en compte plus de 60% de la pluie annuelle sur les quatre stations, ce qui n'aurait pas été possible avec un seuil de 2 ou 5mm.

Dans leurs grandes lignes les résultats obtenus sont conformes à la climatologie, avec une DDP plus précoce dans la vallée du Zongo (représenté par Harca) que sur l'Altiplano (représenté plutôt par Patacamaya) et une DFP se produisant plus tôt sur l'Altiplano que dans la vallée du Zongo. Les résultats montrent une durée de saison des pluies similaires entre les pluviomètres de l'Altiplano et Plataforma (3-5 mois), alors que dans la vallée du Zongo cette durée est plus longue (5-6mois).

IV.2.4 Méthode du nombre de jours pluvieux consécutifs

IV.2.4.1 Mise en œuvre de la méthode ; caractérisation du cycle saisonnier

Cette méthode est basée sur le calcul du nombre moyen de jours pluvieux consécutifs sur une fenêtre glissante de 21 jours, selon la formule suivante :

$$I_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n NJPc(i) \quad (\text{Eq. IV.-2})$$

Avec :

I_j : Indice de nombre de jour pluvieux consécutifs en moyenne sur la fenêtre glissante 'j' de 21 jours

n : nombre total d'événements pluvieux sur la fenêtre glissante de 21 jours (chaque période de jours pluvieux consécutifs définit un événement pluvieux)

$NJPc(i)$: Nombre de jours pluvieux consécutifs pour chaque événement pluvieux 'i'.

Le seuil pour considérer un jour pluvieux est fixé à 1 mm.

La Fig. IV.-14 montre les cycles saisonniers moyens obtenus par cette méthode sur les pluviomètres étudiés. Patacamaya présente une installation de la saison des pluies assez abrupte et cette méthode semble la mettre plus en évidence que les autres méthodes. Durant cette saison nous observons, une augmentation des NJP consécutifs sur une période d'environ 50 jours, atteignant un maximum de 2-3 jours pluvieux consécutifs en moyenne sur 21 jours. Cette caractéristique est moins visible sur les autres pluviomètres où l'installation de la saison des pluies est plus progressive.

A la différence des méthodes précédentes (Pentades, PIC et NJP), cette méthode permet de détecter le démarrage du cœur de la saison des pluies à la station de Harca. On remarque que les maximums observés à Patacamaya et San calixto sont de 2 à 2.5 jours pluvieux consécutifs, alors qu'à Plataforma et Harca cette valeur atteint 7 à 8 jours. Ce critère est donc très discriminant entre les stations de l'Altiplano et celles sous influence amazonienne : on n'avait observé de tels écarts pour aucun des trois critères examinés auparavant.

Les deux premiers pluviomètres montrent un démarrage de saison des pluies plus visible vers le jour 80 (19 octobre) ce qui est plus précoce que le démarrage calculé par les autres méthodes. Cependant, la DDP n'est assez claire, nous voyons aussi qu'à partir du jour 120 l'augmentation de la pluie est encore plus abrupte qu'à partir du jour 80, ainsi nous considérons cette deuxième date car il est plus cohérent avec la DDP des autres méthodes.

Par contre la fin arrive en moyenne vers le jour 250 (6 avril), à la même période que pour les autres méthodes. A Plataforma et Harca le cœur de la saison de pluie démarre, vers le jour 120 (28 novembre) et la saison termine vers le jour 250 (6 avril).

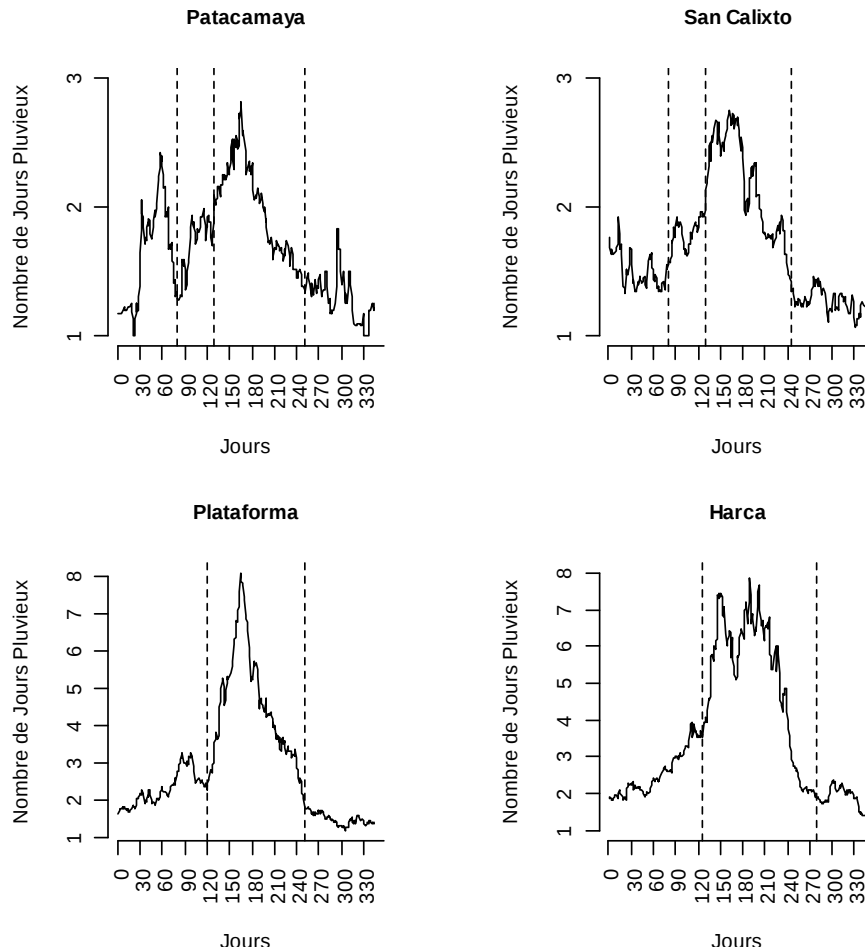


Figure IV 14.- Cycles saisonniers sur la moyenne de 19 ans (1992-2010) du nombre de jours pluvieux consécutifs calculés à partir de 1 mm /j sur une fenêtre glissante de 21 jours. Les lignes pointillées indiquent les séparations entre la phase d'installation, le cœur de la saison de pluie et la saison sèche (détermination visuelle). Le jour 30 est le 30 août et le jour 350 le 15 juillet. Le début de l'année hydrologique est compté à partir du 1^{er} août

IV.2.4.2 Seuils et critères pour identifier la DDP et la DFP

Afin de déterminer la DDP et DFP pour chaque pluviomètre, nous avons appliqué un critère similaire aux autres méthodes : la DDP sera celle qui remplit la condition d'avoir au moins 15 NJP sur 20 dépassent les seuils, et la DFP sera la première valeur qu'au moins 20 NJP sur 30 soient inférieurs aux seuils du tableau IV.9.

Ces seuils sont identifiés visuellement à partir de la moyenne saisonnière de 19 ans (Fig. IV.-14). Avec cette méthode nous observons que les seuils de la DDP et DFP sont autant sensibles aux seuils que dans les autres méthodes. L'augmentation ou la diminution de 1 NJP sur un seuil de 2 NJP à Patacamaya ou San Calixto provoque une variation de 5 et 10 jours de la DDP et de 1 à 2 jours de la DFP, respectivement. En utilisant le même seuil de 2 NJP à Plataforma et Harca, une variation de 1 NJP provoque une variation de 1 à 3 jours de la DDP et 1 de jour de la DFP. Cependant, une

variation de 1 NJP sur un seuil de 5 NJP provoque un décalage de la DDP de 3 jours à Plataforma et 4 jours à Harca. Avec ce seuil de 5 NJP, la majorité des années à Patacamaya et San Calixto n'accomplissent plus la condition pour démarrer ou finir la saison de pluies.

Tableau IV.- 9 *Seuils en nombre de jours pluvieux (NJP) utilisés pour le calcul de la DDP et la DFP par la méthode NJP consécutifs. Valeurs à partir des moyennes journalières sur 19 ans (1992-2010).*

	Seuil 1 DDP (NJP)	Seuil 2 DFP (NJP)
Patacamaya	2	1
SC	2	1
Plataforma	4	2
Harca	6	2

IV.2.4.3 Identification de la Date de démarrage de la saison des pluies (DDP)

Les histogrammes de la DDP (Fig. IV-15), montrent une forte variabilité interannuelle sur les quatre stations. A Patacamaya pour 31% des années (6 années) la saison des pluies démarre entre les jours 20 et 40 (20 août et 9 septembre), pour 16% (3 ans) entre les jours 40 - 60 (9 septembre – 29 septembre), 16% ; 60 – 80 (29 septembre – 19 octobre) et 16% ; 120 - 140 (28 novembre – 18 décembre). San Calixto, montre une variabilité de la DDP plus forte qu'à Patacamaya ; la plus forte concentration de la DDP (4 ans) est entre les jours 100 et 120 (9 septembre- 28 novembre) et aussi (4 ans) entre les jours 120 et 140 (28 novembre - 18 décembre). Nous voyons aussi que sur une autre bonne partie des années (7 ans), la DDP est concentrée entre les jours 20 et 80 (20 août et 19 octobre). L'année 1996 n'accomplit pas la condition de démarrage.

Plataforma montre que pour 6 ans (31%) la DDP est située entre les jours 120 et 140 (28 novembre - 18 décembre) et pour 4 ans (21%) entre les jours 140 et 160 (18 décembre – 7 janvier). Finalement, Harca montre que la DDP est plutôt concentrée (5 ans) entre les jours 120 et 140 (28 novembre - 18 décembre). Cependant nous observons aussi une 15 % de la DDP (3 ans) située entre les jours 80 et 100 (19 octobre – 8 novembre) ; 15% entre les jours 140 et 160 (18 décembre – 7 janvier), et 15% entre les jours 180-200 (27 janvier – 16 février)

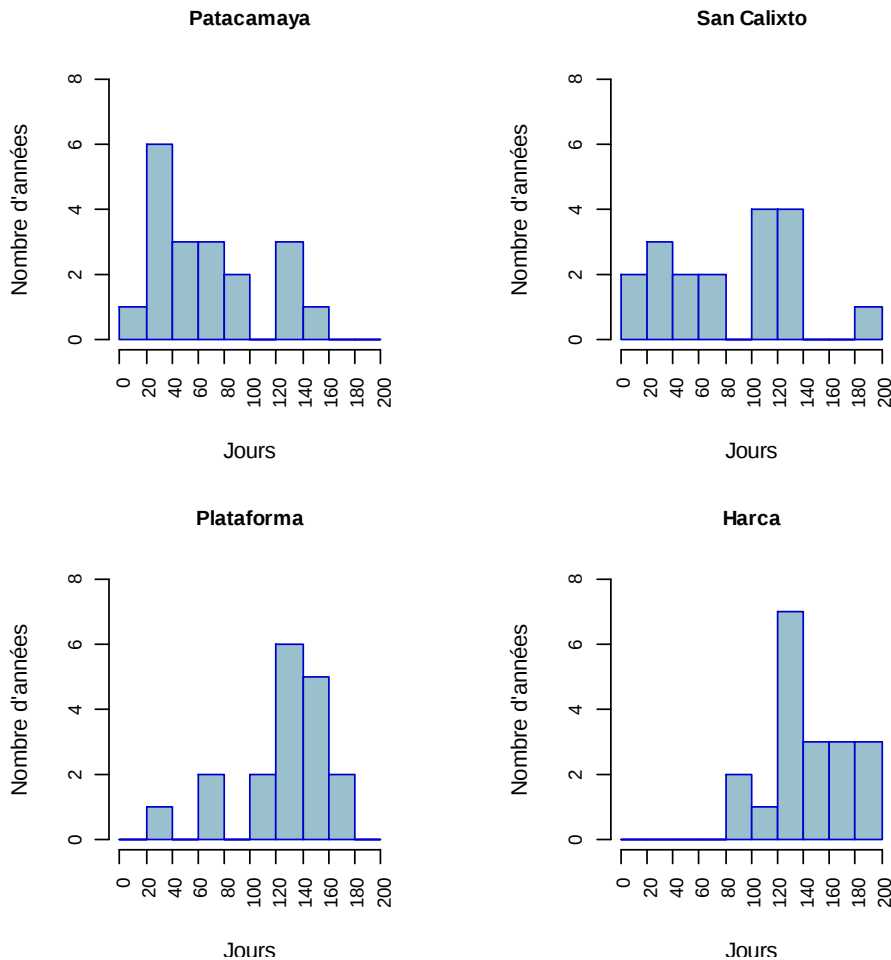


Figure IV 15.- Histogrammes de la date de démarrage de saison des pluies (DDP) selon la méthode NJP consécutifs. Analyse sur une période de 19 années (1992-2010) sur les pluviomètres : Patacamaya, San Calixto (exclue 2003), Plataforma (exclue 2010) et Harca (sans 1996 et 1997). En abscisse la date exprimée en numéro de jours : jour 20 : 20 août et 200 : 16 février. Le début de l'année hydrologique est compté à partir du 1^{er} août

Avec cette méthode nous voyons une forte variabilité interannuelle de la DDP sur les quatre pluviomètres. La DDP à Patacamaya et San Calixto peut varier du jour 20 (20 août) au jour 140 (18 décembre), et à Plataforma et Harca du jour 60 (29 septembre) au jour 180 (27 janvier).

Le point plus remarquable de cette méthode à Patacamaya et San Calixto est une DDP bien plus précoce par rapport aux autres méthodes. Cela coïncide avec le cycle moyen de la Fig. IV.14. A Plataforma la DDP identifiée avec cette méthode coïncide en grande partie avec les autres méthodes. Finalement, Harca montre une DDP concentrée entre le 28 novembre – 18 décembre. La variabilité interannuelle de la DDP est plus faible que les autres méthodes, donc nous pouvons dire que cette méthode est plus représentative que les autres méthodes pour la caractérisation de la saison des pluies à Harca.

IV.2.4.4 Date de la fin de la saison des pluies (DFP)

Cette méthode montre une forte variabilité interannuelle de la DFP sur les 4 pluviomètres. Nous voyons que la plus forte concentration de la DFP (47%) à Patacamaya (9 ans) est située entre les jours 220 – 240 (7 mars – 27 mars) et 6 ans entre les jours 240 - 260 (27 mars – 16 avril). A San calixto cette concentration (48% des années ; 10 ans) est située entre les jours 220 et 240 (7 mars- 27 mars), 4 ans entre les jours 240-260 (27 mars – 16 avril) et entre les jours 260 et 280 (16 avril – 6 mai). La distribution de Plataforma montre une DFP concentré (13 ans) entre les jours 220-240 (7 mars- 27 mars). Cette distribution est précoce par rapport aux autres méthodes. Finalement Harca montre que durant 9 ans (47%) la DFP est concentrée entre les jours 240 et 260 (27 mars- 16 avril), et 4 ans entre 280 et 300 (6 mai-26 mai).

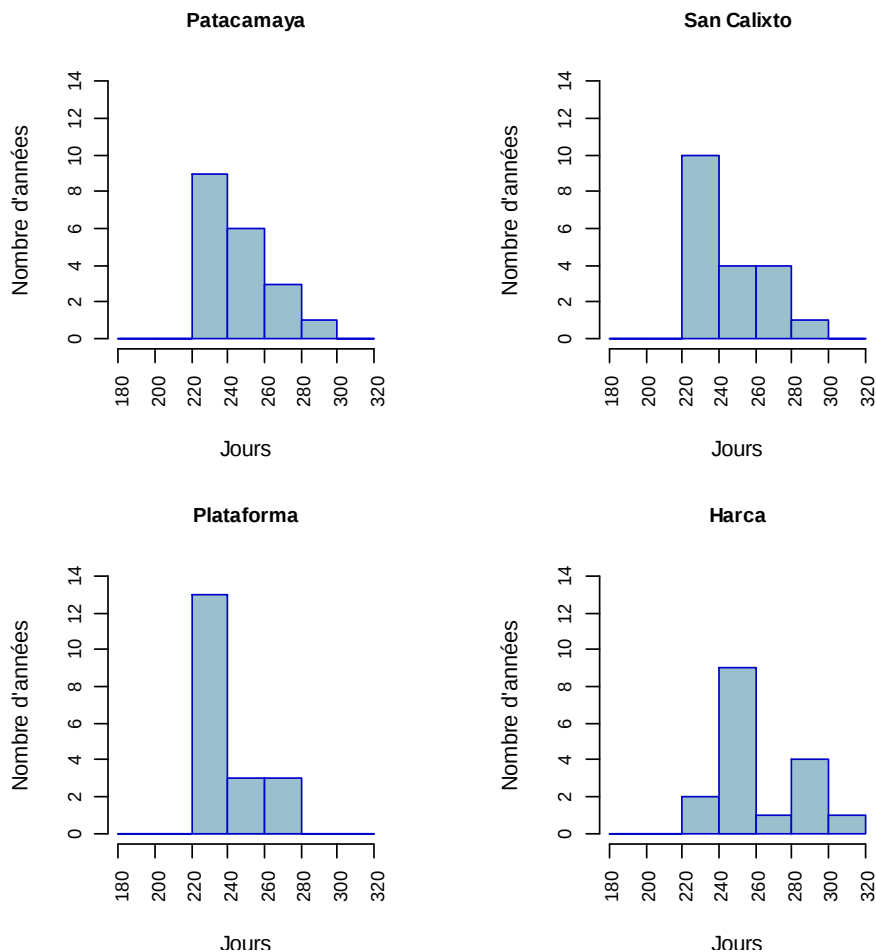


Figure IV 16.- Histogrammes de la date de fin de saison des pluies (DFP) selon la méthode NJP consécutifs. Analyse sur une période de 19 années (1992-2010) sur les pluviomètres : Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca (exclue, 1996 et 1997). En abscisses la date représentée en nombre de jours. Jour 1=1 août, Jour 220= 7 mars et Jour 320=15 juin.

La distribution de la DFP à Patacamaya présente une forte variabilité interannuelle, ce qui rend difficile l'identification d'une date générale de fin de saison des pluies. Cependant nous notons que la plus grande partie des DFP (9 ans) est située entre les jours 220 et 240 (7 mars – 27 mars). San

Calixto et Plataforma montrent que la concentration de la DFP converge à la même période : entre les jours 220 et 240 (7 mars- 27 mars). Finalement, Harca révèle une concentration de la DFP entre les jours 240-260 (27 mars - 16 avril).

A San Calixto et Harca la DFP identifiée dans cette section est similaire à la DFP des méthodes de Pentades et NJP. La méthode PIC montre une DFP plus en retard que celle trouvée avec cette méthode. A Plataforma les DFP trouvées avec cette méthode sont plus à l'avance par rapport aux méthodes de NJP et PIC, cependant il y a une coïncidence avec la méthode de Pentades.

IV.2.4.5 Durée de la saison des pluies (DFP)

La durée de la saison de pluies est représentée par des boîtes à moustache (Fig. IV.-17) pour les quatre pluviomètres. Selon cette méthode, Patacamaya et San calixto présentent les plus fortes variabilités interannuelles. Nous voyons qu'à Patacamaya, 50% des années présentent une durée comprise entre 150 et 210 jours. L'année 1993 présente la durée plus longue de cette série (235 jours) et l'année 2005 présente la plus courte durée (45 jours). Les limites Q1 et Q3 à San Calixto montrent une durée comprise entre 140 et 200 jours. L'année avec la durée plus longue est le 1994 (251 jours) et avec la durée la plus courte est l'année 1997 (85 jours).

Les boîtes à Plataforma et Harca montrent une variabilité interannuelle de la durée de la saison des pluies plus faible qu'à Patacamaya et San Calixto. Nous notons qu'à Plataforma l'année 1996 est caractérisée par la plus longue durée (155 jours) et l'année 2005 par la plus courte (65 jours). Deux points exceptionnels situent au-delà de la valeur maximum est représentée par l'année 2006 (217 jours) et l'année 1998 (166 jours). Harca révèle une durée comprise entre 100 et 160 jours, avec un maximum de 202 jours (2010) et un minimum de 95 jours (1997).

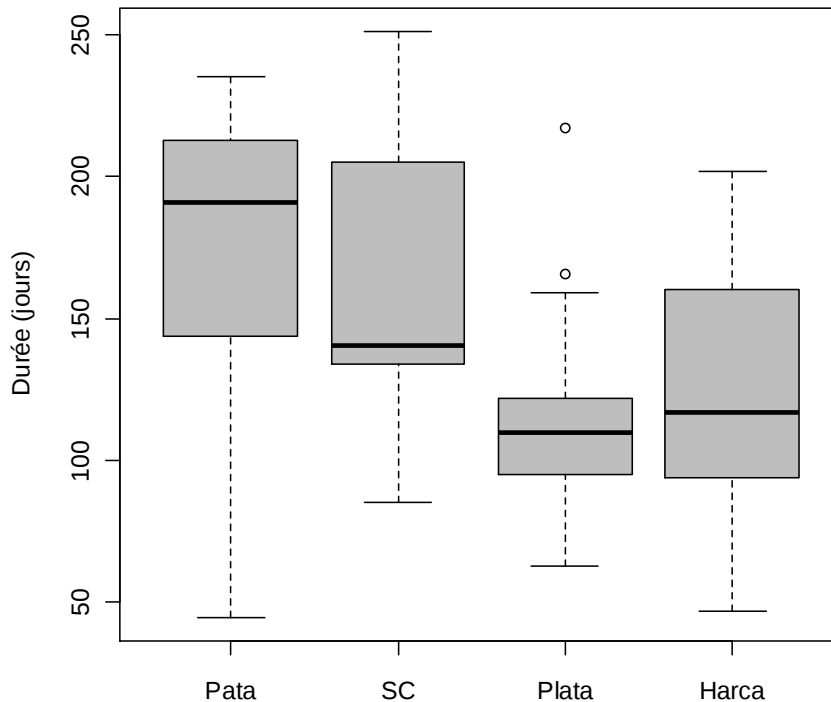


Figure IV 17.- Boîtes à moustache de la durée de la saison des pluies (1992-2010) pour Patacamaya (Pata), San Calixto (SC), Plataforma (Pla) et Harca (à l'exception des années 1996 et 1997) obtenues selon la méthode « NJP consécutifs ». La ligne en noire indique la médiane, les limites de valeurs minimums (barres en bas déterminée par $Q1 - 1.5 \cdot (Q3 - Q1)$) et de valeurs maximums (barres en haut, déterminées à partir $Q3 + 1.5 \cdot (Q3 - Q1)$), les quantiles Q1 (0.25), Q2 (0.5), et Q3 (0.75), et finalement les valeurs extrêmes ou « outliers » représentées en cercles. En ordonnées la durée de la saison des pluies en jours.

En résumé, avec cette méthode nous voyons que la durée de la saison des pluies à Patacamaya et San Calixto est plus longue par rapport à celle de Plataforma et Harca. Ce résultat diffère des autres méthodes qui montrent que la durée est plus courte à Patacamaya et San Calixto que dans la Vallée du Zongo. Néanmoins, Plataforma et Harca présentent des durées assez similaires avec les autres méthodes. Cela est approfondi dans la synthèse livrée en section IV.3.

IV.2.4.6 Synthèse de la méthode du nombre de jours pluvieux consécutifs

Dans cette section nous examinons les corrélations linéaires entre la DDP, la durée et la DFP (Tableau IV.10). Selon cette méthode, la DDP contrôle largement la durée de la saison des pluies ($r^2 > 0.8$) sur les quatre pluviomètres. En revanche, la relation de la DFP avec la durée n'est pas significative aux trois premiers pluviomètres. Patacamaya montre que la DFP explique seulement 15% de la variance de la durée de la saison de pluies. San Calixto et Plataforma présente une DFP qui explique moins de 10% de la

variance interannuelle de la durée. Cependant, Harca montre la plus forte relation de la DFP- durée, ainsi la DFP explique le 70% de la variance de la durée.

A Patacamaya et Plataforma, les coefficients de détermination entre la DDP et la DFP révèlent de relations pas significatives ($r^2 < 0.1$). San Calixto et Harca présentent les plus fortes corrélations linéaires entre la DDP et DFP avec un r^2 de l'ordre de 0.17 et 0.28 respectivement.

Tableau IV.- 10 Coefficient de détermination entre la durée et la date de démarrage des pluies (DDP) et avec la date de fin de saison des pluies (DFP). Coefficient de détermination entre la DDP et la DFP. En Italique les valeurs qui ne sont pas significatives à un niveau de 95%.

R²	DDP-Durée	DFP-Durée	DDP-DFP
Patacamaya	0,94	<i>0,15</i>	<i>0,05</i>
San Calixto	0,71	<i>0,07</i>	<i>0,17</i>
Plataforma	0,93	<i>0,05</i>	<i>0,06</i>
Harca	0,87	0,70	0,28

La variabilité interannuelle des DDP et DFP et leurs relations avec la durée de la saison des pluies sont aussi vérifiées avec les écarts types de chaque variable (Tableau IV.11).

La méthode des NJP consécutifs montre que la DDP se met en place d'abord sur l'Altiplano et après dans la vallée du Zongo, un résultat peu commun car les autres méthodes montrent une arrivée de la saison de pluie d'abord dans la vallée du Zongo et après sur l'Altiplano, ce qui est plus en accord avec le trajet des masses d'air humide en saison des pluies. Nous avons montré que cela est dû à une période de nombreux jours pluvieux consécutifs pendant l'installation de la saison des pluies, qui provoquent un démarrage des pluies plus précoce par rapport aux autres méthodes. En moyenne la DDP est située vers le jour 66 (17 octobre) à Patacamaya, et le jour 138 (16 décembre) à Harca, donc une différence d'environ 72 jours entre les deux stations. De plus, nous voyons que la DFP arrive d'abord aux stations de Patacamaya, San Calixto et Plataforma ; environ le jour 248 (4 avril). En revanche, la fin de la saison de pluies se met en place en moyenne vers le jour 262 (18 avril) à Harca, donc 14 jours après que la DFP de l'Altiplano.

Sur les quatre pluviomètres les plus forts écarts types sont présentés par la DDP. Patacamaya et San Calixto sont les pluviomètres qui présentent les plus forts écarts de toutes les stations pour la DDP. Ainsi, nous pouvons expliquer que la DDP contrôle la durée de la saison des pluies par une plus grande variabilité interannuelle que la DFP. De plus, nous notons que pour les quatre pluviomètres les écarts types de la DDP sont en général plus forts par rapport aux autres méthodes. Par rapport à la DFP, les écarts types sont similaires avec la majorité des autres méthodes.

Tableau IV.- 11 Moyenne annuelle et écart Type de la Date de démarrage des pluies (DDP) et de la date de fin de saison des pluies (DFP) selon la méthode de NJP consécutifs, moyenne de 19 ans (1992 -2010)

Pluviomètre	DDP		DFP	
	Moyenne (jours)	Ecart type (jours)	Moyenne (jours)	Ecart type (jours)
Patacamaya	66	42,52	249	15,74
San Calixto	82	52,87	251	15,14
Plataforma	128	37,21	244	9,49
Harca	138	35,61	262	21,76

Les coefficients de corrélation et les écarts types montrent que la DDP contrôle plutôt la durée de la saison des pluies sur les quatre pluviomètres. Cependant à Patacamaya et Harca, la relation avec la DFP n'est pas négligeable.

En définitive, la DDP est plus précoce avec cette méthode à Patacamaya et San Calixto par rapport à Plataforma et Harca. Par conséquent ces deux stations présentent en moyenne une durée de la saison des pluies plus longue (Patacamaya : 169 jours, San Calixto : 164 jours) par rapport à la vallée du Zongo (Plataforma : 102 jours et Harca : 141 jours) et aussi par rapport aux autres méthodes. Ainsi, nous pouvons conclure que cette méthode n'est pas représentative pour les stations de l'Altiplano (Patacamaya et San Calixto). En plus, même si à Plataforma les moyennes de la DDP et DFP ne présentent pas de forts écarts par rapport aux autres méthodes, le cycle moyen est similaire à ceux de l'Altiplano et la Ville de La Paz. C'est pourquoi, cette méthode peut présenter, certaines années surtout, une DDP précoce à la réalité. La Fig. IV.-15 montre que pour 5 années sur 19 (26% du total) la DDP est située avant le jour 120 (28 novembre).

Dans la vallée du Zongo, surtout à Harca cette méthode fait apparaître un cœur de la saison des pluies bien distinct, par rapport aux autres méthodes où la DDP est peu visible.

Le lissage des données selon cette méthode présente un cycle saisonnier bien défini à Plataforma et Harca. Une ambiguïté de cette méthode est la taille de la fenêtre glissante dans notre cas, 21 jours (choisie après plusieurs tests). Un autre point ambiguïté est le seuil pour déterminer les NJP (1mm/j) et pour identifier la DDP.

IV.3 SYNTHÈSE DES METHODES

IV.3.1.- Comparaison des méthodes

Dans ce sous chapitre nous faisons une synthèse des résultats obtenus selon les méthodes développés dans la section IV.2 (Pentades, PIC, NJP et NJP consécutifs). D'abord nous examinons les relations entre les valeurs interannuelles de DDP et DFP, selon chaque méthode et les DDP et DFP du cycle moyen, en utilisant les mêmes critères et seuils que ceux employés

année par année. Cette analyse va nous permettre de vérifier si les DDP et DFP annuelles convergent vers les mêmes périodes que les DDP et DFP des cycles moyens. Ensuite, nous analysons la variabilité interannuelle de la durée de la saison de pluies selon chaque méthode.

IV.3.1.1 Variations de la DDP et de la DFP selon la méthode et selon la station pour le cycle annuel moyen

Dans les synthèses de chaque méthode développées ci-dessus (Pentades, PIC, NJP et NJP consécutifs), nous avons analysé la relation interannuelle de la durée avec la DDP et DFP. Dans cette section nous déterminons la DDP et la DFP à partir du cycle moyen entre 1992 et 2010 (tableau IV.12), afin de vérifier si les DDP et DFP interannuelles des différentes méthodes convergent vers les mêmes périodes.

En comparant la DDP du cycle moyen (Tableau IV.12a) et celle de moyennes annuelles des quatre méthodes nous voyons que les DDP de ces deux variables convergent assez bien (sauf Patacamaya et San Calixto selon la méthode de NJP consécutifs).

A Patacamaya et San Calixto, la DDP du cycle moyen de 19 ans montre que les quatre méthodes présentent un début de saison similaire, qu'oscille entre le jour 120 ; 28 novembre (NJP consécutifs) et 140 ; 18 décembre (Pentades) Les différences entre les DDP annuelles et celles du cycle moyen sont comprises entre 2 et 19 jours selon les trois premières méthodes. Ainsi nous pouvons dire que ces méthodes correspondent à leurs cycles moyens. Cependant pour la méthode de NJP consécutifs la différence entre la DDP du cycle moyen et la DDP interannuelle est de 60 (Patacamaya) et 40 jours (San Calixto). A Plataforma, la DDP du cycle moyen selon les méthodes de PIC NJP et NJP consécutifs arrivent plus tôt que pour la méthode de Pentades (d'environ 12 jours), mais cette variation reste faible. Les décalages entre les valeurs annuelles et celles du cycle moyen peuvent varier entre 4 et 20 jours selon la méthode. Ce décalage entre la moyenne interannuelle et celle du cycle moyen est plus fort qu'à Patacamaya et San Calixto qui présentent seulement un décalage de 2 à 15 jours. En dernier lieu, Harca présente une DDP similaire pour les valeurs annuelles et pour le cycle moyen selon les quatre méthodes. La plus forte variation est selon la méthode PIC qui présente un décalage de 20 jours. Par rapport aux autres stations, Harca montre une DDP plus précoce, cette différence pouvant varier de 4 à 40 jours selon les méthodes.

La DFP montre que selon les méthodes de Pentades et NJP, les valeurs interannuelles obtenues dans la section IV.2 convergent assez bien avec celles des cycles moyens sur les quatre pluviomètres (Tableau IV.12b ; valeurs depuis le cycle moyen et depuis la variation interannuelle). La méthode PIC présente une différence de 4 à 20 jours entre la DFP interannuelle et celle du cycle moyen selon le pluviomètre.

En analysant seulement la DFP du cycle moyen nous voyons qu'à Patacamaya et San Calixto les méthodes de Pentades et NJP présentent une DFP similaire, vers les jours 225 et 234, respectivement. Cependant, les méthodes PIC et NJP consécutifs montrent une DFP plus tardive vers le jour 245.

Nous notons qu'à Plataforma les valeurs du cycle moyen ne présentent pas de forts écarts entre les quatre méthodes, cependant la moyenne interannuelle révèle que la méthode PIC présente un retard assez fort par rapport aux autres méthodes (compris entre 16 et 33 jours).

Tableau IV.- 12 . a) Date de démarrage de pluie (DDP) et b) date de fin de saison de pluie (DFP), sur le cycle moyen de 19 ans, selon les méthodes de pentades, PIC, NJP et NJP consécutifs. Les chiffres renvoient au nombre de jours depuis le 1er août. Entre parenthèses la moyenne de la DDP et de la DFP interannuelle selon chaque méthode

a)

DDP (jours)	Pentades	Point d'interception sur le cumul (PIC)	NJP	NJP consécutifs
Patacamaya	140 (144)	125 (138)	130 (125)	120 (66)
SC	135 (132)	128 (132)	124 (125)	120(83)
Plataforma	138 (144)	120 (134)	126 (106)	128(127)
Harca	111 (110)	99 (118)	79 (80)	122(138)

b)

DFP (jours)	Pentades	Point d'interception sur le cumul (PIC)	NJP	NJP consécutifs
Patacamaya	226 (224)	245 (241)	221 (227)	249 (249)
SC	230 (238)	243 (262)	236 (235)	251 (250)
Plataforma	251 (248)	255 (265)	230 (232)	244 (245)
Harca	260 (265)	256 (268)	264 (255)	262(260)

En résumé de cette section, nous pouvons dire que :

- Les valeurs de la moyenne des DDP annuelles obtenues selon chaque méthode, sont assez proches de celles calculées sur le cycle moyen, pour les trois premières méthodes. En revanche, la méthode NJP consécutifs présente une forte variation entre ces deux variables sur les pluviomètres de Patacamaya et San Calixto. Alors, selon les premières trois méthodes la DDP interannuelle présente des écarts faibles par rapport au cycle moyen.
- A Patacamaya et San Calixto, la méthode NJP consécutifs révèle une DDP interannuelle très précoce par rapport aux autres méthodes (environ 60 jours). Cela est dû à une augmentation du nombre de

jours pluvieux consécutifs pendant l'installation de la saison des pluies (Fig. IV.-14), qui marquent un démarrage des pluies trop tôt par rapport aux autres méthodes (voir annexe 5 pour voir le cycle saisonnier selon la méthode de NJP consécutifs année par année).

- La méthode PIC révèle une DFP (tant pour les valeurs interannuelles que pour celle du cycle moyen) plus en retard par rapport aux autres méthodes. Ce retard est plus visible aux pluviomètres de Patacamaya et San Calixto. Sur ces stations l'identification visuelle de la DFP est plus difficile que pour la DDP, en raison d'un démarrage souvent assez progressif de la saison sèche. Cette difficulté peut entraîner une surestimation de la DFP, impliquant un contrôle artificiel de la durée par la DFP. Selon cette méthode Plataforma présente aussi une DFP plus en retard par rapport aux autres méthodes, cette caractéristique est plus visible sur la variation interannuelle.
- Ainsi, au terme de cette analyse nous concluons que la méthode NJP consécutifs n'est pas fiable pour calculer la DDP surtout pour les stations de Patacamaya et San Calixto. En plus, pour la DFP nous voyons que la méthode PIC n'est pas non plus fiable pour ces deux pluviomètres.

IV.3.1.2 Variation interannuelle de la durée de la saison des pluies (1992-2010).

Dans cette section nous examinons la variation interannuelle de la durée de la saison de pluies entre 1992 et 2010 (Tableau IV.13), selon les quatre méthodes développées dans la section IV.2.

La moyenne interannuelle montre que selon les méthodes de Pentades, PIC et NJP la durée de la saison des pluies est plus courte à Patacamaya, San Calixto et Plataforma (environ 3-4 mois) par rapport à Harca (environ 5 et 6 mois). Néanmoins, la méthode de NJP consécutifs révèle une durée plus longue aux pluviomètres de Patacamaya et San Calixto (environ 4 et 5 mois) par rapport à Plataforma et Harca (environ 3 – 5 mois).

A Patacamaya et San Calixto, les méthodes de Pentades et NJP montrent une durée plus courte par rapport aux méthodes PIC et NJP consécutifs. Plataforma présente en moyenne une durée plus courte avec la méthode de NJP consécutifs (117 jours), par rapport aux méthodes PIC (131 jours), NJP et Pentades (112 jours). A Harca, la durée la plus courte est obtenue avec la méthode de NJP consécutifs (121 jours), cependant les méthodes Pentades et PIC présentent des valeurs proches (150 jours) à celles de NJP consécutifs. La plus longue durée est donnée par la méthode de NJP (188 jours).

Pour comparer les variabilités interannuelles de la durée selon chaque méthode, nous analysons les écarts types par rapport à leurs moyennes (Tableau IV.13). Nous observons que sur les quatre pluviomètres, la méthode de NJP consécutifs présente les plus forts écarts types de durée (entre 36 et

50 jours), ce qui montre que cette méthode donne une plus forte variabilité de la durée par rapport aux autres méthodes.

Si on analyse chaque pluviomètre séparément, nous voyons que Patacamaya présente des écarts types de durée plus forts selon la méthode des pentades et la méthode de NJP consécutifs, causés par de fortes variabilités de la DDP et de la DFP.

San Calixto présente de forts écart types avec la méthode NJP consécutifs causée seulement par la variabilité de la DDP (et non celle de la DFP). Les méthodes de Pentades, PIC et NJP montrent des écarts similaires. Plataforma révèle de faibles écarts avec la méthode de Pentades, mais aussi avec la méthode PIC et NJP. Ces écarts dépendent plutôt de la DDP (les écarts types sont plus fortes pour la DDP que pour la DFP), sauf pour la méthode PIC où la durée dépend plutôt de la DFP. Plataforma présente les écarts les plus faibles avec la méthode de pentades, PIC et NJP. Harca présente des écarts plus faibles avec la méthode PIC et NJP. Mais c'est avec la méthode de NJP consécutifs que l'écart type de la durée est le plus faible.

Tableau IV.- 13 Moyennes et écarts types de la durée selon la méthode de Pentades, PIC, NJP et NJP consécutifs sur la moyenne interannuelle de 1992 - 2010.

Moyenne (jours)				
	Patacamaya	San Calixto	Plataforma	Harca
Pentades	80	106	112	145
Point d'interception sur le cumul (PIC)	122	130	131	150
NJP	113	111	113	188
NJP consécutifs	176	164	117	121
Ecart Type (jours)				
	Patacamaya	San Calixto	Plataforma	Harca
Pentades	32,0	29,8	37,9	61,7
Point d'interception sur le cumul (PIC)	31,0	26,1	23,7	26,5
NJP	34,9	25,2	28,6	26,2
NJP consécutifs	51,1	46,7	36,0	46,7

La Fig. IV.18 montre les fluctuations interannuelles de la durée de la saison des pluies selon chaque méthode et sur les quatre pluviomètres. Nous analysons la durée parce qu'elle intègre la DDP et la DFP. Les trois premières méthodes (Pentades, PIC et NJP) donnent des variabilités interannuelles de la durée de la saison de pluie assez similaires sur les pluviomètres de Patacamaya et San Calixto. Cependant à ces stations, la méthode NJP consécutifs donne des durées plus longues par rapport aux autres méthodes, cela est causée à une DDP trop tôt (voir section IV.2.4). A Plataforma et Harca, la méthode NJP consécutif présente des écarts plus

faibles et une variabilité interannuelle plus au moins similaire aux autres méthodes. A Plataforma une variabilité similaire est visible entre la méthode de Pentades et NJP consécutifs surtout à partir de l'année 1999. Harca les méthodes PIC et NJP consécutifs (sauf les années 1995 et 2005) montrent une fluctuation similaire, cependant la présence de forts écarts est toujours visible.

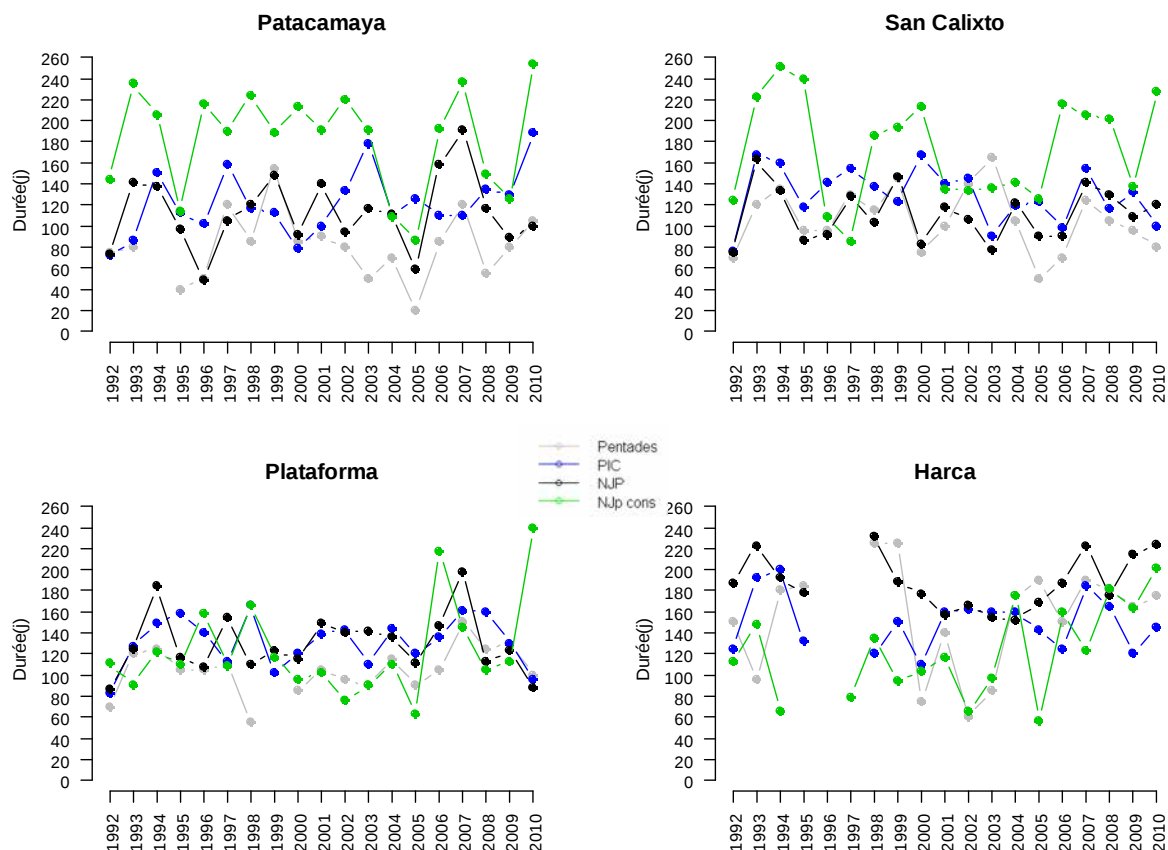


Figure IV 18.- Fluctuation interannuelle de la durée de la saison des pluies de 1992 à 2010, sur les quatre pluviomètres étudiés et selon les méthodes de pentades, PIC, NJP et NJP consécutifs.

Les trois premières méthodes donnent des fluctuations interannuelles de la durée assez similaires sur l'Altiplano et à Plataforma. Par contre la méthode de NJP consécutifs montre des durées beaucoup plus longues par rapport aux autres méthodes (sauf à Plataforma où cette méthode révèle une variabilité interannuelle similaire aux autres méthodes). Harca montre une variabilité interannuelle similaire de la durée de la saison des pluies selon les quatre méthodes. Cependant, nous notons que la méthode de Pentades est celle qui présente la plus forte variabilité interannuelle. Ainsi nous pouvons dire que la méthode de NJP consécutifs donne des résultats très différents par rapport aux autres méthodes sur l'Altiplano, cependant lorsque l'on se rapproche de l'Amazonie cette méthode montre des résultats plus cohérents et proches des autres méthodes. Cette analyse sur la durée permet de dire qu'il existe plus de similitudes entre les méthodes basées sur l'intensité qu'entre les méthodes basées sur les NJP et cela quelle que soit la station considérée.

Ainsi, nous pouvons dire que les méthodes de Pentades et de NJP sont celles qui donnent des durées du cœur de la saison des pluies les plus fiables sur les quatre pluviomètres (entre 3 et 4 mois pour les stations de l'Altiplano et Plataforma et entre 4 et 5 mois pour Harca). La méthode PIC donne des résultats de durées parfois subjectifs, dépendant de l'observateur. Plusieurs tests de cette méthode ont montré une forte incertitude sur la date de fin de la saison des pluies selon la méthode PIC. Finalement, la méthode de NJP consécutifs montre sur les stations de l'Altiplano une DDP beaucoup plus précoce par rapport aux autres méthodes. Pour cette raison, la méthode des NJP consécutifs n'est pas conseillée pour déterminer la durée de la saison des pluies dans cette région.

IV.4 ANALYSE CLIMATOLOGIQUE

Jusqu'ici nous avons fait une description de la méthodologie développée pour déterminer la durée de la saison de pluies. Dans cette partie nous voulons interpréter ces résultats d'un point de vue climatologique, en comparant la pluie annuelle avec l'installation et le cœur de la saison des pluies. Ainsi nous comparons i) le cumul des pluies annuelles avec le cumul durant la phase d'installation de la saison des pluies (Tableau IV.14) ii) le cumul des pluies annuelles avec le cumul du cœur de la saison des pluies (Tableau IV.15) et iii) le pourcentage de la pluie durant le cœur de la saison des pluies par rapport à la pluie annuelle (tableau IV.16). Ces analyses sont faites selon les méthodes de Pentades et NJP, car ces méthodes sont les plus performantes pour caractériser la saison des pluies (DDP et DFP) pour les pluviomètres de l'Altiplano et la vallée du Zongo. Finalement une analyse des tendances de la durée et de la pluie durant la saison des pluies est faite sur les quatre pluviomètres.

IV.4.1 Relations entre le cumul annuel, d'une part, et les cumuls de la phase d'installation et du cœur de la saison des pluies, d'autre part.

L'installation de la saison des pluies montre en général une relation non significative avec la pluie annuelle, surtout à Patacamaya, San Calixto et Plataforma ($r^2 < 0.17$). A Harca ces valeurs sont plus élevées, cependant cette phase d'installation de la saison des pluies représente seulement 26% (NJP) et 30% (Pentades) de la variance de pluie annuelle.

Tableau IV.- 14 Coefficients de détermination (r^2) calculés entre le cumul de pluie de la saison d'installation de pluies et le cumul annuel selon les méthodes de Pentades et NJP. Période 1992-2010 (19 points).

R^2	Patacamaya	SC	Plataforma	Harca
Pentades	0,17	0,02	0,1	0,3
NJP	0,01	0,11	0,03	0,26

Le tableau IV.15 présente les coefficients de détermination entre le cumul du cœur de la saison des pluies selon les méthodes de Pentades et

NJP avec le cumul de la pluie annuelle. Nous voyons une relation significative entre ces deux variables. Ainsi, le cœur de la saison des pluies explique plus de 70% de la variance de la pluie annuelle à Patacamaya, San Calixto et Plataforma. A Harca cette période contrôle 56% des variations de la pluie annuelle selon la méthode NJP, et 75% selon la méthode Pentades. Donc, nous pouvons dire que le cœur de la saison des pluies contrôle largement la variance de la pluie annuelle sur les quatre pluviomètres. De plus nous pouvons noter qu'il y a un écart important à Harca entre la méthode de NJP et le Pentades.

Tableau IV.- 15 Coefficient de déterminations (r^2) entre le cumul du cœur de la saison des pluies et le cumul annuel pour chaque méthode, période 1992-2010 (19 points). En italique et souligné, les corrélations significatives. .

R²	Patacamaya	San Calixto	Plataforma	Harca
Pentades	<i><u>0,80</u></i>	<i><u>0,81</u></i>	<i><u>0,72</u></i>	<i><u>0,75</u></i>
NJP	<i><u>0,80</u></i>	<i><u>0,70</u></i>	<i><u>0,83</u></i>	<i><u>0,56</u></i>

Les pourcentages de valeurs mensuelles (Fig. IV .1) montrent que les mois de décembre à mars (cœur de la saison des pluies) concentrent en moyenne plus de 70% de la pluie annuelle sur l'Altiplano et Plataforma et plus de 55% à Harca. A une échelle journalière, nous voyons que selon la méthode des Pentades la pluie durant le cœur de la saison de pluies représente plus de 62% de la pluie annuelle, tandis qu'à Harca cette phase représente 60% (Tableau IV.16). La méthode NJP montre des pourcentages plus élevées que la méthode des Pentades. A Patacamaya, San Calixto et Plataforma le cœur de la saison de pluies représente 70% de la pluie annuelle et 65% à Harca. Alors, à une échelle plus fine (journalière) nous voyons que ces pourcentages peuvent varier entre 60% et 70% aux pluviomètres de l'Altiplano et Plataforma et entre 60% à 65% à Harca. Ainsi, nous pouvons dire que le cœur de la saison des pluies contrôle largement la pluie annuelle sur les quatre pluviomètres.

Tableau IV.- 16 Pourcentage de la précipitation durant le cœur de la saison des pluies par rapport à la pluie annuelle selon les méthodes Pentades et NJP.

%	Patacamaya	San Calixto	Plataforma	Harca
Pentades	66%	69%	62%	60%
NJP	72%	70%	70%	65%

En fait ce qui ressort de ces statistiques c'est que le cœur de la saison des pluies explique une plus forte part de la variabilité interannuelle du total que sa proportion moyenne dans ce total (surtout si l'on considère la méthode NJP : 10% de plus pour chaque station sauf Harca qui a un comportement à part). L'explication la plus probable est que le CV de la pluie de cœur ($CV > 0.8$ selon les deux méthodes) est plus fort que le CV de la pluie de phase d'installation de la saison des pluies ($CV > 0.3$) (si les CV étaient égaux et ces deux signaux décorrélés, alors la proportion dans la

moyenne et la proportion dans la variance seraient égales). A Harca les valeurs de CV de l'installation de la saison des pluies ($CV=0.45$) est plus proches au CV du cœur de pluies ($CV=0.36$), que n'est pas le cas aux autres pluviomètres. Cela signifie qu'à ce pluviomètre l'installation de la saison des pluies joue aussi un rôle important dans la pluie annuelle (25% du volume total).

IV.4.2 Analyse de tendance de la durée et du cœur de la saison des pluies sur la période 1992-2010 (19 ans)

Dans cette section nous analysons les tendances sur 19 ans de la durée et de la précipitation durant la saison des pluies selon les méthodes des Pentades et de NJP en utilisant des valeurs centrées réduites. Ces deux méthodes sont les plus performantes pour représenter la variabilité de ces deux variables. Malgré la courte période de données annuelles (19 ans) pour faire une analyse de tendances, nous pouvons obtenir une première approximation de cette tendance de ces deux variables.

Des études faites, sur la variabilité interannuelle de la précipitation (période : 1950-1994) à une échelle régionale montrent une tendance faible à l'augmentation de la précipitation annuelle et celle du cœur de la saison de pluies (entre 2.5 et 0.5 mm/an) dans les régions de l'Altiplano bolivien et dans la partie sud du Pérou [Vuille, et al., 2003 ; Vuille et al., 2008]. Une autre étude [Haylock, et al., 2005] utilisant le logiciel R-Climdex pour la Période : 1946-1999, sur la station de Patacamaya qui représente la région de l'Altiplano nord, montre que la précipitation annuelle présente de la même manière une tendance faible d'augmentation (selon le test de Student). Cette tendance est mesurée par un niveau de signification à 95%, les résultats montrent que dans le cas de Patacamaya cette tendance n'est pas significative ($p<0.05$).

La Fig. IV.-19 montre les courbes de tendance de la durée de la saison des pluies selon les méthodes de Pentades et NJP. Nous observons que les quatre pluviomètres ne présentent pas de tendance significative. Nous pouvons remarquer les points suivants :

- Patacamaya montre une tendance linéaire nulle avec la méthode des pentades et une tendance linéaire décroissante avec la méthode NJP
- SC présente une tendance plutôt négative selon la méthode de pentades, mais cette tendance est moins visible avec la méthode des NJP
- Plataforma présente une tendance positive selon la méthode de Pentades et négative selon la méthode NJP.
- Harca présente une tendance linéaire nulle selon les deux méthodes

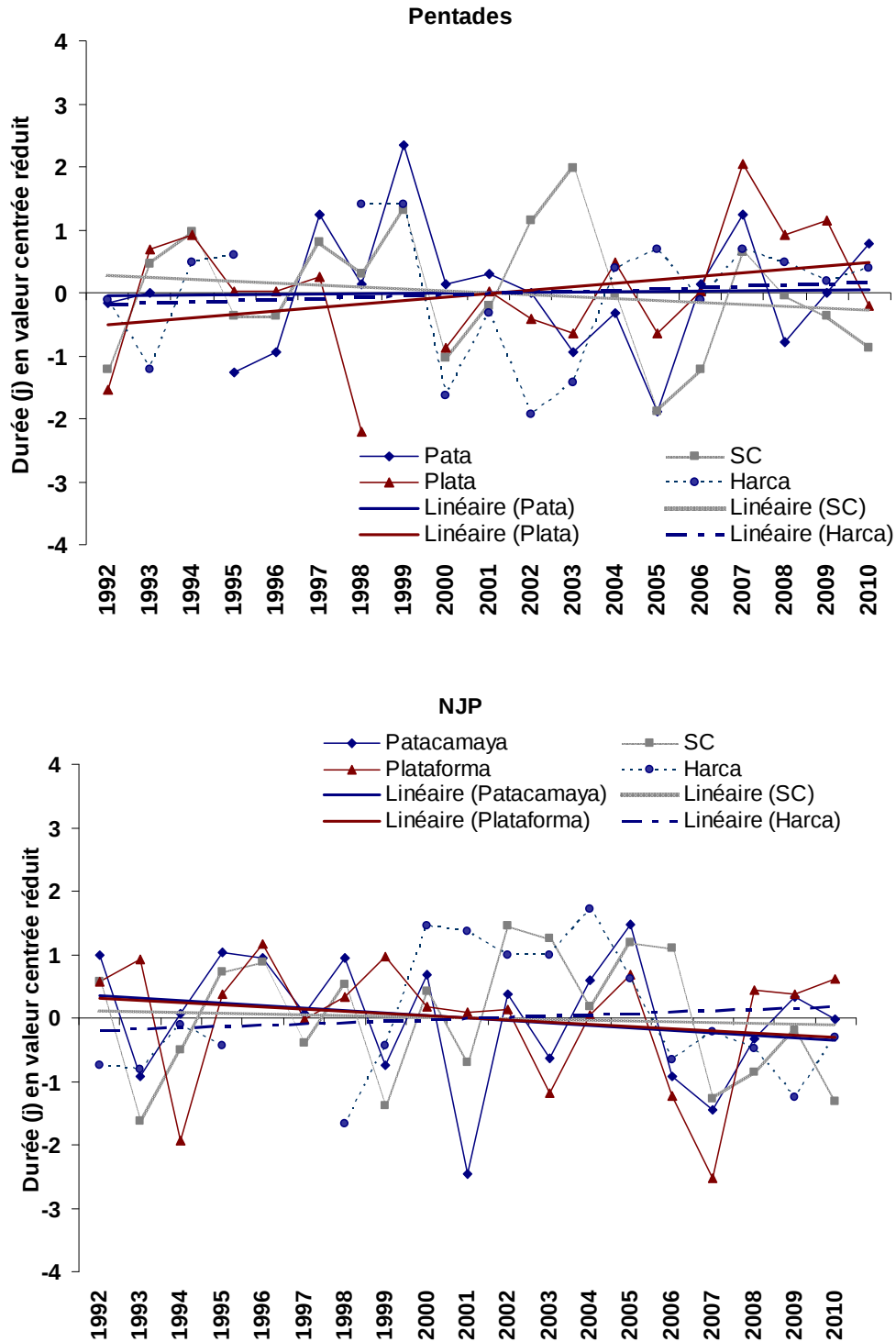


Figure IV 19.- Tendances linéaires représentées en valeurs centrées réduites de la durée de la saison des pluies selon les méthodes de Pentades (en haut) et NJP (en bas) sur la période 1992-2010 (19 points)

L'examen de la précipitation durant la saison des pluies montrent de la même manière de faibles tendances aux quatre pluviomètres. Néanmoins, nous pouvons noter les principales remarques :

- Patacamaya et San Calixto présentent une tendance nulle avec les deux méthodes
- Plataforma montre une tendance positive selon les deux méthodes, en ayant un gradient moyen d'environ 9.2 mm/an
- Harca présente une tendance plutôt positive selon les deux méthodes, en ayant la plus forte tendance de la saison des pluies. Le gradient moyen est de 33,5 mm/an.

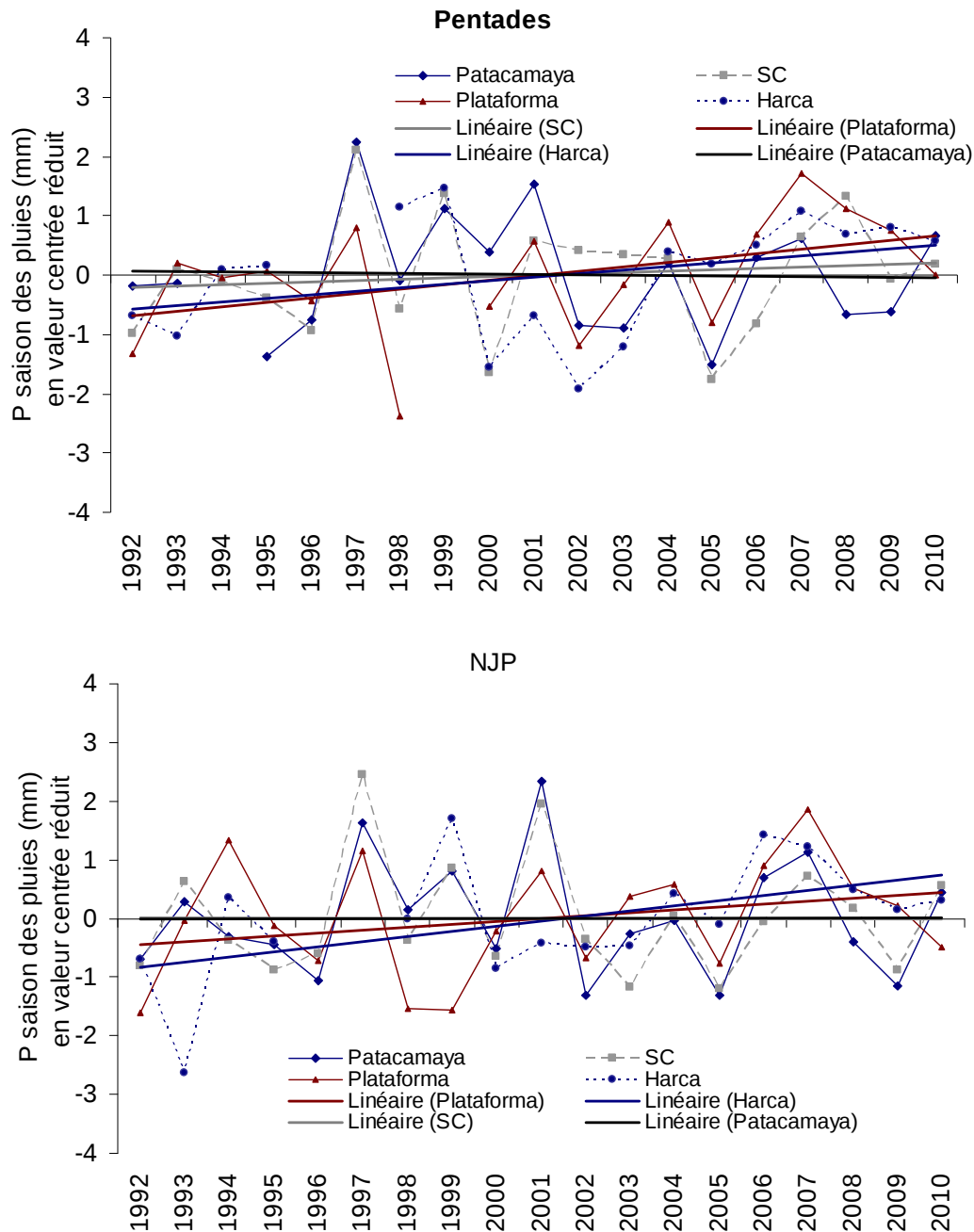


Figure IV.- 20.- Tendances linéaires interannuelles représentées en valeurs centrées réduites de la pluie durant de la saison des pluies selon les méthodes de Pentades et NJP (1992-2010).

Aucune tendance significative ni sur la durée de la saison des pluies ni sur le total pluviométrique n'est discernable, sur aucune des 4 stations au cours de notre période d'étude 1992 -2010.

IV.5 ANNEES SECHES ET ANNEES HUMIDES

Dans la section III.3.4 nous avons fait une description des années sèches et humides par rapport au cycle moyen. Cette description qualitative suggérait que la saison des pluies tendait à être plus longue pendant les années humides et plus courte pendant les années sèches, cependant ces résultats restaient à être quantifiés. Dans ce sous-chapitre nous allons regarder si des méthodes plus objectives de détermination de la durée de la saison des pluies comme celles des Pentades et du NJP peuvent permettre de mieux quantifier cette relation entrevue au Chapitre III.

IV.5.1 Cas des années typiquement humides (1997 et 2001)

Patacamaya montre que durant ces deux années (1997 et 2001) caractérisées comme humides, la durée de la saison des pluies – comme précédemment on entend ici par *saison des pluies*, le cœur de la saison – est en général plus long selon les deux méthodes.

Durant l'année 1997 (caractérisée comme la plus humide de toute la chronique de 19 ans) les méthodes des pentades et NJP présentent une différence de 8 et 40 jours, respectivement, par rapport à leur moyenne interannuelle ; c'est-à-dire que la durée de la saison de pluies contient 8 jours de moins (NJP) et 40 jours de plus (Pentades) que ses moyennes annuelles de 19 ans. La diminution de 8 jours est considérée peu significative. En revanche, on note une augmentation de la durée plus significative (40 jours) selon la méthode des pentades. Durant l'année 2001 (caractérisée comme la troisième année la plus pluvieuse), la méthode des pentades présente de faibles écarts par rapport à la moyenne (10 jours), cependant la méthode NJP révèle un plus fort écart en montrant une augmentation de 27 jours.

Durant l'année 1997, San Calixto montre une durée similaire (environ 130 jours) selon les deux méthodes, en révélant une différence de 24 jours de plus (Pentades) et de 17 jours de plus (NJP) par rapport à ses moyennes. Durant l'année 2001 nous voyons une faible diminution de la durée, mais ces valeurs sont autour de la moyenne et donc peu significatives.

Plataforma révèle durant l'année 1997 une durée de la saison des pluies de 110 jours selon la méthode des Pentades et de 154 jours selon la méthode des NJP, pour une moyenne interannuelle de 111 et 130 jours respectivement, soit des écarts de -1 et +24 jours par rapport à la moyenne. Une variation similaire est observée durant l'année 2001 ; 19 jours de plus selon la méthode de NJP, mais une diminution de 6 jours, selon les Pentades.

A Harca nous analysons l'année 1999 au lieu de l'année 1997, car 1997 présente trop de lacunes. L'année 1999 est pour ce pluviomètre la deuxième année la plus humide par rapport à la moyenne et présente une bonne série de données journalières. Durant cette année nous observons une augmentation de la durée de 80 jours selon la méthode des Pentades et de 2 jours selon la méthode NJP. L'année 2001 présente des écarts plus faibles que l'année 1999. Les deux méthodes montrent une diminution de 5 et 9 jours respectivement par rapport à ses moyennes. Ainsi, nous pouvons dire qu'à cette station il y a une variation faible durant l'année 2001. L'année 1999 est caractérisée comme une année bien humide (Fig.III.5), qui correspond ici bien à une longue durée de la saison des pluies révélées par la méthode de Pentades (+80 jours par rapport à la moyenne).

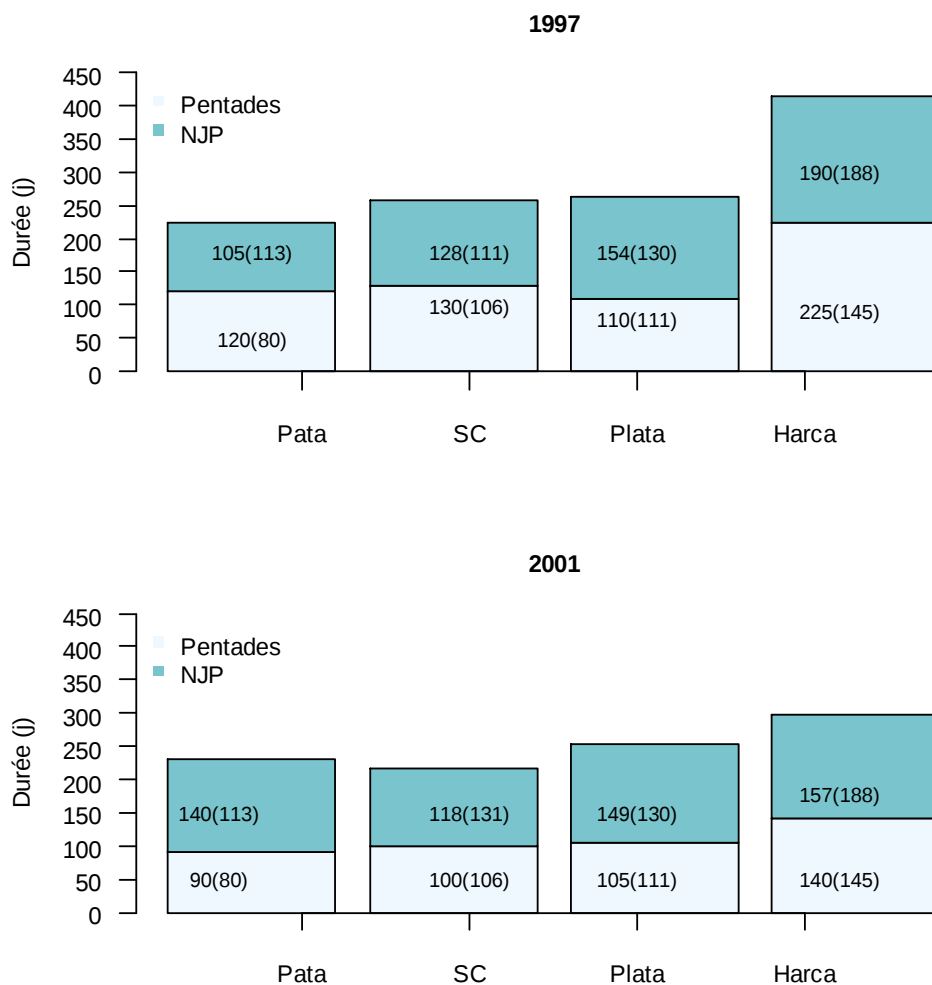


Figure IV.- 21.- Durée cumulée des années humides : 1997 (en haut) et 2001 (en bas) à Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca. Les chiffres représentent la durée de chaque année selon la méthode des pentades (bleu clair) et la méthode NJP (bleu foncé); la moyenne interannuelle des 19 ans (1992-2010) est indiquée entre parenthèse. Pour le pluviomètre d'Harca nous montrons l'année 1998-99 au lieu de l'année 1997

En résumé il est confirmé que la durée de la saison des pluies durant les années humides est en général plus longue que la moyenne de 19 ans,

cependant cela reste lié à la méthode utilisée. Par exemple durant l'année 1997 selon la méthode de Pentades, la durée sur l'Altiplano présente une augmentation comprise entre 25 j (San Calixto) et 40 j (Patacamaya). Par contre, selon la méthode NJP cette augmentation varie entre 20j (Patacamaya) et 25j (San Calixto). Cette durée plus longue est plus visible durant l'année 1997 qui montre des écarts plus forts par rapport aux moyennes annuelles que durant l'année 2001. De plus, nous constatons que l'augmentation de la durée est causée par une DDP plus à l'avance que la moyenne. En dépendant la méthode et l'année en étude, la DDP peut en varier de 1 à 20 jours plus à l'avance que la moyenne sur les stations de l'Altiplano et Plataforma. A Harca les écarts selon les méthodes sont plus forts, en ayant une variation en dépendant l'année de 1 à 30 jours.

Dans le chapitre III.3.1 nous avons montré qu'en général ces deux années présentent une augmentation annuelle comprise entre 10 et 20% sur les trois premiers pluviomètres et d'environ 40% à Harca. Cette augmentation est causée d'une part par une durée de la saison des pluies plus longue que la moyenne (en dépendant l'année et la méthode), et d'autre part par une intensité des pluies plus forte durant le cœur de la saison des pluies. Par exemple, pour l'année 1997 et selon la méthode de Pentades ; durant le cœur de la saison des pluies à Patacamaya il y a une augmentation de 49mm (+55%) par rapport à la moyenne qui présente un total de 34.2 mm. Cette augmentation est plus faible durant l'année 2001, en montrant une hausse de 34.2mm (+30%).

IV.5.2 Cas des années typiquement sèches (1992 ; 2002 et 2005)

La Fig. IV.-22 montre la relation entre la moyenne annuelle de 19 ans de la durée de la saison des pluies et la durée des années typiquement sèches, à savoir l'année 1992 (la deuxième plus sèche de la chronique), l'année 2002 et l'année 2005 (année la plus sèche de la période de 19 ans) selon les méthodes de Pentades et NJP.

Durant l'année 1992 les quatre pluviomètres présentent une durée de la saison des pluies plus courte par rapport à la moyenne. Patacamaya, San Calixto et Plataforma montrent une durée similaire de l'ordre de 73 jours, par contre Harca présente une durée plus longue de 150 jours (Pentades) et 187 jours (NJP). Les écarts aux moyennes pour ces pluviomètres sont faibles en montrant une diminution de 3 jours (NJP) et une augmentation de 14 jours (Pentades) par rapport à ses moyennes. Néanmoins la diminution de la durée de la saison des pluies aux premiers trois pluviomètres est notable. Cette diminution varie entre 30 et 40 jours selon la méthode.

En 2002, les résultats obtenus sont beaucoup moins univoques. A Patacamaya, la méthode des pentades présente une durée de 79 jours et la méthode des NJP une durée de 94 jours. Les écarts à ce pluviomètre sont faibles et montrent une diminution par rapport à la moyenne de 19 jours selon le NJP et de seulement 1 jour selon les Pentades. A San Calixto la méthode des Pentades indique une augmentation de 34 jours par rapport à

sa moyenne (le plus fort écart en comparant avec Patacamaya et Plataforma). Le NJP présente une durée proche de la moyenne ; moins de 5 jours de différence. Plataforma présente une durée plus longue que la moyenne ; augmentation de 10 jours (NJP) et une diminution de 16 jours (Pentades). Et finalement à Harca nous observons les plus forts écarts par rapport à la moyenne des autres pluviomètres. Les deux méthodes ont une durée plus courte par rapport à sa moyenne d'environ 60 jours (Pentades) et de 24 jours (NJP).

L'année 2005 a un comportement très proche de 1992, se caractérisant par un net raccourcissement du cœur de la saison des pluies pour les trois stations de la région Altiplano-Cordillère et un signal moins net à Harca (une méthode voit un raccourcissement et une méthode voit un allongement).

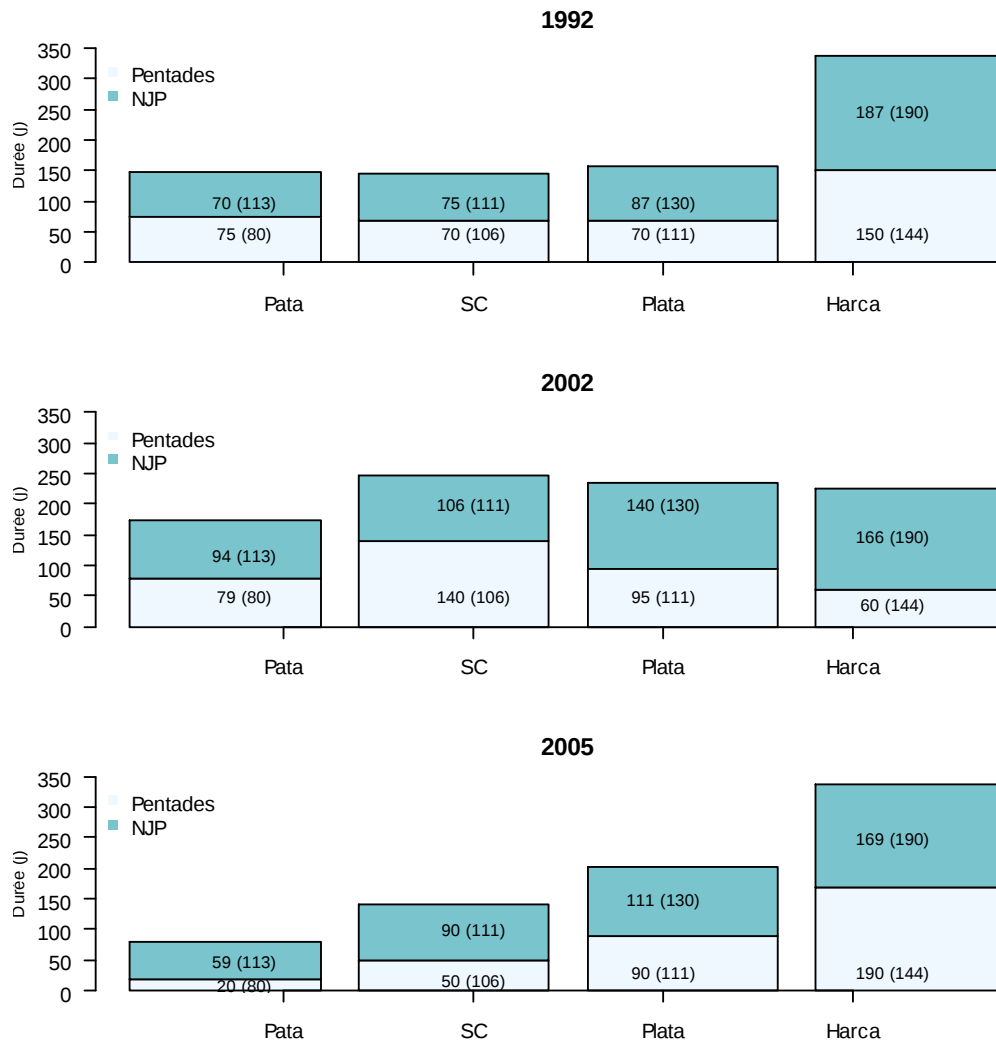


Figure IV 22.- Durée cumulée des années humides : 1992 (en haut), 2002 (au milieu) et 2001 (en bas) à Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca. Les chiffres représentent la durée de chaque année selon la méthode des pentades (bleu clair) et la méthode NJP (bleu foncé) ; la moyenne interannuelle des 19 ans (1992-2010) est indiquée entre parenthèse.

Depuis l'analyse des années déficitaires nous pouvons dire que la durée du cœur de la saison des pluies est plus courte que la moyenne. Cependant certaines années comme le 2002, la durée montre une variation autour à la moyenne et cette diminution du cœur n'est pas ainsi notable surtout à San Calixto et Plataforma. Il faut noter que Patacamaya et Harca sont les stations qui contiennent la plus faible précipitation de tous les pluviomètres durant cette année (Fig.-III.8) et sont les stations qui présentent une forte diminution de la durée durant cette année. Donc, nous pouvons supposer que plus fort est le déficit de précipitation annuelle plus courte est la durée de la saison des pluies.

Cette faible précipitation est causée d'un part par une diminution de la durée de la saison des pluies (comme pour les années humides la proportion va dépendre de l'année et la méthode) et d'autre part par la diminution de l'intensité de la précipitation journalière. Par exemple, l'année 1992 la station de Patacamaya montre qu'entre janvier et avril il y a une baisse d'environ 60% par rapport à la moyenne (d'un cumul de 156mm à 62mm). L'année 2002 montre qu'Harca présente une diminution de 215 mm (de 315mm à 99mm), qui représente moins 25% de précipitation durant le cœur de la saison des pluies. Un autre exemple est l'année 2005, où Plataforma exprime une diminution de 15% durant le cœur de la saison des pluies. Avec ces exemples nous pouvons affirmer qu'une diminution de précipitation durant le cœur de la saison des pluies provoque un déficit de la précipitation annuelle. Durant l'installation de la saison de pluies et la saison sèche cette diminution n'est pas assez significative sur la pluie annuelle, à cause des faibles intensités de pluies (Fig.IV.1)

IV.6 CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Les conclusions du chapitre sont les suivantes.

En considérant la pluie journalière, on a remarqué que des événements précipitatnts ayant des intensités significatives peuvent être observés au mois d'août, mois au cours duquel se produit souvent une augmentation progressive de la pluie (début de l'installation de la saison des pluies). Cela justifie notre choix de faire commencer l'année hydrologique au 1^{er} août ce qui n'est pas classiquement fait.

Les seuils et les critères appliqués pour déterminer la durée de la saison des pluies ont été basés sur une analyse détaillée suivant une étude de sensibilité à partir du cycle moyen de 19 ans. Différentes méthodes et critères ont été utilisés pour calculer la durée du cœur de la saison des pluies. Trois méthodes sur 4 (pentades, NJP et PIC) montrent que la saison des pluies arrive d'abord à la station de Harca et dans les 25 et 35 jours après aux stations de l'Altiplano (le nombre de jours de transition entre Harca et l'Altiplano va dépendre de la méthode).

Avec la méthode du NJP consécutifs, nous observons que la saison des pluies arrive d'abord à Patacamaya et San Calixto, du fait d'une plus grande fréquence de jours de pluie consécutifs pendant cette période d'installation de la saison des pluies à ces deux stations.

Les méthodes basées sur les intensités produisent une assez faible variabilité interannuelle de la durée de la saison des pluies ; de plus elles montrent une assez bonne relation avec la méthode NJP (surtout pour les stations de l'Altiplano), alors que la relation est médiocre avec la méthode de NJP consécutifs.

Les coefficients de détermination entre la pluie annuelle et les cumuls de l'installation et du cœur de la saison des pluies révèlent que sur les quatre pluviomètres le cœur de la saison de pluies contrôle la variabilité de la pluie annuelle. De, plus, nous pouvons noter que l'installation de la saison des pluies a une influence plus forte dans la vallée du Zongo que sur l'Altiplano.

La durée de la saison des pluies durant les années humides est en général plus longue que la durée moyenne ; cependant des différences existent selon la méthode utilisée. Aux pluviomètres de l'Altiplano et de Plataforma cette augmentation en nombre de jours de la durée varie de 20 à 50% pour l'année 1997 (cumul annuel supérieur de 15 à 30% au cumul moyen) et de 10 à 15% pour l'année 2001 (cumul annuel supérieur de 10 à 15% au cumul moyen).

Durant les années sèches, la majorité des méthodes indiquent une durée de la saison des pluies plus courte par rapport aux moyennes. Par exemple, l'année 1992 (cumul annuel inférieur de 15 à 40% au cumul

moyen) présente une diminution de la durée de la saison des pluies d'environ 35% aux pluviomètres de Patacamaya, San Calixto et Plataforma et d'environ 20% à Harca. L'année 2002 (cumul annuel inférieur de 10 à 30% au cumul moyen) présente aux pluviomètres de Patacamaya, San Calixto et Plataforma une diminution comprise entre 15% et 20%. Par contre, Harca montre une diminution de l'ordre de 50%. Finalement l'année 2005 (cumul annuel inférieur de 15 à 40% au cumul moyen) a clairement une courte saison des pluies sur les quatre pluviomètres avec une diminution de la durée comprise entre 20% et 50% selon la méthode.

Les méthodes *Pentades* et *NJP* sont celles qui montrent les résultats les plus cohérents, c'est-à-dire qu'elles donnent des durées assez proches entre elles et présentent moins de fluctuations erratiques d'une année sur l'autre. On peut donc considérer que ces deux méthodes sont à privilégier pour cette région.

CHAPITRE V

ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LES PROPRIETES DE LA SAISON DES PLUIES ET LE DEBIT DE FONTE ET LE BILAN DE MASSE GLACIAIRES

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des débits de fonte (Q_f) aux échelles annuelle et journalière et à leurs relations avec les propriétés de la saison des pluies.

Dans le chapitre IV nous avons défini l'année hydrologique comme allant de début août à fin juillet. Ce choix a été fait à cause des événements de précipitations assez fréquents en août qui peuvent influencer par effet d'albédo le bilan de masse glaciaire du mois de septembre et sont mal pris en compte dans l'année hydrologique conventionnelle (septembre-août). C'est donc cette année hydrologique d'août à juillet qui sera utilisée ici.

Des études précédentes [Sicart, 2002] révèlent une relation pour certaines années (par exemple 1998, année très particulière car il s'agit d'une année Niño), entre la durée de la saison de pluie et le débit de fonte où la durée plus courte peut causer l'augmentation de la fonte du glacier. Ainsi, nous cherchons à identifier cette relation de manière systématique pour l'ensemble de la chronique des débits disponibles (1992 à 2010).

Ce chapitre est composé de trois sections.

Dans un premier temps, nous tenterons de séparer les débits provenant de la moraine et les débits de fonte du glacier, alors qu'on ne dispose que d'une mesure unique intégrant ces deux composantes. Nous serons amenés pour cela à faire des hypothèses assez fortes concernant les débits issus de la moraine, l'objectif étant de sélectionner une chronique de débits de fusion unique pour l'analyse multi-variée de la suite du chapitre.

Dans une deuxième partie nous analysons les fluctuations temporelles des débits annuels et saisonniers. D'abord une analyse sur le cycle moyen de 19 ans est faite, afin de définir les périodes de forte et de faible fusion dans l'année. Ensuite, nous regardons les variations du débit de fonte à l'échelle annuelle. Cette analyse permet d'identifier les années extrêmes (fonte très élevée ou très faible). Les débits de ces années sont comparés à l'échelle journalière d'une part avec la précipitation et d'autre part avec le bilan de masse mensuel (nommée BM). De plus, nous étudions la variation du cycle moyen du débit de fonte entre les deux dernières décennies [1992-2000 et 2001-2009] afin d'identifier de possibles changements sur ce cycle. Cette analyse est similaire à celle décrite dans la section III.4.2. Finalement nous examinons les relations entre le maximum de débit de chaque année et l'arrivée du cœur de la saison de pluies (DDP), telle que définie au chapitre IV.2 par les méthodes des Pentades et du NJP.

Une troisième partie est consacrée à l'analyse des relations entre le débit de fonte, bilan de masse et propriétés de la saison des pluies de la station Plataforma. Au total six propriétés de la saison des pluies sont testées : quatre sont définies dans le chapitre IV (DDP, DFP, Durée et pluie saisonnières) et deux nouveaux indices sont définis et utilisés dans ce chapitre : concentration de la pluie, nommée I_c , et intensité de la pluie journalière en saison des pluies, nommée I_i . Nous appliquons ici les méthodes de Pentades et NJP car nous avons montré que ces méthodes sont les plus robustes pour caractériser la saison des pluies.

V.1.- CALCUL DES DEBITS DE FONTE DU GLACIER

L'émissaire du bassin versant collecte à la fois les écoulements provenant de la fonte du glacier et ceux provenant des moraines. Dans notre travail, nous nous intéressons à ceux provenant de la fonte du glacier (Q_f), soit :

$$Q_f = Q_{\text{Tubo}_4830} - Q_{\text{moraine}} \quad [\text{Eq.-V.1}]$$

Avec :

Q_f : Débit provenant de fonte du glacier (m^3/s)

Q_{Tubo_4830} : Débit de la station limnographique Tubo 4830 (m^3/s)

Q_{moraine} : Débit provenant de la moraine (m^3/s)

Le débit issu de la partie non glaciaire (Q_{moraine}) est estimé par le biais d'un coefficient d'écoulement (C_e), définissant la part de la précipitation moyenne sur le bassin qui parvient à son exutoire (Eq. V.2). En première approximation, ce coefficient est supposé constant, ce qui est une approximation acceptable pour des bilans annuels, mais peut paraître beaucoup plus contestable pour des bilans mensuels ou journaliers. Néanmoins nous n'avons pas les moyens ici de raffiner ce calcul. Comme nous allons voir ce débit issu de la moraine ne représente que 10 à 15% seulement du débit total à l'exutoire. Comme l'objectif de ce chapitre n'est pas de parvenir à une quantification précise des débits de fonte journalier, mais plutôt de caractériser le cycle saisonnier dans ses grandes lignes, nous considérons comme acceptable dans ce cadre l'hypothèse grossière d'un C_e constant pour calculer les débits de la moraine Q_{moraine} , soit :

$$Q_{\text{moraines}} = C_e * P * S \quad [\text{Eq.-V.2}]$$

Avec :

C_e : Coefficient d'écoulement

P : Précipitation journalière (m/s)

S : Surface de la moraine (m^2)

Pour appliquer l'équation V.2 au glacier de Zongo, nous utilisons les données de précipitations journalières (P) de la station de Plataforma. On considère également les changements annuels de surface de la moraine (S), comme mentionné dans le chapitre II (Tableau II.2). Les deux valeurs

extrêmes utilisées pour C_e dans des travaux antérieurs sont de 0,5 et de 0,8. La valeur de 0,8 correspond aux sédiments quaternaires d'origine glaciaire [Ribstein et al., 1995, Sicart, 2002, Soruco, 2008] et la valeur de 0.5 est celle qui résulte de l'étude de modélisation effectuée par Lejeune [2010] avec le modèle Crocus. Une valeur de 0.56 a été aussi employée sur les bassins hydrologiques de Tuni Condoriri [Ramirez, et al., 2007, Soruco, 2008] qui sont proches du bassin versant du Zongo. Cette dernière valeur a été obtenue en considérant les valeurs empiriques relatives à chaque type de sédiments et en les pondérant par les surfaces des ensembles géologiques rencontrées sur ces bassins versants. Les deux valeurs extrêmes de 0.8 et 0.5 correspondent à des proportions de pluie infiltrée ou évaporée allant de 20% à 50%. Nous avons donc calculé les débits issus de la moraine à partir de ces deux valeurs de coefficient d'écoulement de 0.5 et 0.8.

Les résultats obtenus montrent que les débits de fonte journalière présentent 8% (556 points) de valeurs incohérentes (valeurs négatives) avec un coefficient d'écoulement de 0.8 (c'est-à-dire que pour ces journées le débit issu de la moraine est estimé comme supérieur au débit mesuré à la station). En revanche, avec un coefficient de 0.5 ces valeurs incohérentes représentent seulement 3.5% (256 points) de la série totale. En moyenne avec un $C_e=0.5$ nous avons un débit de fonte de $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ et avec un $C_e=0.8$ un débit de $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une différence de moins de 4% en volume annuel. Au niveau mensuel, la différence entre les deux calculs ne dépasse pas 6%.

Si on s'intéresse maintenant au cycle moyen annuel sur les 19 années considérées – et non plus à la chronologie sur ces mêmes 19 années, on constate (Fig.-V.1) sans surprise qu'en période de très faible précipitation (août à octobre et avril à juillet), le débit de fonte est pratiquement égal au débit enregistré à la station. Par contre de novembre (jour 90) jusqu'à janvier (jour 150), la moyenne du débit de fonte journalier est de $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ($C_e=0.5$) et $0.21 \text{ m}^3/\text{s}$ ($C_e=0.8$), et la moyenne du débit mesuré à Tubo 4830 est de $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$. C'est entre janvier et la fin de mars (jour 240) que l'on note les écarts les plus forts de toute l'année. La moyenne des débits de fonte est de $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $C_e=0.5$, ($0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un $C_e=0.8$) alors que la moyenne à l'exutoire est de $0.19 \text{ m}^3/\text{s}$; sur cette période le débit lié aux apports de la moraine avoisine donc 20% du total. En résumé, sauf pour la cette dernière période de janvier à mars, la station 4830 mesure des écoulements provenant essentiellement de la fonte du glacier.

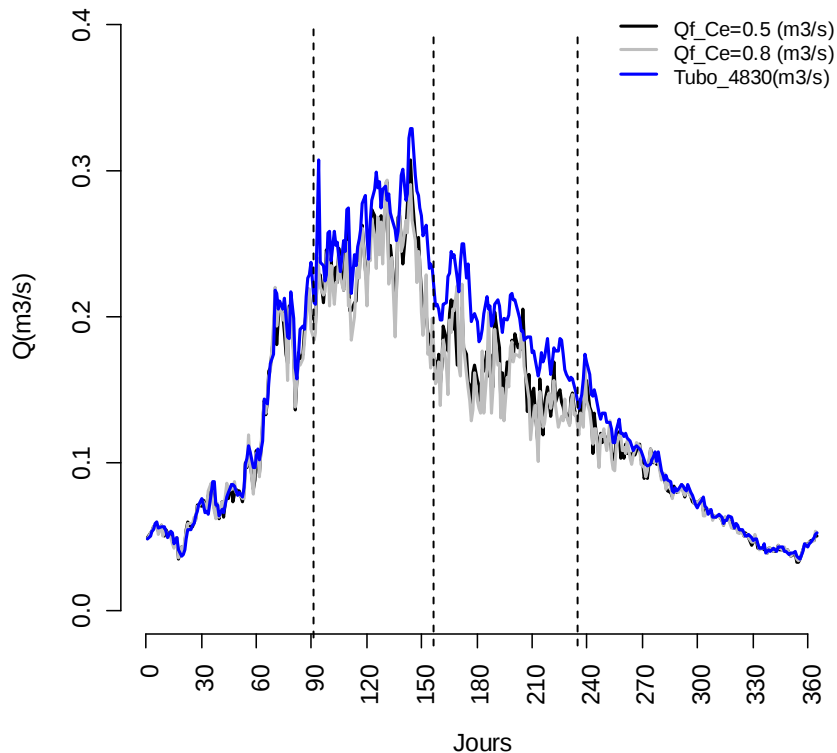


Figure V 1.- Cycle moyen des débits de fonte calculés avec un $Ce=0.5$ [Lejeune, 2010], $Ce=0.8$ [Ribstein, 1995] et débits de la station 4830 [$Q_f+Q_{morraine}$]. Moyenne sur la période 1992-2010. Les lignes pointillées montrent la séparation des périodes où il y a les écarts plus forts entre les trois débits

En moyenne sur l'année, la différence de débit de fonte obtenu selon que l'on utilise un coefficient d'écoulement égal à 0.5 ou à 0.8 n'est pas significative (moins de 2%). Considérant la plus faible quantité de valeurs nulles (valeurs au dessous de 0), nous utilisons dans ce chapitre les Q_f calculés avec un $Ce=0.5$ (300 valeurs non nulles de moins qu'avec un $Ce=0.8$).

V.2- DESCRIPTION DU CYCLE MOYEN SAISONNIER

Quatre phases ressortent du cycle saisonnier moyen des débits de fonte (Fig. V.-2) : i) une phase de faibles débits comprise entre les jours 1 et 60 (1 août et 29 septembre) ii) une augmentation graduelle depuis le jour 60 (29 septembre) jusqu'au pic maximum de l'année ($0.32 \text{ m}^3/\text{s}$), vers le jour 145 (23 décembre) iii) une diminution abrupte depuis ce pic entre les jours 145 et 165 (23 décembre et 12 janvier). iv) une diminution lente et progressive comprise entre le jour 165 et 365 (31 juillet). Ces quatre phases sont bien visibles sur le cycle moyen (1992-2010). En revanche, nous nous intéressons à la fluctuation de débits en termes de dérivée, c'est-à-dire à

l'augmentation et à la diminution des débits au cours de l'année, et pas à la description détaillée du cycle moyen.

Dans la Fig. V.2, nous notons que la période entre les jours 1 et 145 (pic maximum de l'année) correspond à la période de plus forte fusion annuelle : nommée dans le texte période 1. A partir de ce jour, nous notons une diminution de débits jusqu'à la fin de l'année hydrologique (dans le texte nommée période 2). Ainsi, pour l'analyse temporelle de débits dans ce chapitre, nous considérons seulement ces deux phases.

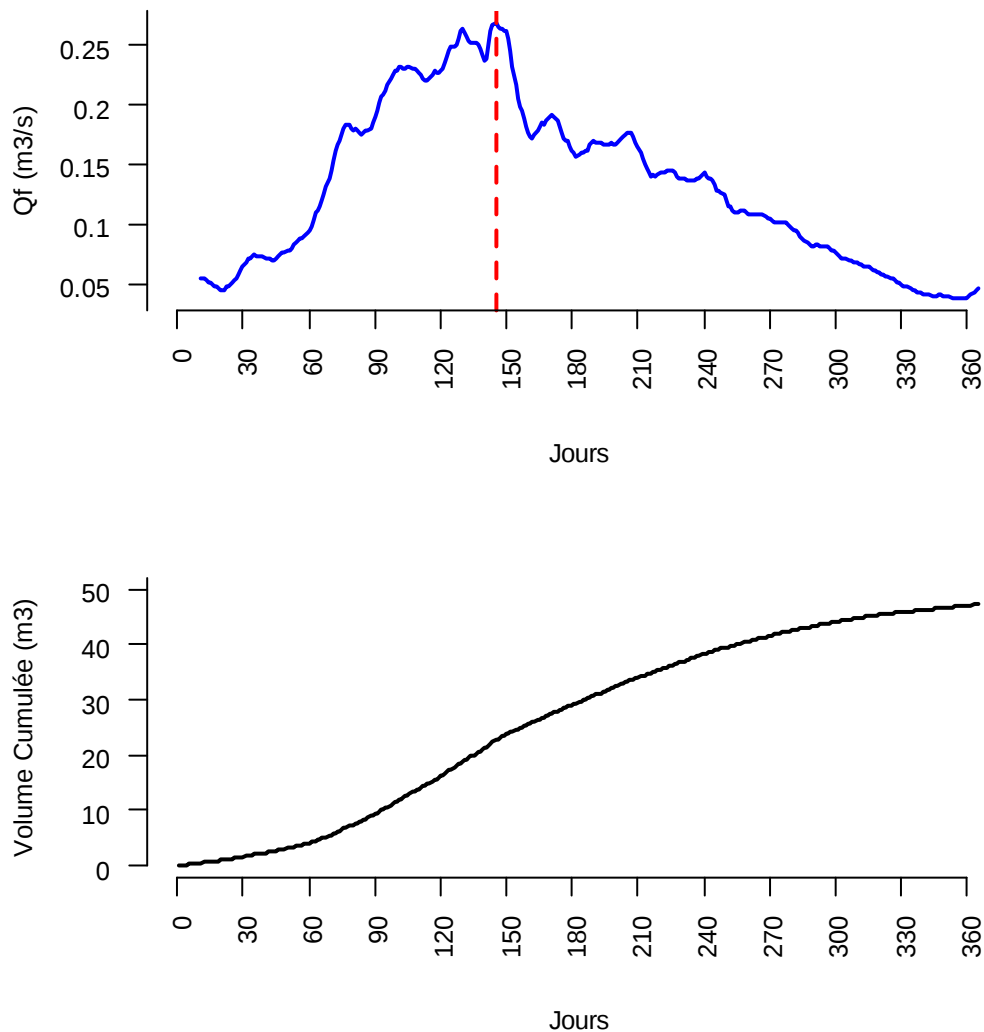


Figure V 2.- En haut le cycle moyen de débits de fonte (1992-2010) représenté en moyenne glissante de 11 jours. La ligne rouge pointillée représente le pic maximum du cycle moyen (jour 145, 23 décembre), et qui sépare la période 1 et 2 (voir texte). En bas, le cumul du volume de fonte du cycle moyen (1992-2010). Jour 1 = 1^{er} août

La période 1 dure 145 jours pour le cycle annuel moyen, ce qui en lame écoulée représente 2535 mm, soit un débit moyen journalier de 0,13 m^3/s . Ainsi le débit de fonte, la période 1 représente 48% du volume annuel pour seulement 40% du temps (Tableau V.1). Une sous-période dans la

première période (19-octobre et 23 décembre), contient 38% du volume total annuel, et 65% du volume total de la période 1. La période 2 dure 220 jours avec une lame écoulée de 1863mm et une moyenne journalière de 0,11 m³/s. Cela représente 52% du volume de fonte total annuel pour 60% du temps.

De plus, les écarts types de la première et de la deuxième période ainsi que sur l'ensemble de la période indiquent une variabilité saisonnière faible. Une description du processus qui affecte la fusion du glacier est décrite dans la Fig.4 du chapitre d'introduction de la thèse (voir p. 4).

Tableau V 1.- Statistiques du cycle moyen de débits de fonte (moyenne de 1992-2010).
Période 1 : Période d'augmentation de la fusion jusqu'au maximum annuel (1 août au 23 décembre. Période 2 : période de diminution des débits (23 décembre - 31 juillet).

	% Par rapport au Qf total	Moyenne journalière (m ³ /s)	Volume d'eau (mm)	écart type (m ³ /s)
Periode1 (jour 1-145)	48%	0,16	2535	0,08
Periode2 (jour 145 – 365)	52%	0,11	1863	0,05
Qf moyen (m3/s)		0,14	2089	0,06

Suite à cette analyse nous pouvons dire que le cycle moyen de débits de fonte présente deux périodes bien marquées : i) une première période caractérisée par une augmentation de la fusion et qui participe à 48 % du volume d'eau annuel de fusion en moyenne (1 août – 23 décembre) ii) une seconde période qui correspond à une diminution progressive de débits et s'étend du 23 décembre jusqu'au 31 juillet. De plus nous notons une « sous – période » de forts débits à l'intérieur de la première période (comprise entre octobre et décembre) avec 65% du volume écoulé de cette période et 38% du volume d'eau annuel.

V.3 ANALYSE INTERANUELLE DE LA DUREE ET DU VOLUME DE FONTE DE LA PERIODE DE PLUS FORTE FUSION.

Pour obtenir la durée de la période 1 année par année, nous considérons le début de cette période au premier août et la fin au pic maximum de débits, c'est à dire le point où s'amorce la diminution des débits. Pour lisser le fort bruit journalier, nous utilisons la méthode des Pentades qui est expliquée dans le chapitre IV.2 et qui fut utilisée pour déterminer la durée de la saison de pluies. Cette méthode permet d'avoir une série lissée de données avec une moyenne tous les 5 jours. La période 2 est le complément annuel en nombre de jours pour aller à 365 j. La méthode des pentades est une bonne méthode pour l'identification de la durée de la période 1, car le pic maximum de débits est facile à reconnaître. Cependant, des années comme : 1993, 1999, 2007 ou 2010 présentent deux ou trois pics maximums au cours de l'année. Un cas particulier est aussi l'année 1998 qui présente un débit maximum constant entre le 8 décembre et le 6 février. C'est pourquoi, durant ces années nous avons choisi le pic qui est suivi par une diminution progressive de débits.

La variabilité interannuelle de la durée de la période 1 selon cette méthode, est montrée dans le tableau V.2. Nous voyons que les années 1998, 2003 et 2007 sont celles avec la durée plus longue et les années 1995, 1996 et 2010 sont celles avec la durée plus courte de toute la période. La moyenne interannuelle est de 134 jours (du 1^{er} août au 12 décembre) avec une variabilité interannuelle moyenne (Ecart type=23.66). La durée de la première période de la moyenne interannuelle à une différence de 10 jours avec celle du cycle moyen (Fig.- V.2).

Tableau V 2.- *Durée interannuelle de la période 1, valeurs obtenues avec la méthode de Pentadesj*

Année	Durée (j)
1992	145
1993	150
1994	130
1995	130
1996	100
1997	100
1998	190
1999	140
2000	130
2001	125
2002	120
2003	165
2004	135
2005	135
2006	110
2007	170
2008	150
2009	130
2010	103
Moyenne	134,7
Ecart type	23,6

La Fig. V.-3 exprime la variation du pourcentage de la quantité d'eau écoulée durant la première période par rapport au volume d'eau total annuel. Pour 17 ans sur les 19, les volumes cumulés de la période 1 représentent entre 35% et 50% des volumes totaux annuels. Les années 1998 et 1999 montrent un pourcentage supérieur à 50% avec un maximum de 65 % pour l'année 1999. Ces deux années sont celles ayant la plus forte fusion de la chronique de 19 ans (Fig.-V.5). L'année 2010 est celle qui présente le pourcentage plus faible de volume d'eau écoulé durant la période 1: la période 1 ne représentant que 27% du débit annuel. Ces années (1998, 1999 et 2010) apparaissent vraiment comme des années particulières et cela se confortera dans la suite du chapitre. En général, le coefficient de variation (CV=0.2) de ces pourcentages révèle une variabilité interannuelle moyenne.

Finalement nous voyons que la moyenne interannuelle du pourcentage de débits de fonte de la période 1 est de 43%, proche de celle du

cycle moyen ; 48% (Tableau. V.-1). Cette observation est similaire à celle faite sur la durée de cette période, où nous montrons que la moyenne annuelle de la durée présente seulement une différence de 11 jours avec celle du cycle moyen.

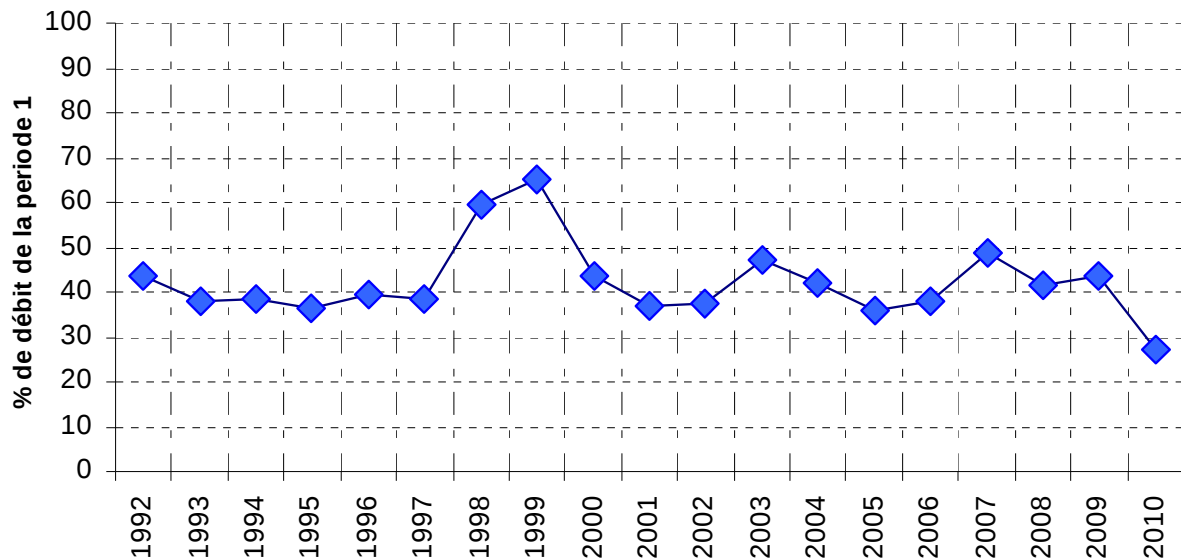
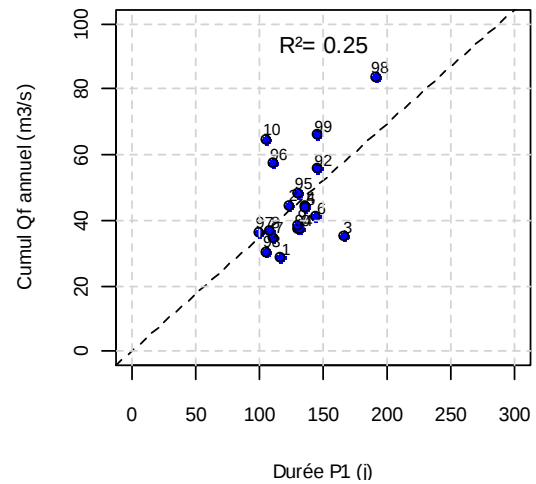
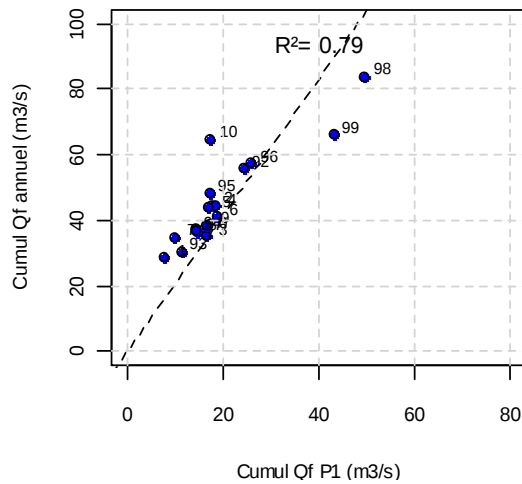


Figure V 3.- Fluctuation interannuelle du pourcentage de débits cumulée durant la période 1 (depuis le 1^{er} août jusqu'au pic maximum de débit pour chaque année) par rapport au volume total d'eau annuel. Moyenne sur 19 ans : 43%, écart type = 8.5 % et CV=0.2.

Le débit de la période 1 explique environ 79% de la variance du débit annuel (Fig. V.-4). Les points qui ont les débits de fusion de la période 1 et de l'année les plus forts sont les points des années 1998 ($x=49.7\text{m}^3/\text{s}$; $y=83.7\text{ m}^3/\text{s}$), 1999 ($x=43.2\text{ m}^3/\text{s}$; $y=65.8\text{m}^3/\text{s}$) et 2010 ($x=17.5\text{m}^3$; $y=64.5\text{m}^3$). Si on enlève ces points le coefficient de détermination passe de 0.79 à 0.85. En revanche, le débit de la période 2 explique seulement 52% de la variance du débit annuel. Nous notons que les points les plus écartés de la droite de régression sont les mêmes que ceux de la période 1 ; 1998 ($x=34.4\text{m}^3$; $y=83,7\text{m}^3$), 1999 ($x=22.8\text{ m}^3$; $y=65.8\text{ m}^3$) et 2010 ($x=47.3\text{ m}^3$; $y=64.5\text{ m}^3$). En enlevant ces points la corrélation passe de 0.52 à 0.83

La durée tant de la période 1 que de la période 2 explique seulement 25% de la variance du débit annuel. Les points qui s'écartent le plus de la droite de régression pour la période 1 sont les années 1996 ($x=111\text{j}$; $y=57.4\text{m}^3$), 1998 ($x=191\text{j}$; $y=83.7\text{m}^3$), 1999 ($x=146\text{j}$; $y=65.8\text{ m}^3$) et 2010 ($x=106\text{j}$; $y=64.5\text{m}^3$). En enlevant ces points le coefficient de détermination passe de 0.25 à 0.67. La relation pour la période 2 est similaire, par contre si on enlève seulement l'année 1998 ($x=167\text{j}$; $y=83.7\text{m}^3/\text{s}$) le coefficient de détermination baisse automatiquement à 0.004, donc nous pouvons dire que la relation avec le débit annuel est nulle.

Période 1



Période 2

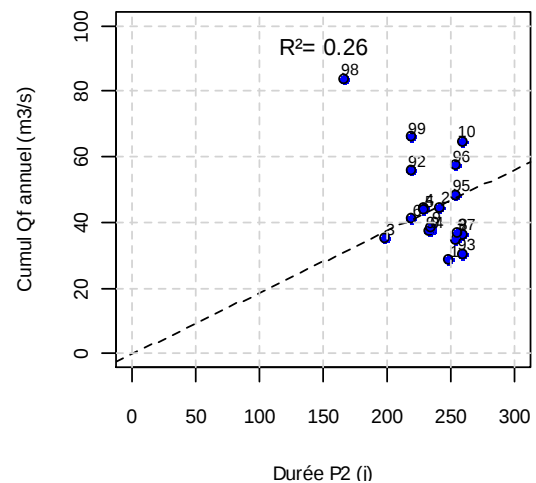
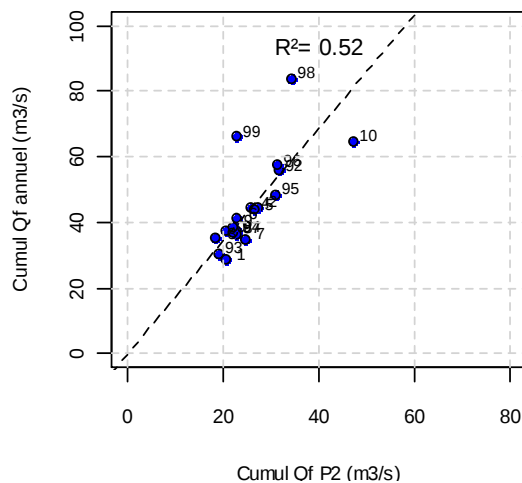


Figure V 4.- En haut : relations du débit annuel cumulé avec le débit cumulé de la période 1 (en haut à gauche) et avec la durée de cette période (en haut à droite). En bas : relations du débit annuel cumulé avec le débit cumulé de la période 2 (en bas à gauche) et avec la durée de la période 2 (en bas à droite). Les numéros donnent les années (91: 1991; 0 : 2000, et 10: 2010).

Ni la durée de la période 1, ni la durée de la période 2 ne sont bien corrélées au cumul de fonte annuel. Le cumul annuel est un peu mieux corrélé au cumul de la période 1 ($r^2=0.79$) qu'au cumul de la période 2 ($r^2=0.52$). Pour les deux périodes, les trois années 1998, 1999 et 2010 se distinguent des autres années. Ces années correspondent aux plus forts débits des 19 années étudiées. Les années 1998 et 1999 semblent caractérisées par un cumul durant la période 1 [période 2] plutôt excessif [faible] par rapport aux autres années. Au contraire, l'année 2010 semble caractérisée par un cumul plutôt trop faible pendant la période 1. De plus, l'année 1998 semble caractérisée par une durée plutôt longue de la période 1 (donc une durée courte pour la période 2) par rapport aux autres années.

On remarque que les années 1992, 1996, 2006 et 2010 ont une durée de la période 1 plutôt courte.

Ainsi, nous pouvons dire que c'est plus l'intensité de fonte durant la période 1 (surtout entre octobre et décembre) que la durée de cette période, qui contrôle la variabilité de la fonte totale.

Le volume d'eau écoulé durant la période 2 est aussi important, cependant il explique moins la variabilité annuelle du débit que la période 1. Par rapport à la durée, la première période présente largement plus de représentativité sur la variabilité annuelle que la durée de la période 2. Cependant la durée de la période 1 reste toujours faible pour expliquer la variabilité annuelle de débits.

V.3.1 Synthèse de la durée des périodes 1 et 2 des débits

Le tableau V.3 présente une synthèse des débits au cours des périodes 1 et 2. Selon l'année la durée de la période 1 peut varier de 100 jours (1996, 1997 et 2010) à 190 jours (1998). Sur toutes les années le volume d'eau de la période 1 est plus fort que celui de la période 2 (voir la Fig. V.-4). Les écarts types révèlent une variabilité interannuelle assez importante pour les durées de la première et de la deuxième période. Par contre, les volumes d'eaux de ces deux périodes montrent une variabilité interannuelle assez faible.

Les années 1998 et 1999 sont celles avec les débits de fonte plus hauts sur les 19 ans. Ces deux années coïncident avec celles considérées comme extrêmes, comme on le verra dans la section suivante.

Tableau V 3. Résumé des débits journaliers (sur la période 1992- 2010) : durée de la période 1 en jours, débit moyen sur la période 1 (du 1er août au débit maximum), débit moyen sur la période 2, débit maximum dans l'année, et débits annuel. En rouge les années caractérisées par un fort débit et en bleu les années caractérisées par un faible débit

	Durée Période 1 (j)	Débit moyen période 1 (m ³ /s)	Durée Période 2 (j)	Débit moyen période 2 (m ³ /s)	Qf max (m ³ /s)	Qf annuel (m ³ /s)
1992	145	0,2	220	0,15	0,65	0,17
1993	150	0,15	215	0,07	0,7	0,09
1994	130	0,13	235	0,13	0,53	0,11
1995	130	0,18	235	0,15	0,64	0,14
1996	100	0,27	265	0,15	0,65	0,16
1997	100	0,16	265	0,09	0,48	0,1
1998	190	0,33	175	0,15	0,96	0,23
1999	140	0,34	225	0,09	0,98	0,21
2000	130	0,14	235	0,11	0,46	0,1
2001	125	0,15	240	0,09	0,45	0,08
2002	120	0,14	245	0,13	0,71	0,13
2003	165	0,14	200	0,1	0,5	0,1
2004	135	0,18	230	0,12	0,56	0,12
2005	135	0,17	230	0,13	0,45	0,12
2006	110	0,18	255	0,12	0,57	0,12
2007	170	0,16	195	0,08	0,4	0,1
2008	150	0,12	215	0,09	0,57	0,1
2009	130	0,11	235	0,14	0,54	0,11
2010	103	0,16	262	0,18	0,5	0,17
Moyenne (j)	134,63	0,18	230,37	0,12	0,59	0,13
Ecart Type (j)	23,86	0,06	23,86	0,03	0,16	0,04

V.4 RELATIONS INTERANUELLES ENTRE LES VARIABLES CLIMATIQUES (PRECIPITATIONS ET TEMPERATURES) ET LES VARIABLES GACIOLOGIQUES (DEBIT DE FONTE, BILAN DE MASSE ET LA LIGNE D'EQUILIBRE)

V.4.1.- Variation interannuelle du débit de fonte

Nous faisons d'abord une analyse des variations interannuelles du débit de fonte entre les années 1992 et 2010, exprimées en valeurs centrées réduites, pour permettre une comparaison plus aisée avec d'autres variables (précipitations et bilan de masse). Les seuils de +0,8 et -0,8 ont été utilisés pour définir respectivement les années de forts (>0,8) et de faibles (<-0,8) débits (Fig. V.-5), ces mêmes seuils ayant été employés pour caractériser la précipitation dans le chapitre III : sous l'hypothèse d'une distribution normale, ils correspondent à considérer les 20% des débits les plus (resp. moins) élevés comme des débits «forts » (resp. « Faibles »).

Quatre années sont caractérisées par de forts débits (en rouge) : 1998 (+ 70%), 1999 (+ 43%), 2010 (+ 31%) et 1992 (+ 25%), et trois années par des faibles débits (en bleu) : 1993, 2001 et 2003 (débits de fonte compris entre -

20 et -35% par rapport à la moyenne). On remarque deux années de très forte fusion : 1998 et 1999.

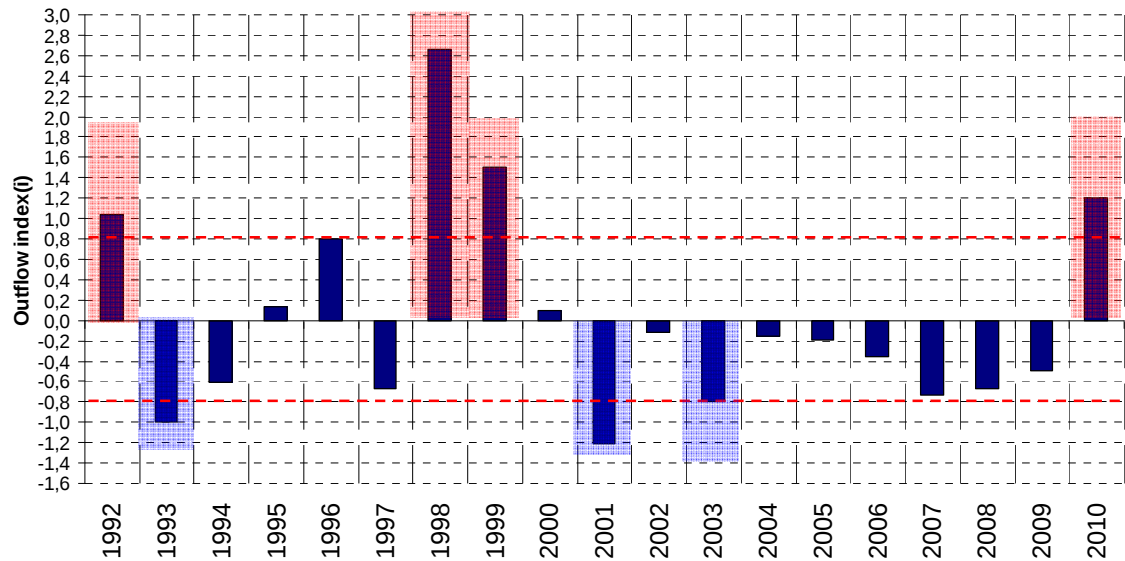


Figure V 5.- Variabilité interannuelle des débits de fonte exprimés en valeurs centrées réduites entre 1991/92 et 2009/10 (année hydrologique d'août à juillet). En rouge les années avec les plus forts débits (1992, 1998, 1999 et 2010) et en bleu des années avec les plus faibles débits : 1993, 2001, 2003 (l'année 2003 est à la limite inférieure du seuil 0.8 mais elle représente une des années avec le plus faible débit)

Le tableau V.4 présente les statistiques annuelles de la série de débits de fonte entre 1992 et 2010. La moyenne sur l'ensemble de la période montre un débit de fonte de 0.14 m³/s (correspondant à un volume moyen écoulé chaque année de 2089 mm) avec un écart type interannuel de =0.04 m³/s. Le coefficient de variation (CV=0.24) indique une variabilité interannuelle assez importante. Finalement cette série de données présente un débit maximum annuel de 0.24 m³/s (correspondant à un volume annuel de 3714 mm), pour l'année 1998 et un minimum de 0.09 m³/s pour l'année 1993 et 0.08 m³/s pour l'année 2001, qui correspondent à un volume annuel de 1423 et 1354 mm respectivement (années les plus extrêmes).

Tableau V 4.- Statistiques de la fluctuation interannuelle du débit de fonte sur la moyenne de 19 ans [1992-2010].

	Qf (m ³ /s)
Moyenne	0,14
Ecart-type	0,04
CV	0,26
max	0,24
min	0,10

Cette analyse à pas de temps annuel nous a permis d'identifier quatre années avec une fusion élevée (1992, 1998, 1999 et 2010) et 3 années avec une fusion plutôt faible (1993, 2001 et 2003). Ces années sont analysées en détail dans la section V.4.2 ci-après.

On s'intéresse maintenant aux relations annuelles entre les forçages climatiques (précipitations et température) et la réponse du glacier représentée par le débit de fusion, le bilan de masse et l'ELA (Fig.-V.6).

Le bilan de masse et l'ELA donnent une information similaire sur le glacier et sont fortement corrélés entre eux. La ligne d'équilibre remonte durant les années de bilan de masse négatif, car la zone d'ablation du glacier sera plus grande qu'en année de bilan nul (chapitre 1). Par contre, durant une année de bilan de masse positif la ligne d'équilibre descend et la zone d'ablation est réduite.

Les corrélations entre la précipitation et les variables glaciologiques montrent une relation plus forte avec le débit de fonte (-0.77) qu'avec le bilan de masse (0.67) et la ligne d'équilibre (-0.69). Ces trois corrélations sont significatives selon le test de Student au seuil de 95%.

En revanche, la température présente une relation non significative avec les variables glaciologiques. La corrélation la plus forte avec la température est observée avec le débit (0.62), soit 38% de variance interannuelle expliquée. En définitive, la température moyenne annuelle est une variable assez peu explicative du bilan de masse du glacier.

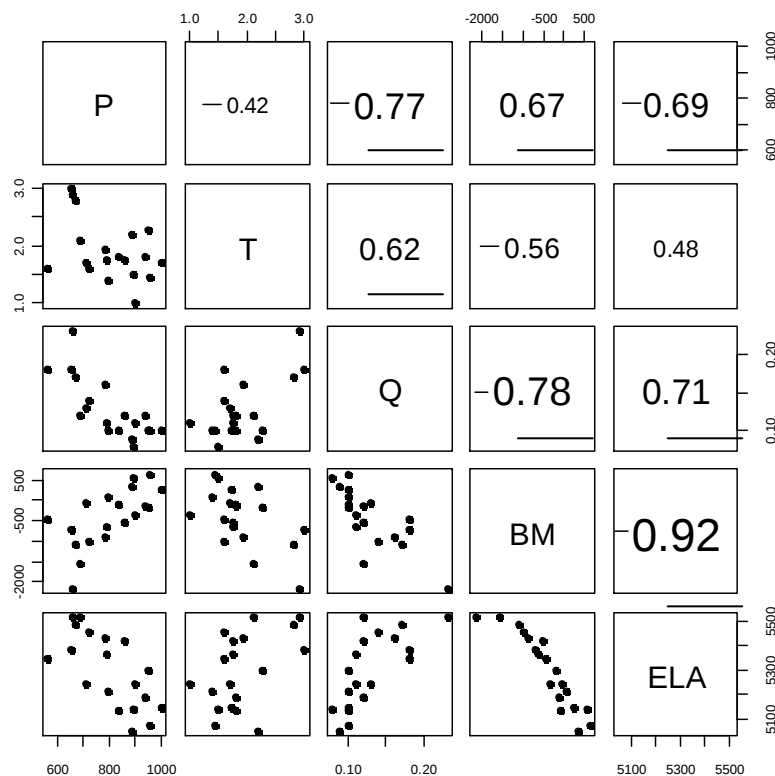


Figure V 6.- Matrice de corrélations entre la précipitation (P), la température (T), les débits de fonte (Qf), le bilan de masse (BM) et l'ELA sur la période (1992-2010). Les chiffres de la partie droite indiquent les valeurs de chaque coefficient de corrélation. La taille de la police est proportionnelle aux valeurs de la corrélation. En souligné les corrélations significatives à 95% de confiance.

En s'intéressant aux années extrêmes, on note que durant les années caractérisées par un fort débit (Tableau V.5) il y a une hausse marquée de l'ELA, surtout pour les années 1992 et 1998 (environ 200m par rapport à la normale). Par contre durant les années 1999 et 2010 cette augmentation de l'ELA est moins évidente avec +49 et +85 m respectivement. Sur les quatre années de forts débits (1992, 1998, 1999 et 2010) la précipitation révèle une diminution comprise entre 20 et 30% par rapport à la moyenne sur 19 ans. Le bilan de masse est inférieur à la moyenne surtout pour les années 1992 et 1998, alors que pour les années 1999 et 2010 le bilan de masse est situé près à la moyenne.

Les années ayant un faible débit montrent que l'ELA est plus basse que la moyenne (environ 160m), cela est lié à un bilan de masse plutôt positif, surtout pour les années 1993 et 2001. La précipitation durant ces années est excédentaire d'environ 10%.

Cette description faite au cas par cas sur les années particulières indique que les ordres de grandeurs de chaque variable, peuvent varier d'une année à l'autre et il peut arriver que durant une année de forte ou faible fusion le bilan de masse ne sera pas forcément fortement négatif ou positif, et l'ELA ne présentera pas forcément une forte variation en altitude. Par rapport à la température on peut voir que durant les années de forte ou de faible fusion cette variable présente seulement une légère variation. Par exemple, l'année 1998 qui est caractérisée par une forte fusion, une faible précipitation et un bilan de masse très négatif, il existe seulement une augmentation de 1°C par rapport à la moyenne (voir aussi Fig. II – 13). Cela confirme aussi que la température n'est pas une variable clé qui fait varier la fluctuation du bilan de masse du glacier.

Tableau V 5. Valeurs annuelles du bilan de masse, la ligne d'équilibre (ELA), le débit de fonte (Qf), la précipitation (P) et la Température (T). En rouge les années avec une forte fusion et en bleu les années avec une faible fusion.

Année	P (mm)	T (°C)	Qf (mm/an)	BM (mm. d'eau/an)	ELA (msnm)
1992	668	2,8	2628	-1092	5489
1993	887	2,2	1423	360	5047
1994	897	1	1654	-344	5243
1995	724	1,6	2107	-998	5454
1996	785	1,94	2538	-878	5430
1997	956	1,44	1647	649	5073
1998	664	2,9	3714	-2173	5517
1999	562	1,6	2938	-450	5347
2000	796	1,4	1696	76	5213
2001	893	1,5	1353	558	5139
2002	712	1,7	2039	-58	5246
2003	836	1,8	1620	-85	5137
2004	858	1,76	2038	-523	5422
2005	689	2,1	2034	-1560	5515
2006	938	1,8	1946	-122	5191
2007	953	2,27	1700	-173	5296
2008	1003	1,72	1766	257	5148
2009	791	1,76	1862	-630	5364
2010	723	3	2918	-718	5383
Moyenne	803	1,9	2085	-416	5297,6
Ecart type	125	0,5	606,40	719,7	151,7

Nous allons décrire ci-dessous les variations saisonnières du débit de fonte durant les trois années avec les plus forts débits (1998,1999 et 2010), et les trois années avec les plus faibles débits (1993, 2001 et 2003) pour ainsi vérifier les écarts avec le cycle moyen. Ces années ont été définies à partir de la Fig.- V.6. Ensuite, une analyse de ces années particulières sera conduite en comparant les débits de fusion, les précipitations et les bilans de masse.

V.4.2 Cycles moyens saisonniers des années de forte (1998,1999 et 2010) et de faible fusion (1993,2001 et 2003).

Les années de forts débits se démarquent de la moyenne à partir de début octobre, date à laquelle une augmentation brutale du débit de fonte est observée (Fig. V.-7). Le maximum se produit dans la dernière semaine de décembre à une date très proche de celle observée pour la moyenne des 19 ans, mais sa valeur étant environ deux fois supérieure à celle du maximum du moyen. Le débit décroît ensuite régulièrement jusqu'à l'étiage de début juillet. La moyenne de ces années révèle une augmentation durant la période 1 de 56% et de 54% durant la période 2 par rapport à la moyenne.

Lors des années de faibles débits (1993, 2001 et 2003) la fonte est moins intense tout au long de l'année. La première période est particulièrement plus faible et plus courte à cause d'un démarrage de la forte fusion ($> 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$) retardé d'un mois environ. Par contre le maximum est synchrone de celui de la courbe moyenne, et sa valeur n'est pas beaucoup plus faible – elle est même identique si on retire de la courbe moyenne les 4 années de très forte fonte. Par contre, la décroissance est beaucoup plus brutale juste après le maximum, ce qui entraîne un déficit d'écoulement également important durant la phase de décroissance. La moyenne de ces années révèle une diminution durant la période 1 de 28% et de 26% durant la période 2 par rapport à la moyenne.

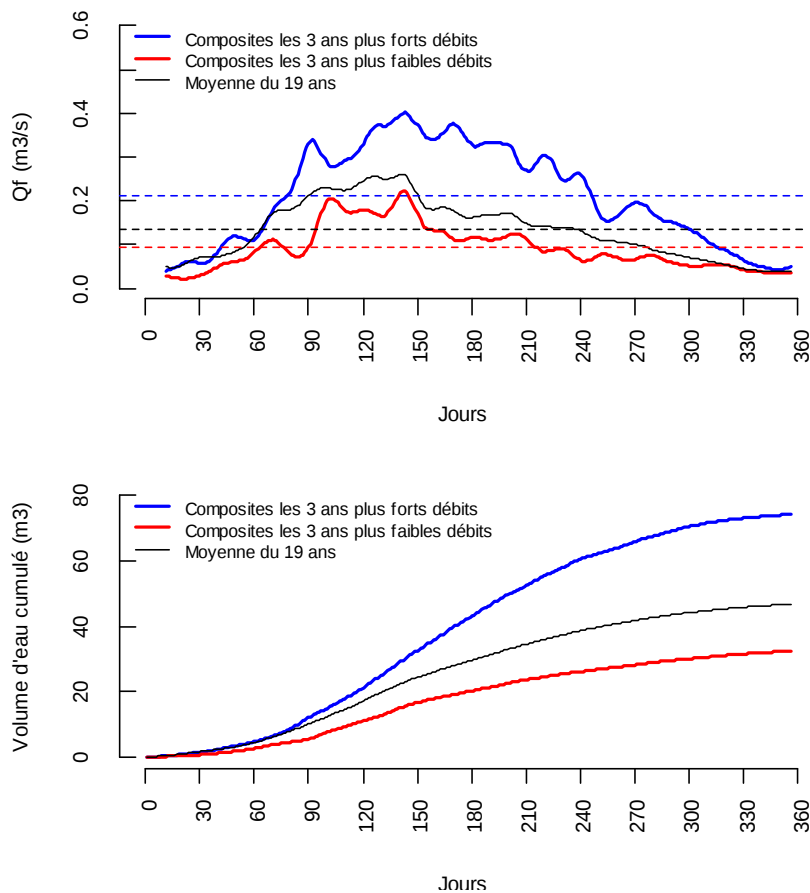


Figure V 7.- Fluctuation saisonnière de l'au de fusion en moyennes glissantes sur une fenêtre de 11 jours. En bleu, la moyenne des trois années qui présentent les débits les plus forts (1998, 1999 et 2010), en rouge, la moyenne des trois années avec les plus faibles débits (1993, 2001 et 2003) et en noir la moyenne sur 19 ans (1992-2010). Les traits horizontaux représentent les trois moyennes annuelles. Panneau supérieur : moyenne saisonnière de forts débits : $0.21 \text{ m}^3/\text{s}$, moyenne saisonnière de faibles débits : $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ et valeur moyenne : $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$. Panneau inférieur : volumes cumulés d'eau de fonte. Années de forts débits (70 m^3), de faibles débits (34 m^3), et de débits moyens (46 m^3).

Le tableau V.6 montre les années avec des volumes extrêmes. Nous pouvons voir que la moyenne du cycle saisonnier des années avec un faible débit présente une diminution de 25% par rapport au volume annuel. Par contre, la moyenne des années avec une forte fusion révèle un volume d'eau écoulé de 56% supérieur à la moyenne. Ce pourcentage est deux fois plus

important que celui des années avec une faible fusion. Cela montre des écarts plus élevés durant les années de forte fusion.

Tableau V 6.- Volumes écoulés pour chaque année, moyenne du volume annuel de 19 ans et le pourcentage du total de 3 années avec le plus faible fusion (en bleu) et du total de 4 années avec la plus forte fusion (en rouge) par rapport au volume total de 19 ans (1992-2010)

	Volume (mm)	Moyenne du volume annuel de 19 ans (mm)	%Volume Total des années de forte et faible fusion par rapport au total
1993	1423	2089	-30%
2001	1354		
2003	1620		
1998	3714		56%
1999	2938		
2010	2918		

Dans ce qui va suivre on va analyser les cycles saisonniers du groupe d'années à forte fusion, d'une part, et du groupe d'années à faible fusion, d'autre part, en relation avec la précipitation et le bilan de masse glaciaire.

Le cadre de cette comparaison entre les débits, les précipitations et les bilans de masse est le suivant : les valeurs les plus négatives du bilan de masse sont observées durant les mois de novembre et décembre, concordant avec la période de plus forts débits qui sont concomitants de la phase d'installation de la saison des pluies (cf. chapitre 1). En revanche, durant la période où le bilan de masse est plutôt positif (janvier, février, mars) nous sommes dans le « cœur » de la saison de pluie et on observe une diminution marquée des débits. La saison sèche est généralement une période de faible ablation pour le glacier, avec de très faibles débits et des précipitations peu fréquentes. Il faut remarquer que les mesures mensuelles présentées ci-dessous du bilan de masse du glacier correspondent à des mesures effectuées au front, sur une bande d'altitude comprise entre 5000 et 5200 m

V.4.2.1 Années avec une forte fusion (1998, 1999 et 2010)

L'année 1998 est caractérisée par des débits exceptionnellement forts (Fig.-V.5). La durée de la période de forte fusion est particulièrement longue (Fig. V.-8). En considérant le pic maximum comme la fin de la période de forte fusion ($0.6 \text{ m}^3/\text{s}$), cette année présente une fin de période vers le 6 février, soit une durée de 190 jours avec un débit moyen de $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ et une lame d'eau écoulée de 3714 mm/an. Ce pic est particulier car il présente une intensité constante entre 8 décembre et 6 février (voir section V.3 pour l'analyse de la durée de la période 1). Ainsi, cette année montre une durée de la période 1 avec 61 jours de plus que la durée moyenne.

L'année 1999 montre un cycle saisonnier irrégulier : il présente des pics de fortes fusions dispersées au cours de l'année. Exceptionnellement, nous considérons comme fin de la période de forte fusion le deuxième pic ($0.6 \text{ m}^3/\text{s}$), car les volumes d'eaux écoulés entre le premier et deuxième pic

restent toujours forts avec des valeurs suffisamment importantes pour être considérées comme des valeurs de forte fusion. En plus, à partir de ce deuxième pic nous voyons une diminution constante de débits jusqu'à la fin de l'année hydrologique. Ainsi, nous notons que durant cette année la durée de la période I est de 140 jours (du 1^{er} août au 18 décembre) avec un débit moyen de $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ et une lame d'eau écoulée de 2938 mm/an . Cette période I comprend 65% du volume d'eau écoulé de l'année, soit un volume légèrement supérieur à celui de l'année 1998 (59%). Cependant la période I de l'année 1999 a une durée beaucoup plus courte que l'année 1998 (145 et 190 jours respectivement).

La période I de l'année 2010 est comprise entre les jours 1 et 103 (1 août et 11 novembre), en atteignant un débit maximum de $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une moyenne de $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ et une lame d'eau écoulée de 2918 mm/an . Cela période I représente seulement 27% du volume annuel (Fig. V.-3). Cela signifie que la forte fusion a lieu tout au long de l'année et pas uniquement durant la période I.

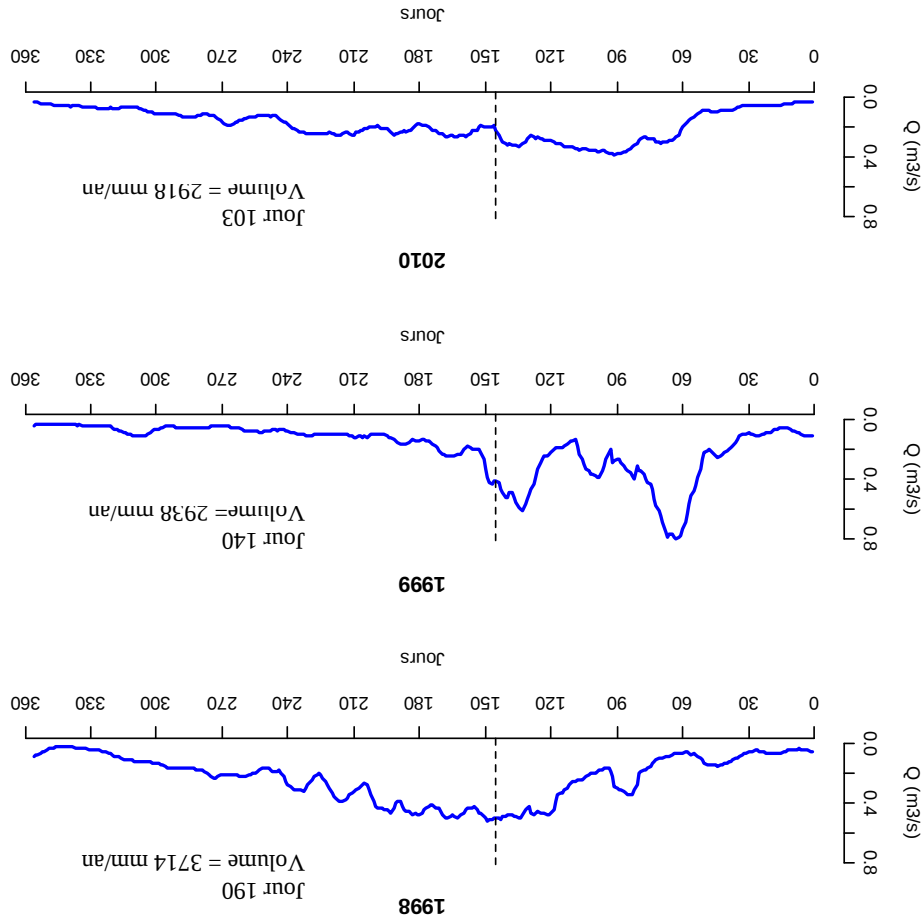


Figure V 8.- Fluctuations saisonnières des années de forts débits (1998, 1999 et 2010) représentées par des moyennes glissantes des valeurs journalières sur une fenêtre de 11 jours. En abscisses le jour dans l'année hydrologique : 1 représente le premier août et 360 le 26 juillet. Les chiffres représentent la date de fin de la période I et le volume de l'année. En trait noir la fin de la période I en moyenne (jour 145)

Chaque année caractérisée par un fort débit présente un cycle saisonnier différent de la moyenne mais ces années sont aussi distinctes les unes des autres. L'année 1998 montre un démarrage et un pic en retard par rapport aux autres années et par conséquent sa durée est aussi plus longue (190 jours). Cette longue durée de fusion de forte intensité cause un débit annuel très fort. L'année 1999 montre que la forte fusion de l'année est due à deux périodes de forte fusion concentrées entre septembre et janvier, atteignant un maximum de $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$. L'année 2010 est marquée par une intensité de fonte faible et une durée de la période de croissance des débits similaire à celle de 1999 (140 jours). Cependant tandis que les autres années présentent une diminution notable de débits depuis le pic maximum, l'année 2010 présente toujours de débits assez élevés durant les mois de janvier à mai, provoquant un fort débit annuel. En plus, même si nous considérons le début de la fusion le 1^{er} août, nous notons que le démarrage de la « sous période » de plus forte fusion (entre octobre et décembre, voir section V.2) intervient à différentes dates pour chaque année. Pour l'année 1998 cette période démarre en décembre, pour l'année 1999 en septembre et pour l'année 2010 en octobre.

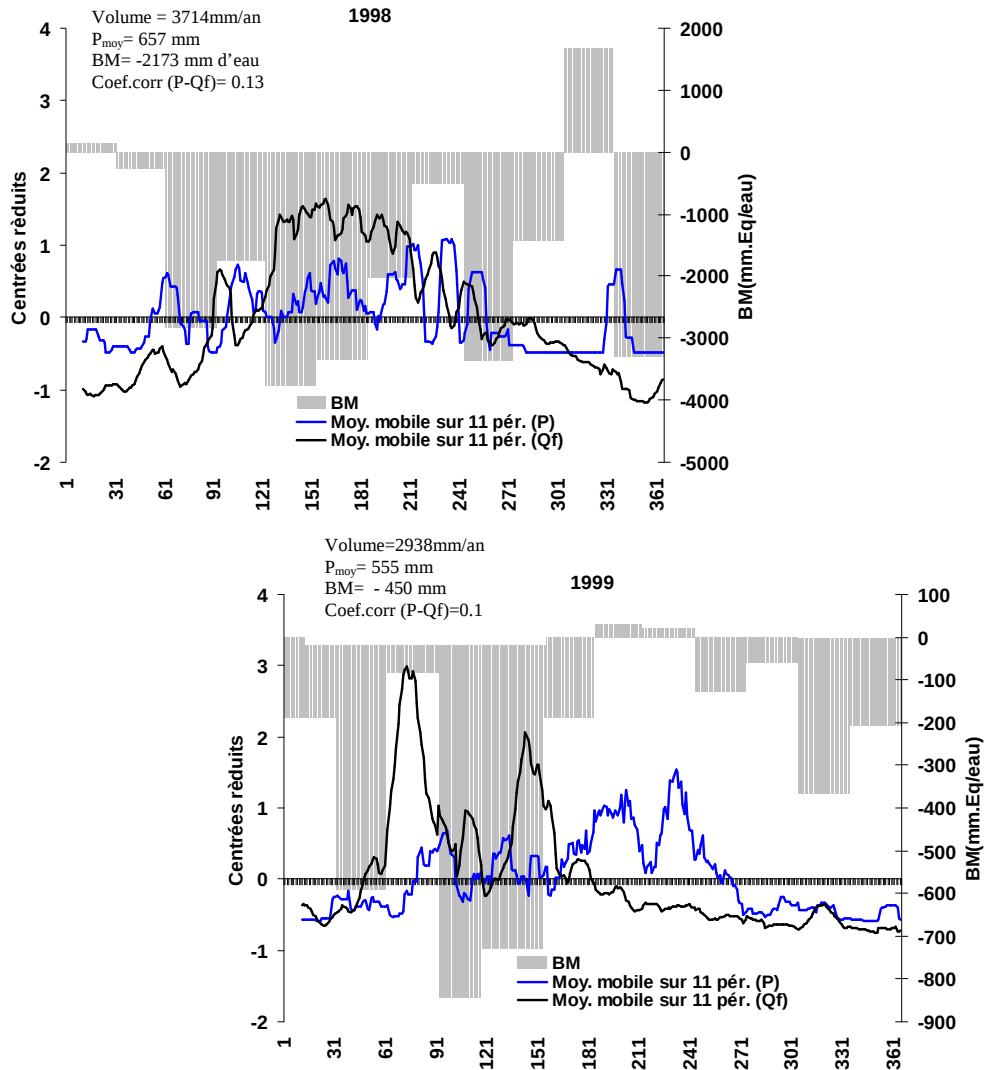
Relation avec la précipitation et le bilan de masse durant des années de forte fusion

Nous avons montré que l'année 1998 présente une durée de la période 1 plus longue que la moyenne sur 19 années (Fig.-V.9), liée aussi à une longue phase d'installation de la saison des pluies (d'août à février). Cette faible quantité de précipitation provoque un albédo faible du glacier, surtout durant le cœur de la saison des pluies (décembre-février). Cela a un impact direct sur le bilan de masse qui présente des valeurs très négatives et par conséquent de forts débits de fonte. Ceci s'oppose aux années normales qui ont un bilan de masse positif durant ces mois. Durant le mois de mars il y a une augmentation de la précipitation et donc un gain de masse du glacier qui engendre une diminution des débits. Cependant, cette augmentation de la précipitation et le bilan de masse positif sont bien plus tardifs que pour les années normales. Le mois d'avril présente une perte de masse équivalent à celle du mois de janvier, cela occasionne une fusion anormale pour ce mois.

Durant l'année hydrologique 1999/2000 la plus forte période de fusion (entre les jours 61 et 91, 1-31 octobre) est associée à un bilan de masse négatif de la zone d'ablation provoqué par de faibles précipitations. A partir de janvier les précipitations, fréquentes, sont supérieures à celles du mois précédent et entretiennent un albédo plus fort et donc l'énergie disponible est faible pour produire de forts débits [Wagnon, et al., 1998 ; Kaser, 1999].

En 2010 l'augmentation annuelle des débits de fonte est du même ordre (30%) qu'en 1999, mais cette augmentation est associée à un débit élevé au cours de toute l'année, sans que l'on enregistre de pics analogues à ceux de 1999. Durant cette année L'ELA présente une hausse de 91 m par rapport à la moyenne, en laissant une zone d'ablation du glacier plus grande

que pour une année moyenne. Entre octobre et décembre les précipitations de la phase d'installation de la saison des pluies sont assez faibles, d'où un albédo faible et donc une perte de masse élevée de la zone d'ablation. On n'observe qu'une très faible augmentation de la précipitation à partir de janvier, se traduisant par une diminution très progressive – bien moins forte qu'en année moyenne – des débits de fonte.



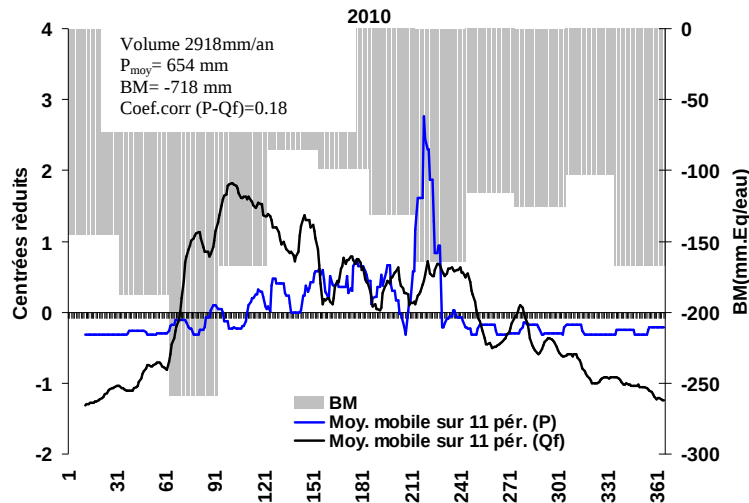


Figure V 9.- Fluctuations en valeurs centrées réduites et avec une fenêtre glissante de 11 jours par rapport à la moyenne de 19 ans (1992-2010) de la précipitation et des volumes d'eau écoulés de fonte et en valeurs absolues du bilan de masse mensuel des années 1992, 1998 et 2010

Le tableau V-7 donne la synthèse des années avec une forte fusion (1998, 1999 et 2010). Nous voyons que durant ces années la précipitation, présente une diminution annuelle qui fluctue entre 10 et 30% par rapport à la moyenne (800mm). Cette diminution de la précipitation engendre un bilan de masse négatif et une hausse de la ligne d'équilibre.

Nous remarquons que la date de démarrage des pluies tombe quelques jours avant la date de maximum des débits (même caractéristique pour la moyenne de 19 ans). La date de Qf maxima est aussi plus tardive que la moyenne, elle peut varier de 6 à 55 jours selon l'année. Ainsi, nous pouvons affirmer que durant une année de fort débit, la DDP et la date de Q max sont retardées par rapport à la moyenne.

Tableau V 7.- Résumé des années des forts débits (1998, 1999 et 2010) et de la moyenne de 19 ans. Débits de fonte (Qf), précipitation (P), bilan de masse (BM), et DDP selon la méthode de Pentades et selon la méthode de NJP, jour de la fin de la période de plus fort fusion (Date Qf max).

	Années de forts débits			Moyenne 19 ans
	1998	1999	2010	
Qf (mm/an)	3714	2938	2918	2089
P (mm/an)	664	562	723	800
BM (mm. d'eau)	-1962	-450	-718	-724
DDP Pentades (j)	190		135	124
DDP NJP (j)	180	139	132	120,2
Date Qf max (j)	190	140	145	134,5

V.4.2.2 Années avec une faible fusion (1993, 2001 et 2003)

Les trois années ayant les plus faibles débits sont les années 1993, 2001 et 2003 (Fig. V.-10). Le cycle saisonnier de l'année 1993 est irrégulier avec deux périodes de forts débits. La première est comprise entre le 1^{er} novembre (jour 90) et le 30 novembre (jour 120) où les intensités maximales atteignent 0.3 m³/s. Ensuite, le débit diminue pendant environ 10 jours, pour re-augmenter et atteindre le pic maximum (0.4 m³/s) le jour 150 (28 décembre). Cette deuxième période s'étale jusqu'au jour 160 (13 janvier). Nous considérons comme la fin de la période de fusion le deuxième pic (jour 150), car entre le premier et deuxième pic les débits restent forts. Cette première période contient 45% du volume écoulé annuel (Fig. V.-3) et présente un débit moyen de 0.13 m³/s et une lame d'eau écoulée de 1423 mm/an. La période qui suit ce pic présente un débit moyen de 0,064 m³/s, donc des débits faibles par rapport au cycle moyen.

L'année 2001 a une durée de 125 jours de forte fusion avec un maximum de 0.3 m³/s. Nous notons que la durée de cette période est plus courte par rapport à la moyenne (150 jours). Cette année présente une diminution de 30% du débit annuel par rapport à la moyenne sur 19 ans, qui peut être expliquée par la courte durée et par les faibles débits de cette période initiale. Durant cette année nous trouvons un apport de neige régulier et suffisant pour maintenir un albédo du glacier élevé. Les chutes de neige ont réduit la radiation nette en surface, et donc l'énergie disponible pour la fusion, ce qui explique que le limnigraphe sur le torrent émissaire du glacier ait enregistré des débits faibles toute l'année [Rapport GlacioClim, 2000-2001].

L'année 2003 révèle une diminution annuelle de 25% du débit de fonte par rapport à la moyenne sur 19 ans avec une lame d'eau écoulée de 1620 mm/an. La fluctuation saisonnière de cette année montre une période 1 comprise entre les jours 1 et 165 (1 août et 12 janvier) ; à peine 8 jours plus courte que la période moyenne. Cependant, en analysant la moyenne de la première période nous voyons que les débits de cette année sont beaucoup plus faibles (0,087 m³/s), que ceux du cycle moyen (0.15m³/s). Donc, le faible écoulement annuel global de cette année s'explique en grande partie par un faible débit de fonte tout au long de l'année, et surtout durant la période 1.

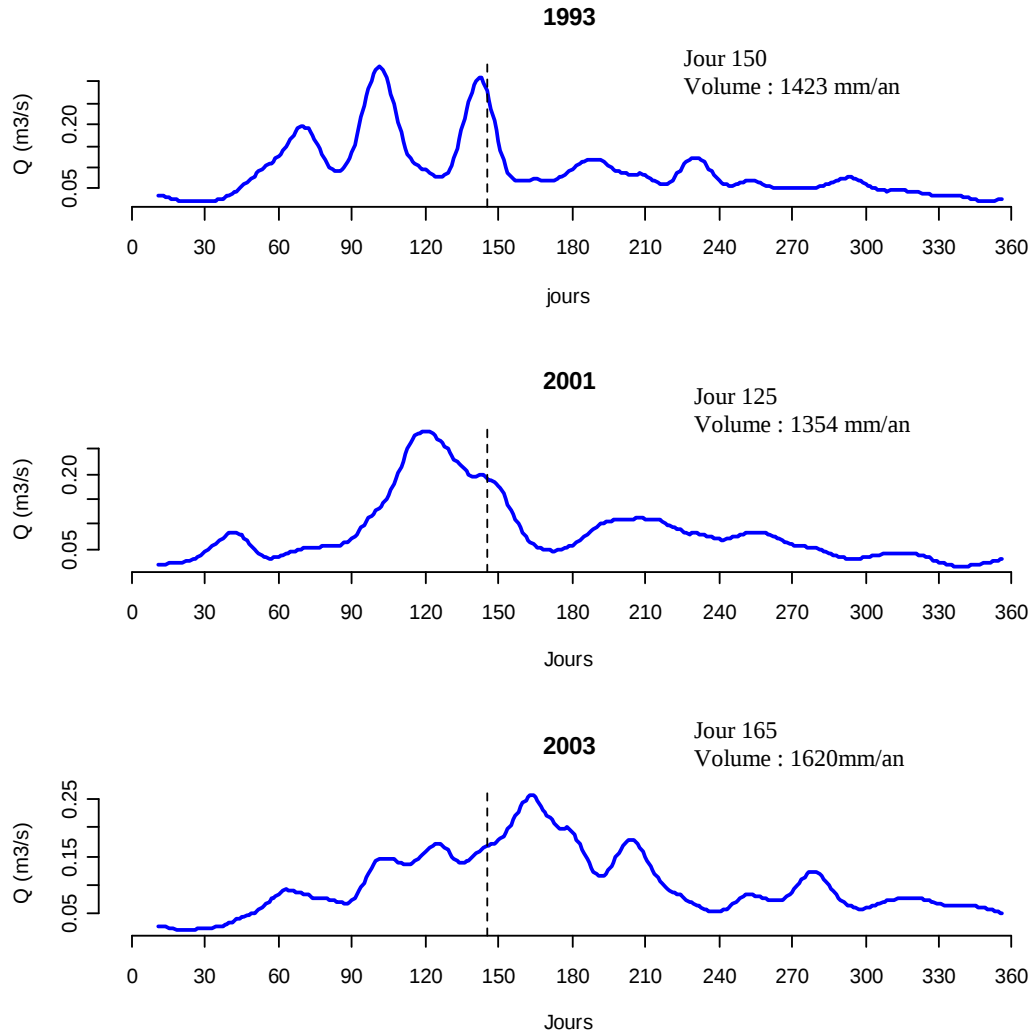


Figure V 10.- Fluctuations saisonnières des années de faibles débits (1993,2001 et 2003) représentées par des moyennes glissantes sur 11 jours. En abscisses le jour dans l'année hydrologique : 1 représente le premier août et 360 le 26 juillet. Les chiffres représentent la date de fin de la période 1 et le volume d'eau durant ces années. En trait noir la fin de la période 1 en moyenne (jour 145)

Relation avec la précipitation et le bilan de masse durant les années de faible fusion

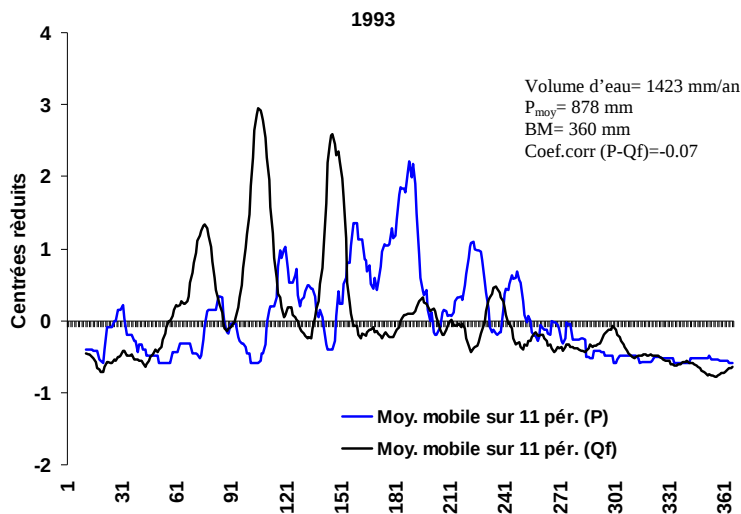
La moyenne de la précipitation annuelle durant ces années est en général proche de la moyenne de 19 ans ($P=800\text{mm/an}$), cependant les débits présentent une diminution annuelle d'environ 30%. Le bilan montre un gain de masse annuel sur les trois années selon le dernier rapport GlacioClim, (2009-2010), surtout pour les années 1993 et 2001 ; par contre pour 2003 ce bilan est faiblement positif (voir Tableau. V.- 5).

Le cycle saisonnier des débits de l'année 1993, est caractérisé par deux pics durant la période de fusion qui coïncident avec l'installation de la saison des pluies (Fig. V.-11). Ensuite, quand la forte diminution de débits se met en place (jour 145 ; 23 décembre), nous voyons une augmentation de la précipitation vers le jour 140 (18 décembre). Cette observation concorde

avec la description faite sur la moyenne du cycle saisonnier de la précipitation et des débits (cf. Introduction, Fig. 4), où nous montrons que l'arrivée du cœur de la saison des pluies bloque la forte fusion en produisant une diminution des débits de fonte à cause des chutes de neige sur le glacier. Cette caractéristique est observable sur les trois pics de fusion, même chez ceux ayant une intensité faible. Pour cette année 1993, nous ne présentons pas la fluctuation mensuelle du bilan de masse, car les mesures mensuelles ont commencé en 1994 seulement [Leonardini, 2009].

L'année 2001 montre que la période 1 se met en place durant l'installation de la saison des pluies, avec une forte augmentation de débits entre novembre et janvier, alors que la précipitation présente un affaiblissement et que le bilan de masse devient bien négatif. Le glacier présente donc un gain de masse du fait de l'augmentation de la précipitation (début du cœur de la saison des pluies). Cette période de diminution de débit et d'un bilan de masse autour de la moyenne s'étale jusqu'à la fin de l'année hydrologique.

Comme pour les années 1993 et 2001, en 2003 la période 1 est mise en place durant la phase d'installation de la saison des pluies. L'arrivée du cœur de la saison des pluies provoque une diminution des débits et un bilan de masse moins négatif que les mois précédents.



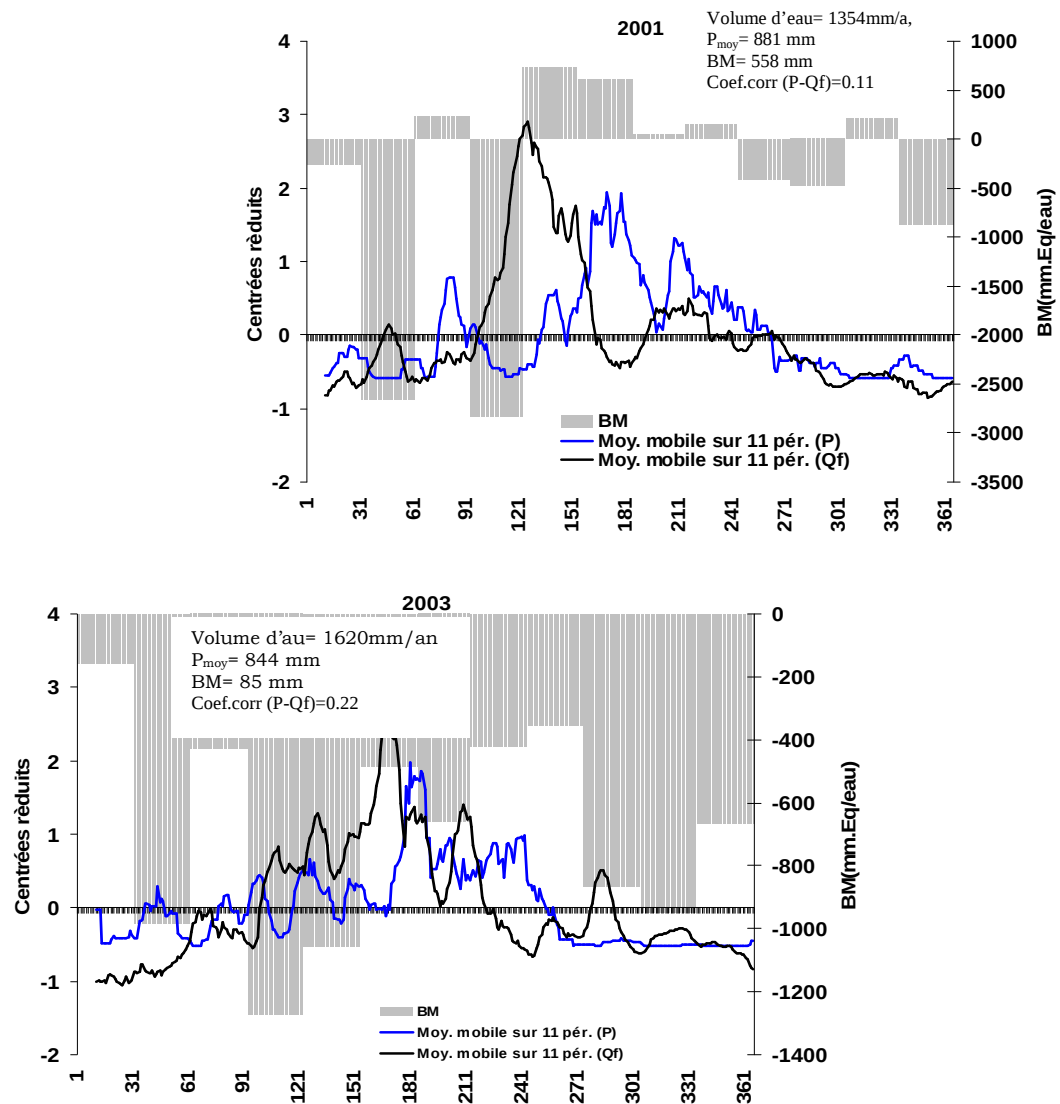


Figure V 11.- Fluctuations en valeurs centrées réduites par rapport à la moyenne de 19 ans (1992-2010) sur une fenêtre glissante de 11 jours de la précipitation, des débits de fonte et le bilan de masse en valeurs absolues des années 1993, 2001 et 2003.

En résumé (Tableau V.8) nous pouvons dire que durant les années avec un faible débit, la précipitation annuelle présente une légère augmentation de l'ordre de 50 mm/an par rapport à une année moyenne. Le bilan de masse net annuel montre soit un gain de masse (1993 et 2001) soit un bilan en équilibre (2003) par rapport à la moyenne. Durant ces trois années on observe parfois des décalages entre le démarrage de l'augmentation des pluies et la date où débute la diminution des débits, en présentant un écart compris entre 5 et 15 jours, selon la méthode considérée. En comparant avec la moyenne de 19 ans, la DDP et la date de Q max peuvent y être plus en retard où plus en avance, donc ces relations durant les années de faibles débits ne sont pas très claires.

Tableau V 8.- Résumé des années des faibles débits (1993, 2001 et 2003) et de la moyenne de 19 ans. Débits de fonte (Qf), précipitation (P), bilan de masse (BM), et DDP selon la méthode de Pentades et selon la méthode de NJP, jour de la fin de la période de plus forte fusion (Date Q max).

	Années de faibles débits			
	1993	2001	2003	Moyenne 19 ans
Qf (mm/an)	1423	1354	1620	2089
P (mm/an)	881	885	723	800
BM (mm.eq/eau)	360	577	-85	-724
DDP Pentades (j)	140	140	155	124
DDP NJP (j)	138	121	95	120,2
Date Q max (j)	145	125	165	134,5

V.5 FLUCTUATION DECENNALE DU CYCLE SAISONNIER [1992-2000] [2001-2009]

Dans ce sous-chapitre, nous analysons le comportement du cycle saisonnier moyen en séparant les deux dernières décennies [1992-2000] et [2001-2009], afin de détecter de possibles variations du cycle (Fig. V.-12).

Les moyennes journalières du débit entre les années 1992-00 et 2001-09, montrent un changement significatif du cycle saisonnier. La première décennie présente un débit moyen annuel égal à $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ et la deuxième un débit moyen annuel de $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui, en pourcentage, représente 22% de moins. L'explication de cette différence dans les valeurs moyennes de débit tient beaucoup à la présence d'années particulières avec de forts débits durant la première décennie (1992 et 1998).

En considérant la période allant du 1^{er} août à la date du débit maximum de l'année, nous voyons que cette période est plus longue durant la première décennie [1992-00] (143 jours) que durant la seconde (130 jours). Cette première période présente un débit moyen annuel de $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ (correspondant en moyenne à un volume de 2255 mm) durant la décennie 1 et $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ (correspondant en moyenne à un volume de 1823 mm) durant la décennie 2 soit 30% de différence.

Au cours de la période de décroissance des débits, nous voyons toujours des débits plus forts dans la première décennie. En moyenne, cette période présente un débit annuel à $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ (en moyenne 1892 mm/an de lame d'eau écoulée) durant la première décennie soit en pourcentage 15% de plus que la deuxième décennie qui montre un débit moyen de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (en moyenne 1657 mm/an durant cette période).

Dans le chapitre III (Fig.III.14), nous avons déjà comparé les variations du régime des précipitations entre ces deux décennies. Nous avons remarqué

que dans la vallée du Zongo il y a une légère augmentation des précipitations au cours de la décennie 2000 – 2009, liée à la grande fréquence des fortes pluies au-dessus de 15mm/j. Cette hausse de la précipitation est surtout marquée durant le cœur de la saison des pluies, entre janvier et février (plus 16% par rapport à la décennie précédente). De la même manière, durant la dernière décennie les pluviomètres totalisateurs non utilisés dans le travail sur le régime pluviométrique révèlent une légère augmentation de 20mm/an, par rapport à la décennie précédente. En sachant que la précipitation est une des variables qui explique la fluctuation des débits, du fait de son impact sur le bilan radiatif et sur l'albédo, nous pouvons expliquer la diminution de Q_f durant la dernière décennie par l'augmentation de la précipitation et donc du couvert neigeux sur le glacier surtout durant le cœur de la saison des pluies.

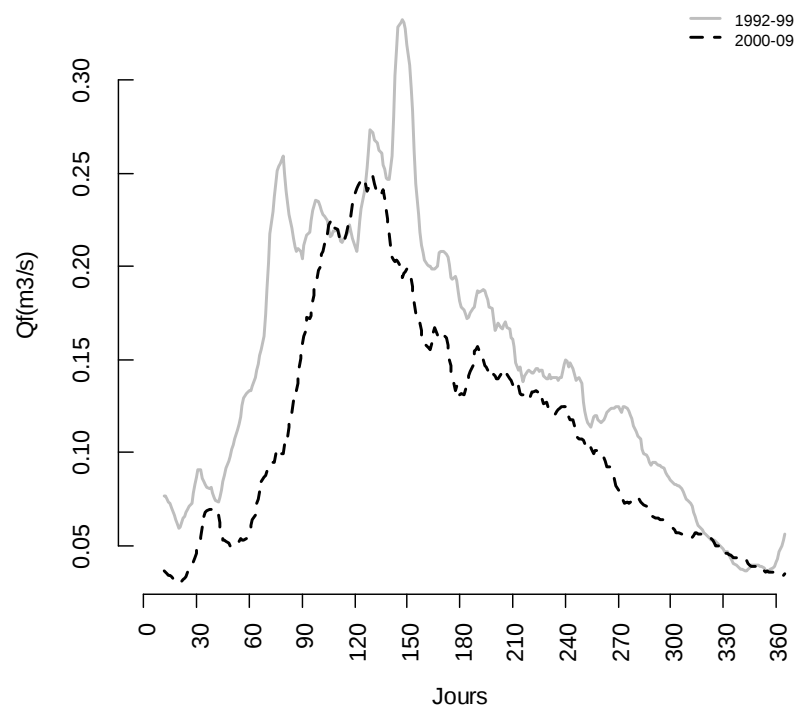


Figure V 12.- Variation du cycle saisonnier moyen des débits de fonte durant les deux dernières décennies (moyenne entre les années 1992-2000, et moyenne entre les années 2001-2009). Les valeurs sont représentées en moyennes glissantes sur 11 jours. En abscisses les jours de l'année hydrologique (août-juillet)

V.6- RELATION INTERANUELLE DE LA DATE DE DEMARRAGE DES PLUIES AVEC LE PIC MAXIMUM DES DEBITS

Le cycle saisonnier des débits montre une augmentation progressive depuis le mois de septembre et atteint son point maximum vers le mois de décembre, lorsque la saison des pluies est bien installée (cf. chapitre I. Fig. I.-2). A partir de ce point maximum, nous observons une baisse progressive. Le but de ce sous-chapitre est de vérifier la relation entre la date des débits

maximaux et la DDP à la station Plataforma, en utilisant la méthode des pentades et du NJP. La date des débits maximaux et la DDP sont exprimées en jours depuis le 1^{er} août. Nous avons déjà discuté cette question pour les cas particuliers des années de faible et de forts débits de fonte (Tableau V.7 et V.8). Dans cette section nous allons étendre l'étude à l'ensemble des années

En général nous voyons que la fluctuation interannuelle entre ces deux variables est similaire selon les deux méthodes (Fig. V.-13). La méthode des Pentades montre que les années 2000, 2002, 2007 et 2010 sont celles qui présentent une différence entre la DDP et le maximum de Qf comprise entre 25 jours (2000) et 40 jours (2002). La méthode du NJP indique des différences pour les années 1994, 1988, 2003, 2006, 2007 et 2010, avec une variation comprise entre 30 jours (2010) et 72 jours (2007). Nous notons que cette dernière méthode présente des écarts plus forts entre les deux variables par rapport à ceux produits par la méthode des Pentades.

Les coefficients de détermination expriment une relation faible entre la DDP et le débit maximum, et nous notons que le nuage de points (Fig. V-13) présente une assez grande dispersion qui est liée à certaines années décrites dans le paragraphe précédent. Ceci est vrai surtout pour la méthode NJP. La méthode des Pentades révèle une corrélation significative avec le débits maximum ($r^2 = 0.1$) au contraire de la méthode Pentades ($r^2 = 0.32$). Cependant nous remarquons que les années 1998, 2002, 2007 et 2010 sont celles avec des forts écarts. La corrélation est fortement influencée par ces années. Pour vérifier cela, nous calculons un nouveau R^2 de 0.67 lorsque l'on enlève les années 2002, 2007 et 2010 et un r^2 de 0.09 lorsque l'on enlève que l'année 1998. Ce calcul doit être nuancé étant donnée la taille de l'échantillon.

Pour la méthode NJP nous voyons que la corrélation linéaire est très mauvaise ($r^2 = 0.1$) et non significative, elle le reste même si on enlève les 5 années (1994, 1998, 2003, 2006 et 2007) qui s'alignent le moins à la droite de régression ($R^2 = 0.2$).

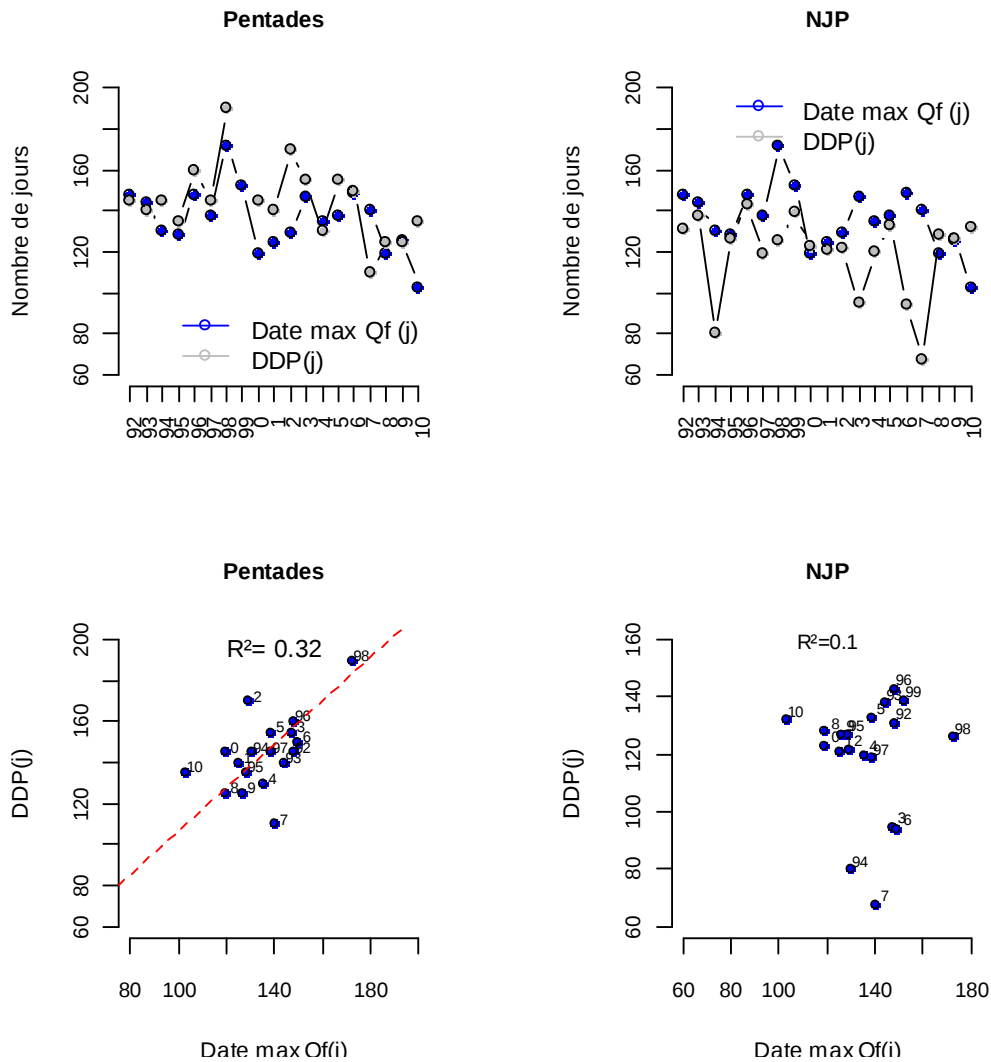


Figure V 13.- En haut la fluctuation interannuelle de la date de débits maximums et de la DDP, selon la méthode de pentades (sans l'année 1999), nombre de jours depuis le 1er août. En bas, le nuage de point de ces deux variables, les numéros indiquent l'année (18 points), 0 représente l'année 2000, et 10 2010. Moyenne DDP=jour 144, moyenne date débit max = jour 135

V.7 RELATION ENTRE LES PROPRIETES DE LA SAISON DES PLUIES, LES DEBITS DE FONTE ET LE BILAN DE MASSE DU GLACIER.

La précipitation explique environ 45% de la variabilité interannuelle du bilan de masse du glacier et 60% du débit de fonte (Fig. V.-6). La saison des pluies concentre plus de 70% de la pluie annuelle à Plataforma, donc c'est la période la plus importante du cycle saisonnier. C'est pourquoi nous examinons ici la relation entre le débit de fonte et le bilan de masse, d'un côté, les propriétés de la saison des pluies de l'autre (date de démarrage et fin de la saison de pluie, la durée, la concentration, l'intensité et la pluie saisonnière). L'objectif principal de ce sous-chapitre est d'identifier les variables de la saison des pluies de la station Plataforma, les mieux reliées au débit de fonte et au bilan de masse.

Dans le chapitre IV nous avons défini différentes variables pour caractériser la saison des pluies (DDP, DFP, durée et cumul des pluies lors de la saison des pluies) à partir de quatre méthodes (pentades, PIC, NJP et NJP consécutifs). Pour cette analyse nous montrons seulement les résultats obtenus avec les méthodes de Pentades et NJP, car ces méthodes sont celles qui représentent le mieux la réalité de la variabilité saisonnière de la précipitation (voir chapitre IV).

Nous allons par ailleurs utiliser deux autres indices à pas de temps annuel (Tableau V.9) : un indice d'intensité (Ii) et un indice de concentration de pluies (Ic) définis selon les équations V.4 et V.5.

$$I_i = P \text{ saison des pluies} / D \quad (Eq. V.-4)$$

Avec

Ii : Indice d'intensité de pluie (mm/jour)

P saison des pluies : total de pluies pendant la saison de pluie (mm)

D : Durée de la saison de pluie (jours)

$$I_c = P \text{ saisons de pluies} / P_a \quad (Eq. V.-5)$$

Avec

Ic : indice de concentration des pluies durant la saison des pluies

Pa : Précipitation annuelle (mm)

L'indice d'intensité (Ii) représente l'intensité moyenne des pluies pendant la saison des pluies, et l'indice de concentration (Ic) représente la part du total annuel des pluies qui intervient en saison des pluies. Le tableau V.9 montre la fluctuation interannuelle de ces indices selon la méthode de Pentades et NJP. Nous voyons que l'indice d'intensité présente des forts écarts entre les deux méthodes. La moyenne de 19 ans selon la méthode des Pentades indique une intensité de 0.99 mm/j, par contre la méthode NJP donne une moyenne de 4,51 mm/j, donc environ quatre fois plus que l'intensité moyenne selon la méthode des Pentades. Ces écarts montrent bien les ambiguïtés liées à l'utilisation de ces méthodes. Cependant, en sachant que le nombre de jours pluvieux contrôle fortement la pluie annuelle à la station de Plataforma nous pouvons faire l'hypothèse que l'intensité calculée par la méthode NJP est la plus réaliste. L'indice de concentration présente des écarts faibles entre les méthodes par rapport à l'indice d'intensité. La méthode des Pentades montre en moyenne une Ic de 0.64 et le NJP une Ic de 0.72 avec une variabilité interannuelle faible. Ainsi, nous pouvons conclure que les deux méthodes ont des résultats assez proches.

Tableau V 9.- Fluctuation interannuelle des indices d'intensités (Ii) et de concentration (Ic). En gras et italique la moyenne et l'écart type des derniers 19 ans (1992-2010)

	Indice d'intensité de pluies (mm/j)		Indice de concentration (Ic)	
	Pentades	NJP	Pentades	NJP
1992	0,97	4,02	0,55	0,56
1993	0,93	4,67	0,63	0,66
1994	0,84	4,21	0,56	0,83
1995	1,02	4,81	0,75	0,78
1996	0,89	4,47	0,62	0,63
1997	1,16	4,86	0,67	0,78
1998	0,70	3,28	0,29	0,54
1999		2,91		0,64
2000	1,07	4,80	0,60	0,73
2001	1,16	4,70	0,69	0,80
2002	0,76	3,46	0,52	0,70
2003	1,12	4,49	0,59	0,74
2004	1,14	4,96	0,77	0,80
2005	0,92	4,26	0,58	0,66
2006	1,19	4,87	0,67	0,77
2007	1,02	4,30	0,80	0,89
2008	1,09	5,86	0,68	0,65
2009	0,97	5,00	0,79	0,77
2010	1,06	5,80	0,73	0,70
Moyenne	0,99	4,51	0,64	0,72
Ecart type	0,14	0,75	0,12	0,09

Le tableau V.10 montre les coefficients de corrélations (r) avec leur niveau de signification à 95%, entre les débits de fonte, le bilan de masse (variables représentant la 'réponse' du glacier) et la DDP, la DFP, la durée de la saison des pluies, l'indice de concentration, l'indice d'intensité et la pluie tombée durant la saison humide (variables représentant les caractéristiques des précipitations). Dans la section suivante, nous analysons les principaux résultats de ce tableau :

- i) La DDP montre un coefficient de corrélation de 0.57 avec les débits selon la méthode des Pentades, une relation assez significative. Cependant la corrélation de 0.36 selon la méthode du NJP, montre une relation non significative entre la DDP et les débits. Cette faible corrélation ($\leq$ à 30% de variance expliquée indique une faible relation linéaire entre ces deux variables. Le comportement standard attendu (démarrage plus tardif de la saison des pluies entraînant des débits plus élevés) est loin d'être systématique. Selon les deux méthodes la corrélation entre la DDP et le bilan de masse est encore plus faible ($r < 0.44$) et pas significatif. Là encore, 1998 constitue une année exceptionnelle, avec une DDP très en retard et une diminution

anormale de la précipitation, provoquant un bilan de masse négatif et par conséquent une augmentation des débits de fonte.

- ii) Concernant la DFP, nous voyons qu'en général les corrélations DFP-débits sont plus faibles et pas significatives et que pour les corrélations DDP-débits, la plus haute relation est de -0.35 (NJP). La plus forte relation du bilan de masse et la DFP est de $r=0.52$, selon la méthode de NJP. De plus, le signe négatif de la corrélation DFP-débits indique qu'en général une DFP en retard est liée à une diminution des débits, ce qui est logique. Pour le bilan de masse, le signe positif de la corrélation indique que la DFP arrive en retard durant les années avec un bilan de masse négatif. Cependant, il y a une forte dispersion entre ces variables donc nous ne pouvons pas conclure que la DFP est une variable représentative clé pour expliquer la variabilité des débits de fonte ou du bilan de masse. Pour les deux méthodes, on a remarqué que la variabilité interannuelle de la DFP est plus faible que celle de la DDP (Chapitre IV.2).
- iii) La relation durée-débits montre un coefficient de corrélation de respectivement -0.65 (Pentades) et -0.57 (NJP). Le bilan de masse présente une relation avec la durée plus faible qu'avec les débits : 0.52 (Pentades) et 0.45 (NJP). Les corrélations de ces deux variables sont significatives. Les corrélations négatives (débits) et positives (bilan de masse), indiquent qu'en général, pour les années avec une durée de la saison des pluies plus courte, les débits tendent à être plus forts et le bilan de masse à être plus faibles que la moyenne, et réciproquement. Ce constat est cohérent avec ce qui a été vu plus haut concernant les relations avec DDP et DFP, mais cette relation n'en est pas pour autant vérifiée chaque année.
- iv) L'indice d'intensité (Ii) et l'indice de concentration (Ic) calculés avec les équations V.4 et V.5, respectivement, présentent une relation similaire avec les débits (coefficients de corrélations inférieures à 0.55). La valeur négative de la corrélation Qf-Ic indique que pour certaines années de forts (faibles) débits, la concentration de la précipitation durant la saison des pluies est faible (forte). Une interprétation similaire est donnée pour la relation Qf-Ii : un fort (faible) débit est plutôt lié à une plus faible (forte) intensité moyenne durant la saison des pluies faible (forte). Concernant le bilan de masse nous notons que la relation bilan de masse – Ii est plus forte ($r=0.5$ selon la méthode de NJP) que la relation bilan de masse – Ic ($r=0.36$ selon la méthode NJP). Au contraire des débits les corrélations avec les indices d'intensité et concentration sont positifs, en exprimant un bilan plutôt positif liée à une concentration (Ic) et ou une intensité (Ii) plutôt forte durant la saison des pluies. Bien que les corrélations ne soient pas très fortes, on peut tout de même y voir la marque

d'un effet des précipitations importantes sur l'albédo, via la précipitation neigeuse, et donc sur le bilan radiatif.

- v) Finalement, la relation de la pluie saisonnière (P saison des pluies) avec les débits révèle des coefficients de corrélations de l'ordre de -0.7 pour les deux méthodes avec des corrélations significatives. La corrélation négative indique une augmentation des précipitations neigeuses en saison des pluies avec une diminution de la fonte de la zone d'ablation du glacier par changement de l'albédo. Le bilan de masse exprime de la même manière des corrélations assez bonnes, selon les deux méthodes ($r < 0.6$). Les corrélations positives des deux méthodes indiquent une perte de masse liée à une précipitation saisonnière faible.

Tableau V 10.- Coefficients de corrélations (1992-2010) d'une part entre les valeurs annuelles de débit (Qf), et de bilan de masse (BM) et d'autres part les caractéristiques de la saison des pluies obtenues selon les méthodes de Pentades et NJP. Les variables comparées : DDP (Date de démarrage de pluie), DFP (Date de fin de saison de pluie), durée de la saison des pluies, Ic (Indice de concentration), Ii (indice d'intensité) et la pluie saisonnière (P saison des pluies). En rouge les corrélations les plus fortes pour chaque variable. En souligné et italique les corrélations significatifs à un niveau de confiance de 0.05

	Coefficients de corrélation (r)	
	Qf (m3/s)	BM
DDP (pentades)	<u>0,57</u>	-0,44
DDP (NJP)	0,36	-0,24
DFP (pentades)	-0,35	0,27
DFP (NJP)	-0,41	0,52
Durée (pentades)	<u>-0,64</u>	0,52
Durée (NJP)	-0,47	0,45
Ppluie/Panuelle (Pentades)	-0,48	0,44
Ppluie/Panuelle (NJP)	-0,55	0,50
Ppluie/durée (Pentades)	-0,54	0,30
Ppluie/durée (NJP)	-0,52	0,36
P saison de pluie (pentades)	<u>-0,72</u>	<u>0,64</u>
P saison de pluie (NJP)	<u>-0,74</u>	<u>0,62</u>

Afin de vérifier le comportement des variables décrites dans le tableau V.9, la Fig.- V.14 montre à l'échelle annuelle les nuages de points associés aux couples formés par l'une des 2 variables expliquées (débits ou bilans de masse) et par l'une des 2 variables explicatives les plus représentatives de la saison des pluies (Durée et P saison des pluies). On a utilisé pour ces représentations des valeurs centrées réduites et on a fait figurer les nuages de points obtenus avec la méthode de Pentades, qui présente la plus forte corrélation sur le deux variables. L'ensemble des nuages de points des relations pour toutes les propriétés calculées selon les deux méthodes sont montrées en annexe 6.

Le premier nuage de points (relation entre la durée de la saison des pluies avec les débits) montre un coefficient de détermination de 0.43, c'est à dire que la durée explique 43% de la variance du débit annuel. La description faite dans la section précédente a montré qu'un faible/fort débit correspond à une durée de saison des pluies plus courte/longue. Cette corrélation est fortement influencée par certaines années, surtout par l'année 1998, cependant l'année 1992 montre aussi un fort écart par rapport au comportement moyen. Ces points particuliers correspondent soit à des années particulières avec des anomalies climatiques comme el Niño, soit à des années avec des forts écarts par rapport à la moyenne (Fig. V.- 5). De la même manière, la relation entre la durée et le bilan de masse montre que les années 1992, 1998 et 2005 conditionnent fortement les corrélations obtenues. Le coefficient de détermination est plus faible que celui de la relation Qf-Durée ; la durée explique seulement 28% de la variance annuelle du bilan de masse.

La relation entre les débits de fonte et la Pluie durant la saison des pluies (nommée dans la figure Psp) montre une dispersion de points plutôt linéaire, la Pluie saisonnière déterminant 50% de la variance du débit annuel. Mais, encore une fois, l'année 1998 (écoulement de fonte excédentaire et bilan de masse déficitaire) et l'année 1992 dans une proportion plus faible, perturbent fortement la linéarité de la relation. On remarque en effet qu'avec une Psp sensiblement équivalente, ces années présentent de réponse très différente en débit de fonte. Le nuage de points entre le bilan de masse et la Psp révèle aussi une dispersion plutôt linéaire ; cependant le coefficient de détermination n'est que de 0.41, car on observe une assez forte dispersion autour de cette relation linéaire moyenne, sans pour autant que certains point perturbent particulièrement à eux seuls la relation. Les années 1992, 1998 et 2005, notamment, sont bien alignées avec la relation moyenne et contribuent fortement à la corrélation obtenue du fait de leur position éloignée du nuage de points moyens.

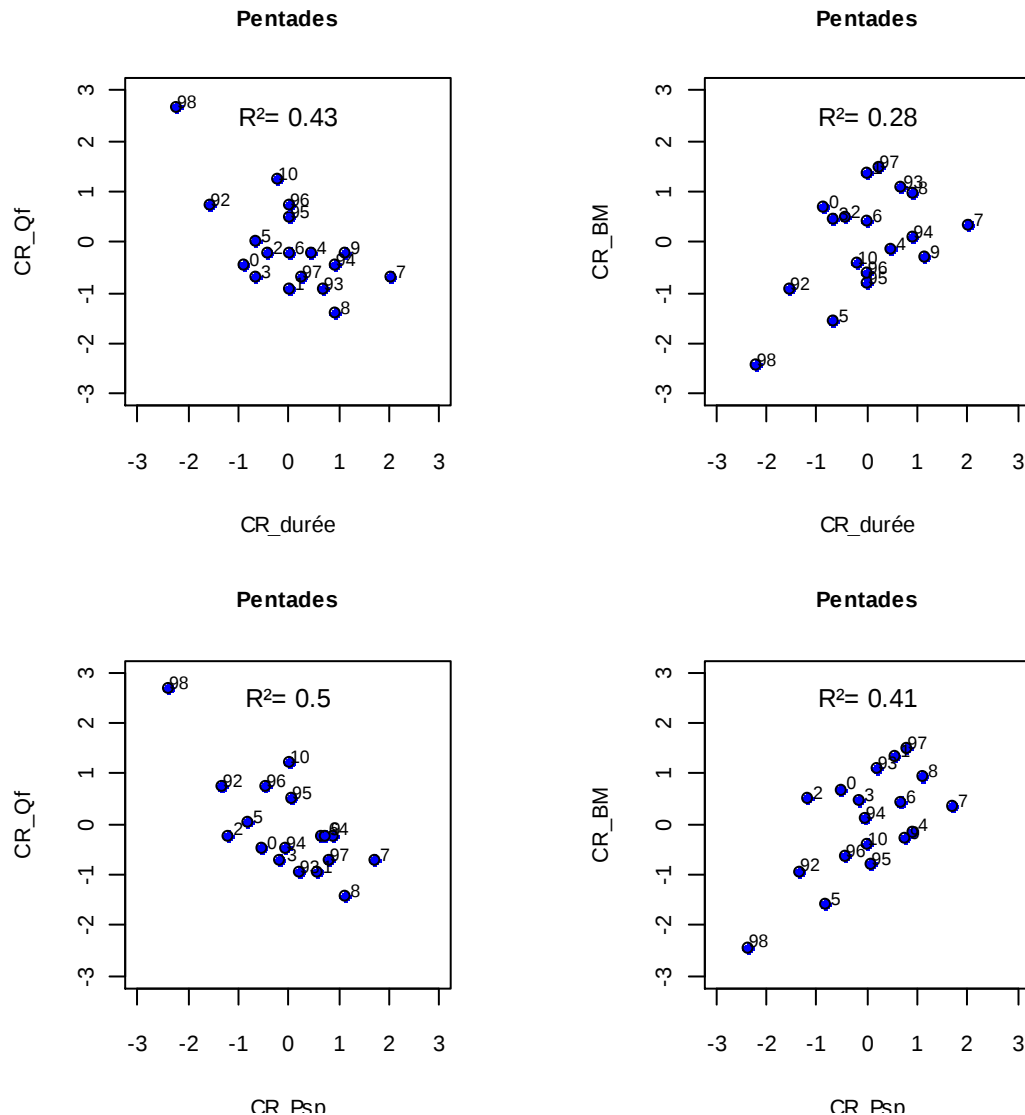


Figure V 14.- Graphiques de corrélations exprimées en valeurs centrées réduits (CR) pour les couples des valeurs suivantes : Débits (Qf) - Durée, Bilan de masse (BM)- Durée, Débit (Qf)- P saison des pluies (Psp) et Bilan de masse (BM) - P saison des pluies (Psp). Pour chaque caractéristique, la méthode la plus représentative a été choisie. Les numéros donnent les années (91: 1991; 0: 2000, et 10: 2010).

En résumé, nous pouvons dire que les propriétés de la saison des pluies qui influencent le plus le débit de fonte et le bilan de masse sont la durée de la saison des pluies et la précipitation durant la saison des pluies (P saison des pluies), tout en remarquant que ces deux variables sont fortement corrélées entre elles ($r^2 = 0.78$ selon la méthode de Pentades, et 0.65 selon la méthode NJP). La durée exprime environ 40% de la variance du débit annuel et environ 30% la variance du bilan de masse. La précipitation durant la saison des pluies représente environ 50% de la variance du débit et 40% du bilan de masse (selon la méthode de Pentades). Il faut remarquer que quelle soit la méthode utilisée pour délimiter la saison des pluies (Pentades ou NJP), les propriétés de la saison des pluies sont mieux corrélées avec les débits de fonte qu'avec le bilan de masse. Cela peut être lié aux erreurs sur le bilan de masse qui sont normalement plus fortes que

celles sur les débits, donc ces erreurs font baisser les corrélations entre bilan de masse et propriétés de la saison des pluies.

Finalement nous pouvons noter que les deux méthodes employées pour déterminer les propriétés les mieux liées aux débits de fonte et au bilan de masse sont appropriées en donnant des résultats équivalents, surtout pour la durée et la pluie en saison des pluies (Psp).

Les figures de dispersion révèlent deux points en commun sur les débits (1992 et 1998) et trois sur le bilan de masse (1992, 1998 et 2005) qui influencent fortement les valeurs des coefficients de corrélation. Les années 1992 et 1998 sont marqués par de forts débits de fonte en un bilan de masse négatif, alors que l'année 2005 est une année négative pour le bilan de masse avec un débit de fonte situé autour à la moyenne.

V.8 CONCLUSIONS

Ce chapitre nous amène aux conclusions suivantes :

- Le cycle moyen des débits de fonte révèle deux périodes bien marquées, avant (période d'augmentation du débit) et après (décroissance du débit) le pic annuel : la première, du 1 août au 23 décembre, représente 48% du volume annuel écoulé ; et la deuxième, caractérisée par une diminution progressive de débits de fonte (janvier- juillet), concentre 52% du volume écoulé annuel présentant la plus forte fusion de toute l'année. La première période présente une sous-période allant du 14 octobre au 28 décembre, caractérisée par les débits de fonte les plus intenses (37% du total annuel en 11 semaines).
- Bien que ne représentant que 48% du volume annuel écoulé en moyenne, le volume d'eau écoulé durant la période du 1 août au 23 décembre explique 79% de la variance interannuelle du débit total, ce qui illustre que cette période est la plus critique du point de vue de la variabilité interannuelle.
- La variation interannuelle révèle quatre années avec une fusion annuelle très forte par rapport à la moyenne ; 1992, 1998, 1999 et 2010. Par contre, nous avons détecté seulement trois années avec un débit plutôt faible ; 1993, 2001 et 2003. Les années caractérisées par un fort débit présentent des écarts plus forts par rapport à la moyenne que celles caractérisées par un faible débit.
- A l'échelle annuelle, la précipitation présente une corrélation plus forte que la température avec les variables qui représentent la réponse du glacier : bilan de masse (BM), Altitude de la Ligne d'Ablation (ELA) et débit de fonte (Qf). Cette relation est plus forte avec le Qf qu'avec le BM ou l'ELA
- Les cycles saisonniers des années de forts et faibles débits sont différentes les uns des autres. Les années avec un fort débit, sont caractérisées soit par une durée de la période 1 beaucoup plus longue que la moyenne (1998) ; soit par une plus forte fusion durant la première période, mais avec une durée similaire à la moyenne (1999) ; où soit par une fusion constante durant la période 1 et la période 2 (2010). En revanche, les années avec un faible débit sont caractérisées soit par une durée et un volume d'eau autour de la moyenne, mais avec une période 2 plus faible (1993) ; soit par des faibles débits toute au long de l'année (2001 et 2003).
- Le cycle saisonnier des débits de fonte présente une variation assez significative lorsque l'on considère séparément les dernières deux décennies. La deuxième décennie (2000-09) révèle des valeurs plus basses que la première décennie (1992-1999). Cependant, il faut

remarquer que la première décennie est influencée par deux années particulières, (1992 et 1998), qui présentent une augmentation anormale de débits. En excluant ces deux années 1992 et 1998, la deuxième décennie présente une diminution de 22% du débit de fonte par rapport à la première décennie, alors qu'en incluant ces deux années la diminution est de 30%.

- Un objectif de ce travail a été de vérifier si le démarrage du cœur de la saison des pluies (DDP) et le pic maximum du débit de fusion arrivent à la même date. Nous avons constaté que même si cette relation n'est pas toujours vérifiée, la majorité des années remplissent cette condition. Par contre, la méthode choisie pour déterminer la DDP a une influence non négligeable. La méthode des Pentades est celle qui donne les résultats les plus cohérents.
- Les propriétés de la saison des pluies qui sont le mieux corrélées avec les débits de fonte et avec le bilan de masse sont la durée de la saison des pluies et la pluie qui tombe durant cette saison. Ces deux variables expliquent 40% de la variance des débits et 30% du bilan de masse. Les propriétés de la saison des pluies ont un impact plus fort sur les débits que sur le bilan de masse.

CHAPITRE VI : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le glacier du Zongo (16°15'S, 68°10'W) fait partie des glaciers tropicaux externes qui sont soumis à une longue saison sèche avec une faible ablation glaciaire (hiver austral, mai-août), à une saison 'intermédiaire' de fusion maximale (septembre-décembre), et à une courte saison d'accumulation glaciaire lors du cœur de la saison des pluies (janv.-avril) [Sicart et al., 2011].

Dans ce travail, on s'est intéressé à la caractérisation de la précipitation autour du glacier de Zongo et son lien avec les débits de fonte à différentes échelles temporelles : décennale, annuelle et journalière.

La précipitation est une des variables les plus importantes pour expliquer la variabilité interannuelle de la fusion du glacier (plus de 55% de la variance des débits annuels expliqués sur la période 1992-2010), ce qui justifie son étude approfondie. Les sources de précipitation du glacier proviennent essentiellement de l'Amazonie ; les masses d'air chargées d'humidité montent le long de la vallée du Zongo, atteignent des sommets et dépassent la cordillère pour arriver à l'Altiplano. De cette manière, on a considéré pertinent de caractériser le climat des régions situées autour du glacier qui présentent des caractéristiques pluviométriques différentes avec: la vallée du Zongo et l'Altiplano (16°0.1' S - 68°20'O et 17°15'S - 67°54'O, respectivement).

Concernant les débits de fonte glaciaire, deux phases peuvent être définies dans le cycle saisonnier i) une augmentation graduelle depuis le mois d'août jusqu'à la fin de décembre avec un maintien des forts débits entre octobre et décembre. ii) une diminution progressive depuis le pic maximum (fin décembre en général) qui dure jusqu'à la fin de l'année hydrologique en août. Cependant, les dates de transition entre les deux phases principales du cycle annuel moyen peuvent varier sensiblement d'une année à l'autre, avec un impact évident, mais mal connu, sur la dynamique d'accumulation et d'ablation des glaciers de la région.

C'est pourquoi le but principal de ce travail était de mieux comprendre les variations interannuelles de la fusion du glacier du Zongo et, plus généralement, du régime hydrologique en étudiant les fluctuations du régime pluviométrique à différentes échelles temporelles, du journalier à l'interannuel.

- i) Caractérisation temporelle du régime pluviométrique - Pour mieux comprendre le climat régional du glacier de Zongo, on a commencé par caractériser le régime pluviométrique moyen et ses fluctuations sur quatre zones – supposées homogènes climatiquement – proches du glacier. (i) la partie Nord Est de l'Altiplano ; (ii) la Ville de La Paz, (iii) la section haute de la vallée du Zongo ; et (iv) la section moyenne de la vallée du Zongo. Pour synthétiser, on ne parlera ci-

dessous que de l'Altiplano et de la vallée du Zongo (comprise la section haute et moyenne).

ii) Caractérisation du régime pluviométrique et propriétés du cœur de la saison des pluies. On s'est intéressé aux propriétés de la saison des pluies qui peuvent affecter la fusion du glacier : Date de démarrage (DDP), de fin (DFP) et durée du cœur de la saison des pluies, volume de pluie tombé durant cette saison, indices de concentration et d'intensité des pluies. Ces propriétés ont été identifiées par deux méthodes basées sur les intensités journalières des pluies et deux méthodes basées sur l'occurrence des pluies journalières.

iii) Variation temporelle du débit de fonte et sa relation avec les propriétés de la saison des pluies. Une analyse de la variation temporelle des débits de fonte durant les derniers 19 ans, nous a permis de caractériser, d'une part, des années s'éloignant le plus de la moyenne, et, d'autre part, des changements du cycle moyen de fonte journalière durant les deux dernières décennies. Ensuite, on a exploré les relations entre la fusion et la distribution des précipitations au cours de l'année qui peut avoir un fort effet sur l'albédo du glacier.

VI.-1. Caractérisation du régime pluviométrique

VI.1.1 Variations interannuelles de la précipitation

Suite à l'analyse de la variabilité interannuelle de la précipitation, on peut souligner les conclusions suivantes :

a) Aucune tendance significative de la précipitation annuelle ne peut être mise en évidence sur la période 1973-2010 ni sur l'Altiplano ni dans la vallée du Zongo. Cela coïncide avec les résultats d'études menées à une échelle régionale [Vuille et Bradley, 2000 ; CAN, 2007].

b) Un total de douze années plus spécialement sèches (8) ou humides (4) a été détecté durant les dernières 32 années. En général durant les années sèches, l'Altiplano présente une diminution des pluies comprise entre 15% et 40%, tandis que la vallée du Zongo présente une diminution comprise entre 15% et 26% par rapport à la moyenne. Durant les années humides, la vallée du Zongo présente en général une augmentation des pluies comprise entre 20% et 30%, tandis que sur l'Altiplano on observe une augmentation comprise entre 5% et 15%. Ainsi, les écarts par rapport à la moyenne durant les années sèches sont plus forts du côté altiplanique alors que durant les années humides les écarts sont plus forts du côté amazonien.

c) Un apport important de cette thèse concerne l'étude du climat local avec l'identification de la variable qui contrôle le plus la précipitation annuelle entre le nombre de jours pluvieux (NJP) ou l'intensité des pluies. Ainsi, il apparaît que sur l'Altiplano la précipitation annuelle est contrôlée par le nombre de jours pluvieux mais lorsque l'on s'approche de la vallée du

Zongo où le climat est plus humide, c'est l'intensité des pluies qui contrôle les précipitations annuelles. Cette relation différente entre l'Altiplano et la vallée du Zongo peut être expliquée par un effet de seuil pour déterminer les jours pluvieux. Un test révèle que la relation NJP – P annuelle est similaire si l'on compare des NJP à 2mm/j sur l'Altiplano avec des NJP avec un seuil de 5mm/j sur la vallée du Zongo. Ce résultat est attendu parce qu'un NJP identifié avec un seuil de 1 mm/j est déjà significatif sur l'Altiplano ce qui n'est pas le cas dans la vallée.

VI.1.2 Caractéristiques du cycle moyen pluviométrique de l'Altiplano et de la vallée du Zongo

Comme pour la précipitation annuelle, un enjeu important en termes de compréhension de la dynamique du climat et d'impact hydrologique est de déterminer si le cycle saisonnier des précipitations est contrôlé par des variations d'occurrence (nombre de jours pluvieux) ou bien d'intensité (ou bien les deux). De ce point de vue, l'Altiplano et la vallée du Zongo ont des comportements différents. En considérant que le cycle saisonnier est constitué de trois phases : P1 – installation de la saison de pluies, P2 - cœur de saison des pluies, P3 – saison sèche, on a constaté que :

- sur l'Altiplano, les phases P1 et P3 sont contrôlées par la variation d'occurrence (augmentation au cours de P1, diminution au cours de P3) et quel que soit à le seuil choisi pour identifier les nombres de jours pluvieux (de 1, 2 ou 5mm/j); par contre au cours de P2, le contrôle se fait à la fois par les occurrences et les intensités en considérant seulement un seuil de 1mm/j. En effet, à partir de 2mm/j ce sont les occurrences qui contrôlent aussi cette phase.
- Dans la vallée du Zongo, les phases P1 et P3 sont contrôlées par la variation des intensités (augmentation au cours de P1, diminution au cours de P3) ; par contre, comme pour l'Altiplano, au cours de P2, le contrôle se fait à la fois par les occurrences et les intensités.

Nous n'avons pas là d'explication en termes de dynamique atmosphérique de ces résultats, mais ils devraient permettre de guider des recherches futures dans ce domaine. De surcroît, il y a un impact hydrologique direct de ce type de comportement puisque l'infiltration dans les sols est très sensible aux variations d'intensité des pluies.

VI.1.3 Variabilités interannuelle et décennale

- a) L'analyse de la **variabilité interannuelle** nous a ensuite naturellement amené à nous interroger sur les facteurs climatiques (dynamique atmosphérique, températures des océans) qui modulent les variabilités pluviométriques régionales. Notre étude montre que El Niño/La Niña, souvent cité comme facteur explicatif des pluies

dans la région, n'explique en fait que moins de 10% de la variabilité interannuelle des pluies sur l'Altiplano et moins de 30% dans la vallée du Zongo. On ne peut donc pas affirmer à une échelle locale l'existence d'une liaison univoque entre la pluie et l'ENSO. On constate que seuls les ENSO avec une durée d'au moins 6 mois et qui sont mis en place entre décembre et mars ont vraiment un impact sur la variabilité des pluies de cette région et encore d'une manière différenciée selon les types El Niño.

b) Variations des cycles décennaux des pluies.

La variation du cycle annuel moyen des deux dernières décennies a été examinée: 1992-2000 et 2001 – 2010. Sur l'Altiplano, la deuxième décennie présente une augmentation des pluies de 10% par rapport à la première et 18% dans la vallée du Zongo. Cette augmentation est due aux intensités journalières plus fortes observées durant les mois de janvier (16% de plus que la moyenne). Ces hausses des intensités peuvent être liées à une intensification de l'activité de la mousson Sud-Américaine (renforcement de la ZCIT) car leur présence est plus visible durant les mois de décembre, janvier et février.

Une analyse avec les plus longues séries de pluies mensuelles de l'Altiplano et la Ville de La Paz (plus de 60 ans) montre que la fluctuation temporelle dans les deux régions est assez similaire. Une période particulièrement sèche a été identifiée durant la décennie 1960-69, et deux périodes plutôt pluvieuses durant les décennies 1970-79 et 1980-89. Ces décennies montrent des variations comprises entre +/-5% et +/- 15% par rapport à la moyenne.

VI.1.4 Perspectives

Outre les points déjà mentionnés visant à mieux comprendre les facteurs de la dynamique atmosphérique expliquant le cycle saisonnier des précipitations et ses relations avec les anomalies de température du Pacifique et Atlantique, il faudrait s'intéresser aux évolutions futures possibles. Certaines études ont proposées une tendance à la diminution de 10% à 30% de la précipitation dans la région d'étude durant la saison des pluies au cours du 21ème siècle [Urrutia et Vuille, 2009 ; Minvielle et Garreaud, 2011]. Une suite à ce travail serait aussi d'analyser les tendances surtout saisonnières sur une période de temps plus longue que 19 ans. On a déjà mentionné que les masses d'air qui causent la précipitation sur le glacier montent par la vallée du Zongo, et donc une augmentation ou diminution durant la saison des pluies affecterait la précipitation sur le glacier. Pour approfondir cela, il sera nécessaire de focaliser les analyses dans la vallée du Zongo où on dispose d'une base de données mensuelle d'au moins 32 ans, sur 7 pluviomètres situées à différentes altitudes.

VI.2 Cycle saisonnier et cœur de la saison des pluies

VI.2.1 Relation de la durée de la saison des pluies avec la climatologie locale.

Il n'existe pas de méthode universellement reconnue pour décomposer objectivement le cycle saisonnier en phases caractéristiques, car elles ont le plus souvent été développées pour un climat donné ou une application particulière (agronomie ou hydrologie par exemple). Nous avons donc été amenés à proposer 4 méthodes – inspirées de travaux antérieurs – que nous avons comparées, en travaillant à différents seuils pour tester leur sensibilité. L'objectif principal était de vérifier si on peut déterminer un « cœur de saison des pluies », c'est-à-dire une période au cours de laquelle la pluie reste continûment forte et fréquente, ces trois notions (*continûment, forte, fréquente*) devant être définies par des critères objectifs.

On a ainsi pu montrer que deux méthodes, une basée sur un critère d'intensité (calcul des moyennes des précipitations tombées en cinq jours), et l'autre sur un critère d'occurrence (calcul du nombre de jours pluvieux sur une fenêtre glissante de 21 jours), donnaient des résultats assez semblables, pour ce qui concerne l'identification du cœur de la saison des pluies. Ce résultat traduit bien une certaine complexité du régime pluviométrique, piloté à la fois par les occurrences et les intensités, en contraste de ce que l'on connaît pour d'autres régions tropicales plus homogènes, telle que par exemple l'Afrique de l'Ouest, où le régime est surtout piloté par les occurrences [Le.Lay et Galle, 2005]

En se basant sur ces deux méthodes (Pentades et NJP), on a pu montrer que le cœur de la saison des pluies représente en moyenne 65% du total annuel sur l'Altiplano (durée moyenne de **102** jours, comprise entre 90 et 112 jours sur notre échantillon), **66** % dans la haute vallée du Zongo (durée moyenne de 108 jours) et **65** % dans la moyenne vallée du Zongo (durée moyenne de 160 jours, comprise entre 147 et 180 jours sur notre échantillon).

Comme le cœur de saison représente en moyenne de 60 à 70% de la pluie totale annuelle, il n'est pas étonnant qu'elle contrôle largement la variabilité interannuelle de la pluie totale : sur l'Altiplano plus de 70% de la variance de la pluie annuelle ; dans la vallée du Zongo entre 60% et 70% de la variance, selon la méthode. Dans cette dernière région la phase d'installation de la saison des pluies présente aussi un pourcentage de la précipitation non négligeable (30%), du fait de la présence continue de masses d'air chargées d'humidité.

Un autre point important est que la variabilité interannuelle de la durée du cœur de la saison des pluies est avant tout contrôlée par la variabilité de sa date de démarrage, son arrêt présentant moins de variabilité d'une année à l'autre.

VI.2.2 Perspectives.

Au plan strictement méthodologique on pourrait imaginer de tester d'autres méthodes pour décomposer le cycle pluviométrique annuel en différentes phases, par exemple en se référant à la distribution statistique et en sélectionnant des quantiles de pluie cumulée pour séparer les différentes phases. Cependant, ce type de méthode présente deux inconvénients majeurs : i) il faut connaître le total de l'année considérée pour faire la décomposition en quantiles ; ii) on a montré que les années particulières se caractérisaient précisément par une modification des quantités de pluie tombées dans les différentes phases du cycle saisonnier. Ceci ne signifie pas que des critères statistiques plus élaborés ne produiraient pas des résultats intéressants, mais à ce stade on peut considérer qu'une utilisation conjointe de la méthode des pentades (Intensités) et du nombre de jours pluvieux (occurrences) est suffisante au regard d'objectifs climatologiques simples.

Au-delà des aspects purement méthodologiques, cependant, on peut s'intéresser à décrire la variabilité du cycle saisonnier en fonction de son impact sur d'autres facteurs. Une telle démarche a été suivie pour d'autres régions tropicales où le cycle pluviométrique saisonnier présente des phases bien marquées et dont la variabilité interannuelle impacte fortement par exemples les rendements agricoles ou le cycle hydrologique. Dans notre cas, la variable d'intérêt est le débit de fonte glaciaire. Le point critique de la saison est celui la période d'arrêt de la période de fonte maximale qui est interrompue par l'arrivée des chutes de neige qui restent sur le glacier pour quelque jours et protègent le glacier de la forte radiation par effet d'albédo [Wagnon, 1999 ; Sicart, 2002]. Pour déterminer un cycle saisonnier des précipitations lié à leur impact glaciologique il faudrait donc prendre en compte la phase des précipitations et fixer un critère d'épaisseur de la chute de neige qui marquerait une inflexion durable dans la saison du bilan radiatif.

A l'évidence, la principale recherche à mener rapidement serait d'étudier, à l'aide de séries pluviométriques plus longues, **le conditionnement de la variabilité du cycle saisonnier par des facteurs atmosphériques de grande échelle**. Par exemple, Marengo et al. [2002] montrent que dans la région centrale de l'Amazonie brésilienne il existe une liaison entre les anomalies de la SST de l'Atlantique et du Pacifique avec les dates de démarrage et de fin de la saison des pluies, les anomalies négatives étant associées à un retard du démarrage de la saison des pluies. On suggère donc d'étudier des séries temporelles plus longues et à une échelle plutôt régionale (en prenant en compte tout l'Altiplano et plusieurs stations de l'Amazonie). Ainsi, on pourra savoir d'une manière plus précise les effets du Pacifique et de l'Atlantique sur la saison des pluies, et sur les régions qui entourent les Andes.

De manière générale, les études de cette saison en Bolivie sont limitées, donc des recherches plus poussées sur les variations de la saison des pluies seraient des apports importants pour la climatologie locale.

VI.-3. Analyse du débit de fonte et de ses relations avec la saison des pluies.

VI.3.1 Variabilité interannuelle des débits de fonte et lien avec El Niño/La Niña.

a) Les débits de fonte présentent un écart type de $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ et une moyenne de $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1992- 2010. Sept années s'écartant nettement de la moyenne ont été détectées : quatre avec une fusion très forte 1992, 1998, 1999 et 2010 et trois avec une fusion faible : 1993, 2001 et 2003. Les valeurs les plus éloignées de la moyenne (>1.5 écart type) correspondent aux années de très fortes fusion 1998 et 1999, alors que les années avec une faible fusion ont des débits plus proches de la moyenne. Une observation similaire a été faite avec la précipitation autour du glacier, où les années caractérisées comme déficitaires sont plus éloignées de la moyenne que celles caractérisées comme pluvieuses.

b) Si, comme pour les précipitations, la corrélation interannuelle globale entre indice SOI et moyenne annuelle du débit est faible ($r^2=0.3$ sur 1992-2010), les années avec des comportements extrêmes sont le plus souvent liées à des phases « Niño » marquées (1992, 1998 et 2010, soit trois des quatre années de forts débits). La relation entre forte fusion et El Niño semble donc plus forte que celle entre déficit de précipitation et El Niño : les effets radiatifs liés à l'arrivée tardive de la saison des pluies (diminution comprise entre 55% et 65% par rapport à la moyenne de la précipitation pendant la période septembre-novembre d'installation de la saison des pluies) amplifient les effets du seul déficit pluviométrique. On notera également que la répartition saisonnière du supplément de débit de fonte est spécifique pour chacune des trois saisons, traduisant le fait que les Niño ont des structures différentes d'une occurrence à l'autre. Ceci explique pourquoi la corrélation « brutale » entre El Niño/La Niña et déficit pluviométrique ou bilan de masse glaciaire produit au final des résultats assez pauvres.

VI.3.2 Relation entre le climat local et le bilan de masse glaciaire.

Durant les années de forte fusion, l'ELA présente une hausse par rapport à la normale d'environ 200m (1992 et 1998) et d'environ 50m durant les années 1999 et 2010, et ce pour un déficit de précipitation compris entre 20% et 30%. Au contraire, durant les années de faible fusion l'ELA est plus basse que la moyenne (d'environ 150m), et la précipitation présente une hausse d'environ 10%.

Une partie importante de ce travail a consisté à étudier les relations entre des propriétés de la saison des pluies et les débits de fonte. Parmi six propriétés caractérisant la saison des pluies (DDP, DFP, durée, pluie

saisonniers, indice d'intensité et indice de concentration), trois sont apparues comme étant les mieux corrélées à la variabilité interannuelle des débits de fonte : la DDP (date de démarrage du cœur de la saison) explique 30% de la variance interannuelle des débits, la durée du cœur de la saison des pluies en explique 40%, et la pluie qui tombe durant la saison humide en explique 57%. Cela est due au fait que les processus liés à la précipitation qui affectent le plus la fusion du glacier interviennent durant la saison des pluies.

VI.3.3 Perspectives

Notre travail d'analyse des débits de fonte a porté sur une période assez courte de mesures directes (1993-2008). Or il existe une série plus longue de débits mensuels reconstitués depuis l'année 1973 [Ribstein, et al., 1997], qui inclue cinq Niños forts (1978, 1983, 1987, 1992 et 1998) et quatre Niñas fortes (1975, 1988, 2001 et 2008). Etudier cette période de 20 années supplémentaires à l'échelle mensuelle constituerait donc le prolongement le plus immédiat de notre travail.

L'orientation et la pente d'un glacier sont des facteurs importants pour expliquer l'extension des glaciers et leur dynamique de fusion. Les glaciers exposés au Nord peuvent reculer plus que ceux exposés au Sud, du fait de leur plus grande exposition solaire. Néanmoins l'exposition aux précipitations, qui proviennent généralement de l'est, peut être aussi déterminante. Le Zongo a une orientation NE. Une comparaison avec des glaciers plutôt exposés au Sud, donnerait une idée des différences de fonctionnements liés à l'exposition. Bien que le réseau de suivi des glaciers soit assez restreint en Bolivie, ceux du Tuni Condoriri et du Charquini présentent une orientation SO avec des données mensuelles d'au moins 5 ans. Une comparaison de la variabilité temporelle des bilans de ces glaciers avec celle du Zongo serait donc intéressante.

L'analyse à fine échelle de la précipitation et sa relation avec les débits de fonte ont soulevé des questions comme : quelles sont la fréquence et l'intensité de la précipitation de type neigeux nécessaires pour protéger le glacier de la forte radiation ? Quelles seraient les quantités nécessaires de précipitations (en fréquences et intensités) pour augmenter ou diminuer la fusion durant les prochaines années ? Pour répondre à ces questions, on ne peut se contenter de travailler à l'échelle journalière, qui ne permet pas d'approcher les processus de suffisamment près. Des études au pas de temps horaires doivent donc être envisagées, permettant notamment de documenter des pics de fonte en cours de journée, ce qui, outre l'intérêt en termes de compréhension des processus, est une information importante pour les modèles hydrologiques.

Finalement, on considère que cette étude peut être appliquée aux autres glaciers situés dans les tropiques. Pour ça, on a besoin d'avoir un réseau de mesure assez dense avec un bon contrôle composé de pluviomètres et de stations hydrométriques qui peuvent donner une

information à différentes échelles de temps (journalières et mensuelles). Les glaciers les plus documentés sont ceux situés dans la cordillère Blanche au Pérou et l'Antisana en Equateur. En comparant ces différents sites, on pourra montrer des similitudes et des différences de régimes hydro-pluviométriques des bassins versants englacés à différentes latitudes (tropiques externes et internes). Cette information sur les Andes, à différentes échelles temporelles, et plus particulièrement sur la saison des pluies, peut fournir de nouveaux outils pour l'application de modèles hydro-glaciologique dans des régions où la simulation de la neige est une variable clé. Ces outils seront alors adaptés aux changements climatiques du 21^{ème} siècle. En particulier, on devrait s'intéresser à la question de l'influence du réchauffement de la haute troposphère – plus marquée dans la bande intertropicale et parfois présentée comme un facteur majeur de l'évolution de la couverture glacière au cours du 21^{ème} siècle. Si tant est que cette influence soit réellement avérée, elle est certainement différente selon les régions d'intérêt, ce qui, là aussi, plaide pour des études multi-sites dans les Andes intertropicales.

**ANNEXE 1 : RECONSTITUTION DES DONNES
DONNEES DES DEBITS JOURNALIERES RECONSTITUÉES
DE LA STATION TUBO-4830m**

1998/99	
12/02/1999	0,17
13/02/1999	0,14
14/02/1999	0,15
15/02/1999	0,2
16/02/1999	0,16
17/02/1999	0,12
18/02/1999	0,1
19/02/1999	0,09
20/02/1999	0,1
21/02/1999	0,1
22/02/1999	0,13
23/02/1999	0,12

2006/07	
13/11/2006	0,35
14/11/2006	0,37
15/11/2006	0,28
16/11/2006	0,22
17/11/2006	0,2
18/11/2006	0,19
19/11/2006	0,17
20/11/2006	0,14
21/11/2006	0,15
22/11/2006	0,21
23/11/2006	0,24
24/11/2006	0,21
25/11/2006	0,18
26/11/2006	0,2
27/11/2006	0,19
28/11/2006	0,18
29/11/2006	0,18
30/11/2006	0,15
01/12/2006	0,14
02/12/2006	0,12
03/12/2006	0,11
04/12/2006	0,12
05/12/2006	0,11
11/08/2007	0,04
12/08/2007	0,04
13/08/2007	0,04
14/08/2007	0,04
15/08/2007	0,04
16/08/2007	0,03
17/08/2007	0,03
18/08/2007	0,03
19/08/2007	0,03
20/08/2007	0,03

2007/08							
15/09/2007	0,06	20/10/2007	0,17	21/12/2007	0,29	29/04/2008	0,06
16/09/2007	0,05	21/10/2007	0,15	22/12/2007	0,27	30/04/2008	0,12
17/09/2007	0,06	22/10/2007	0,14	23/12/2007	0,25	01/05/2008	0,12
18/09/2007	0,06	23/10/2007	0,19	24/12/2007	0,26	02/05/2008	0,11
19/09/2007	0,06	24/10/2007	0,27	25/12/2007	0,25	03/05/2008	0,1
20/09/2007	0,06	25/10/2007	0,44	26/12/2007	0,26	04/05/2008	0,11
21/09/2007	0,06	26/10/2007	0,47	27/12/2007	0,25	05/05/2008	0,13
22/09/2007	0,06	27/10/2007	0,57	28/12/2007	0,22	06/05/2008	0,13
23/09/2007	0,07	28/10/2007	0,42	29/12/2007	0,22	07/05/2008	0,12
24/09/2007	0,08	29/10/2007	0,31	30/12/2007	0,25	08/05/2008	0,11
25/09/2007	0,09	30/10/2007	0,31	31/12/2007	0,21	09/05/2008	0,1
26/09/2007	0,08	31/10/2007	0,3	01/01/2008	0,16	10/05/2008	0,08
27/09/2007	0,07	01/11/2007	0,27	02/01/2008	0,16	11/05/2008	0,06
28/09/2007	0,07	02/11/2007	0,33	03/01/2008	0,17	12/05/2008	0,16
29/09/2007	0,06	03/11/2007	0,43	04/01/2008	0,19	13/05/2008	0,14
30/09/2007	0,07	04/11/2007	0,38	05/01/2008	0,2	14/05/2008	0,06
01/10/2007	0,08	05/11/2007	0,4	06/01/2008	0,19		
02/10/2007	0,11	06/11/2007	0,3	07/01/2008	0,2	19/07/2008	0,06
03/10/2007	0,14	07/11/2007	0,22	08/01/2008	0,21	20/07/2008	0,05
04/10/2007	0,14	08/11/2007	0,28	09/01/2008	0,18	21/07/2008	0,04
05/10/2007	0,13	09/11/2007	0,28	10/01/2008	0,15	22/07/2008	0,04
06/10/2007	0,1	10/11/2007	0,38	11/01/2008	0,15	23/07/2008	0,05
07/10/2007	0,09	11/11/2007	0,38	12/01/2008	0,19	24/07/2008	0,06
08/10/2007	0,13	12/11/2007	0,4	13/01/2008	0,21	25/07/2008	0,08
09/10/2007	0,16	13/11/2007	0,46	14/01/2008	0,24	26/07/2008	0,08
10/10/2007	0,12	14/11/2007	0,28	15/01/2008	0,28	27/07/2008	0,07
11/10/2007	0,13	15/11/2007	0,22	16/01/2008	0,28		
12/10/2007	0,17	16/11/2007	0,2	17/01/2008	0,27		
13/10/2007	0,16	17/11/2007	0,19				
14/10/2007	0,14	18/11/2007	0,17				
15/10/2007	0,1	19/11/2007	0,14				
16/10/2007	0,08	20/11/2007	0,15				
17/10/2007	0,09	21/11/2007	0,21				
18/10/2007	0,12	22/11/2007	0,24				
19/10/2007	0,16	23/11/2007	0,21				

2008/09			
01/09/2008	0,06	13/03/2009	0,04
02/09/2008	0,06	14/03/2009	0,04
03/09/2008	0,06	15/03/2009	0,04
04/09/2008	0,05	16/03/2009	0,04
05/09/2008	0,03	17/03/2009	0,04
06/09/2008	0,02	18/03/2009	0,04
07/09/2008	0,01		
08/09/2008	0,01	01/05/2009	0,02
09/09/2008	0,01	02/05/2009	0,02
10/09/2008	0,01	03/05/2009	0,02
11/09/2008	0,01	04/05/2009	0,02
12/09/2008	0,02	05/05/2009	0,02
13/09/2008	0,02	06/05/2009	0,02
14/09/2008	0,02	07/05/2009	0,02
15/09/2008	0,02	08/05/2009	0,02
16/09/2008	0,02	09/05/2009	0,02
17/09/2008	0,02	10/05/2009	0,02
18/09/2008	0,03	11/05/2009	0,02
19/09/2008	0,03	12/05/2009	0,02
20/09/2008	0,04	13/05/2009	0,02
21/09/2008	0,04	14/05/2009	0,03
22/09/2008	0,05	15/05/2009	0,03
23/09/2008	0,06		
24/09/2008	0,06		
25/09/2008	0,06		
26/09/2008	0,06		
27/09/2008	0,06		
28/09/2008	0,06		
29/09/2008	0,05		
30/09/2008	0,02		

2009/10			
01/10/2009	0,23	20/11/2009	0,32
02/10/2009	0,26	21/11/2009	0,34
03/10/2009	0,22	22/11/2009	0,33
04/10/2009	0,23	23/11/2009	0,35
05/10/2009	0,22	24/11/2009	0,34
06/10/2009	0,2	25/11/2009	0,39
07/10/2009	0,2	26/11/2009	0,42
08/10/2009	0,29	27/11/2009	0,39
09/10/2009	0,38	28/11/2009	0,42
10/10/2009	0,36	29/11/2009	0,4
11/10/2009	0,34	30/11/2009	0,4
12/10/2009	0,34	01/12/2009	0,37
13/10/2009	0,33	02/12/2009	0,3
14/10/2009	0,34	03/12/2009	0,28
15/10/2009	0,28	04/12/2009	0,21
16/10/2009	0,24		
17/10/2009	0,29		
18/10/2009	0,31		
19/10/2009	0,28		
20/10/2009	0,27		
21/10/2009	0,3		
22/10/2009	0,3		
23/10/2009	0,33		
24/10/2009	0,34		
25/10/2009	0,33		
26/10/2009	0,36		
27/10/2009	0,38		
28/10/2009	0,39		
29/10/2009	0,42		
30/10/2009	0,42		

DONNES PLUVIOMETRIQUES JOURNALIERES RECONSTITUÉES DE PLATAFORMA

1998-99					
01/12/1998	1,47	01/01/1999	9,38	01/02/1999	15,27
02/12/1998	0	02/01/1999	4,97	02/02/1999	4,75
03/12/1998	0,44	03/01/1999	10,91	03/02/1999	4,48
04/12/1998	0,31	04/01/1999	1,04	04/02/1999	12,76
05/12/1998	0,41	05/01/1999	3,13	05/02/1999	6,33
06/12/1998	25,94	06/01/1999	9,33	06/02/1999	13,71
07/12/1998	0,93	07/01/1999	10,18	07/02/1999	5,15
08/12/1998	6	08/01/1999	3,61	08/02/1999	9,37
09/12/1998	2,39	09/01/1999	1,61	09/02/1999	2,63
10/12/1998	5,63	10/01/1999	6,72	10/02/1999	4,96
11/12/1998	0,62	11/01/1999	1,06	11/02/1999	2,67
12/12/1998	0	12/01/1999	2,12	12/02/1999	8,79
13/12/1998	0	13/01/1999	4,4	13/02/1999	12,12
14/12/1998	0	14/01/1999	10,46	14/02/1999	5,76
15/12/1998	1,57	15/01/1999	1,33	15/02/1999	15
16/12/1998	5,41	16/01/1999	0,73	16/02/1999	1,58
17/12/1998	3,29	17/01/1999	0	17/02/1999	11,68
18/12/1998	0,87	18/01/1999	0	18/02/1999	3,07
19/12/1998	0	19/01/1999	1,2	19/02/1999	5,2
20/12/1998	4,3	20/01/1999	4,25	20/02/1999	4,65
21/12/1998	7,96	21/01/1999	1,37	21/02/1999	7,7
22/12/1998	1,93	22/01/1999	3,62	22/02/1999	2,32
23/12/1998	2,77	23/01/1999	5,08	23/02/1999	1,45
24/12/1998	0	24/01/1999	2,56	24/02/1999	7
25/12/1998	0,13	25/01/1999	3,95	25/02/1999	10
26/12/1998	0	26/01/1999	1,89	26/02/1999	5,97
27/12/1998	2,63	27/01/1999	12,63	27/02/1999	2,06
28/12/1998	0,21	28/01/1999	2,76	28/02/1999	1,08
29/12/1998	1,33	29/01/1999	4,57		
30/12/1998	0,98	30/01/1999	10,6		
31/12/1998	24,61	31/01/1999	14,66		

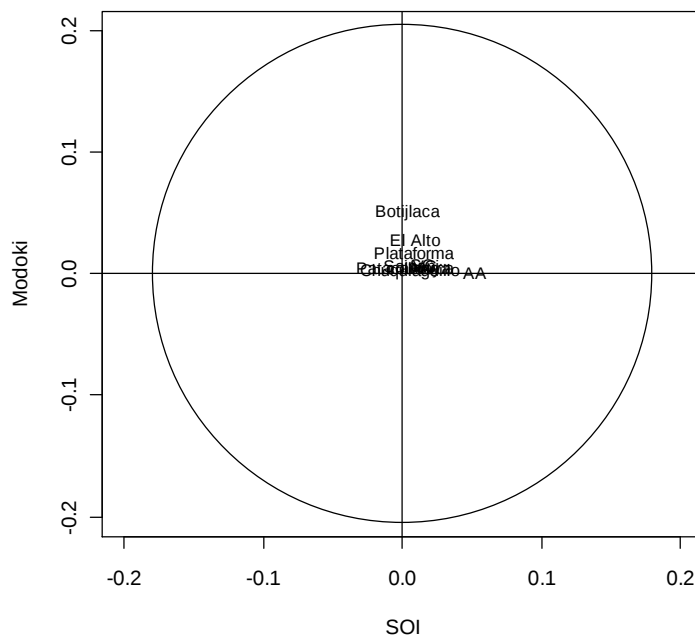
2005-06	
01/01/2006	6,87
02/01/2006	17,30
03/01/2006	5,73
04/01/2006	2,23
05/01/2006	0,50
06/01/2006	0,00
07/01/2006	0,67
08/01/2006	0,00
09/01/2006	0,00
10/01/2006	0,33
11/01/2006	7,17
12/01/2006	11,93
13/01/2006	13,07
14/01/2006	15,60
15/01/2006	17,40
16/01/2006	13,07
17/01/2006	4,33
18/01/2006	9,17
19/01/2006	3,33
20/01/2006	4,57
21/01/2006	12,47
22/01/2006	10,03
23/01/2006	4,50
24/01/2006	20,47
25/01/2006	12,27
26/01/2006	22,13
27/01/2006	12,23
28/01/2006	2,93
29/01/2006	4,17
30/01/2006	2,60
31/01/2006	0,67

ANNEXE 2

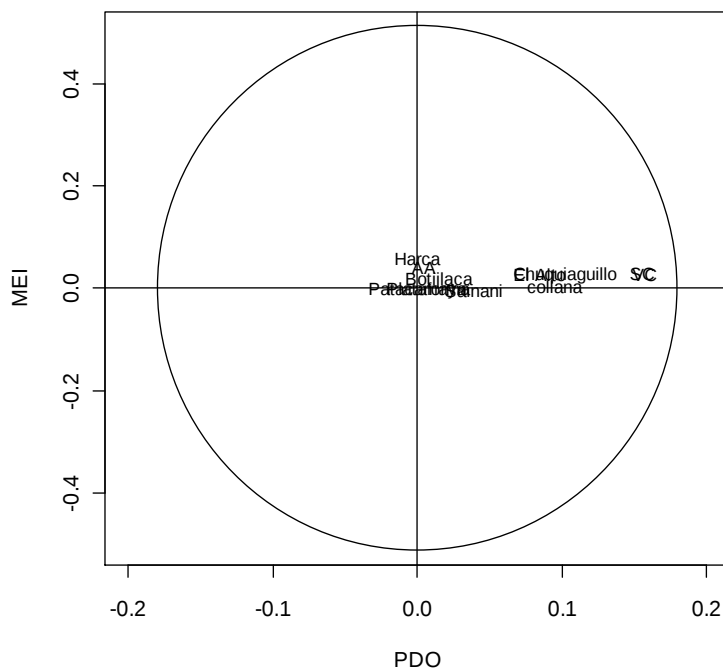
CERCLES DE CORRELATION TRIMESTRELLE ENTRE LES INDICES DU PACIFIQUE ET ATLANTIQUE ET LA PRECIPITATION DE 26 PLUVIOMETRES

El Niño/La Niña (DJF) – Precipitation (SON)

Niño/Niña (DJF) – Précipitation (SON)

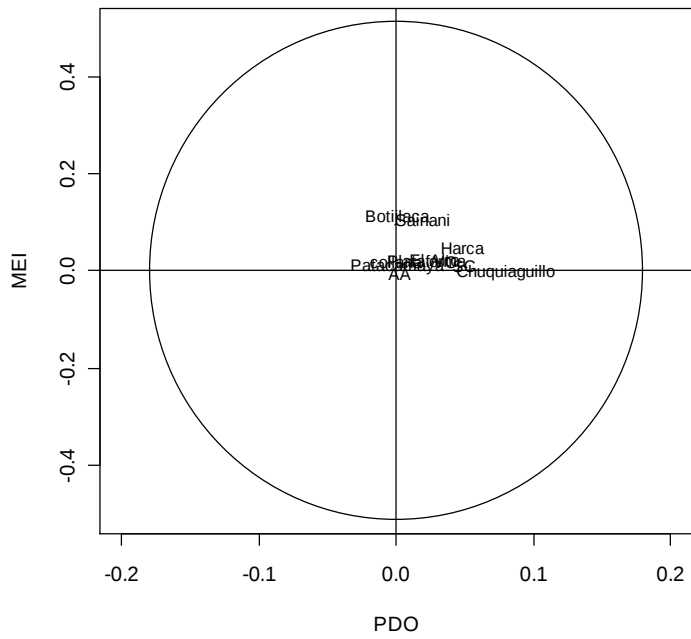


Niño/Niña (DJF) – Précipitation (SON)

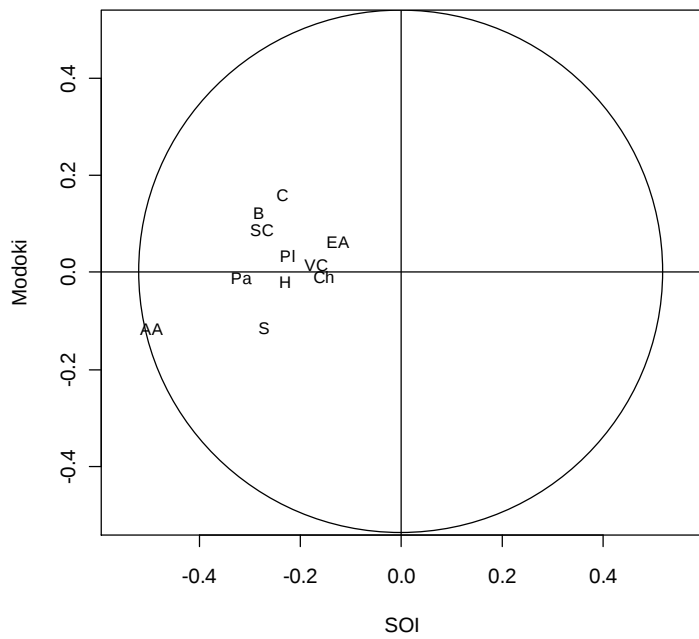


ENSO (DJF) – PLUIE (MAM)

Niño/Niña (DJF) – Précipitation (MAM)

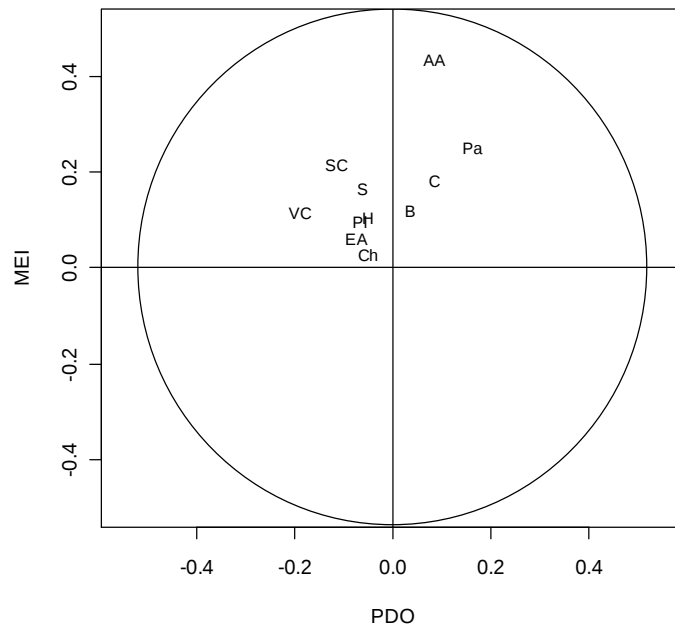


Niño/Niña (DJF) – Précipitation (MAM)



ENSO (DJF) – PLUIE (JJA)

Niño/Niña (DJF) – Précipitation (JJA)



ANNEXE 3

DATES CORRESPONDANT AUX PENTADES (A) ET DATES CORRESPONDANT AUX NOMBRE DE JOURS (B) POUR L'ANNEE HYDROLOGIQUE AOUT - JUILLET

(A) DATE - PENTADES

DATE	PENTADE	DATE	PENTADE	DATE	PENTADE
01-août		13-déc.	27	02-mai	55
05-août	1	18-déc.	28	07-mai	56
10-août	2	23-déc.	29	12-mai	57
15-août	3	28-déc.	30	17-mai	58
20-août	4	02-janv.	31	22-mai	59
25-août	5	07-janv.	32	27-mai	60
30-août	6	12-janv.	33	01-juin	61
04-sep	7	17-janv.	34	06-juin	62
09-sep	8	22-janv.	35	11-juin	63
14-sep	9	27-janv.	36	16-juin	64
19-sep	10	01-févr.	37	21-juin	65
24-sep	11	06-févr.	38	26-juin	66
29-sep	12	11-févr.	39	01-juil.	67
04-oct.	13	16-févr.	40	06-juil.	68
09-oct.	14	21-févr.	41	11-juil.	69
14-oct.	15	26-févr.	42	16-juil.	70
19-oct.	16	03-mars	43	21-juil.	71
24-oct.	17	08-mars	44	26-juil.	72
29-oct.	18	13-mars	45	31-juil.	73
03-nov.	19	18-mars	46		
08-nov.	20	23-mars	47		
13-nov.	21	28-mars	48		
18-nov.	22	02-avr	49		
23-nov.	23	07-avr	50		
28-nov.	24	12-avr	51		
03-déc.	25	17-avr	52		
08-déc.	26	22-avr	53		
		27-avr	54		

(B) DATE - NOMBRE DE JOURS

01-août	1	26-sept	57	21-nov.	113	16-janv.	169	12-mars	225	07-mai	281	02-juil.	337
02-août	2	27-sept	58	22-nov.	114	17-janv.	170	13-mars	226	08-mai	282	03-juil.	338
03-août	3	28-sept	59	23-nov.	115	18-janv.	171	14-mars	227	09-mai	283	04-juil.	339
04-août	4	29-sept	60	24-nov.	116	19-janv.	172	15-mars	228	10-mai	284	05-juil.	340
05-août	5	30-sept	61	25-nov.	117	20-janv.	173	16-mars	229	11-mai	285	06-juil.	341
06-août	6	01-oct.	62	26-nov.	118	21-janv.	174	17-mars	230	12-mai	286	07-juil.	342
07-août	7	02-oct.	63	27-nov.	119	22-janv.	175	18-mars	231	13-mai	287	08-juil.	343
08-août	8	03-oct.	64	28-nov.	120	23-janv.	176	19-mars	232	14-mai	288	09-juil.	344
09-août	9	04-oct.	65	29-nov.	121	24-janv.	177	20-mars	233	15-mai	289	10-juil.	345
10-août	10	05-oct.	66	30-nov.	122	25-janv.	178	21-mars	234	16-mai	290	11-juil.	346
11-août	11	06-oct.	67	01-déc.	123	26-janv.	179	22-mars	235	17-mai	291	12-juil.	347
12-août	12	07-oct.	68	02-déc.	124	27-janv.	180	23-mars	236	18-mai	292	13-juil.	348
13-août	13	08-oct.	69	03-déc.	125	28-janv.	181	24-mars	237	19-mai	293	14-juil.	349
14-août	14	09-oct.	70	04-déc.	126	29-janv.	182	25-mars	238	20-mai	294	15-juil.	350
15-août	15	10-oct.	71	05-déc.	127	30-janv.	183	26-mars	239	21-mai	295	16-juil.	351
16-août	16	11-oct.	72	06-déc.	128	31-janv.	184	27-mars	240	22-mai	296	17-juil.	352
17-août	17	12-oct.	73	07-déc.	129	01-févr.	185	28-mars	241	23-mai	297	18-juil.	353
18-août	18	13-oct.	74	08-déc.	130	02-févr.	186	29-mars	242	24-mai	298	19-juil.	354
19-août	19	14-oct.	75	09-déc.	131	03-févr.	187	30-mars	243	25-mai	299	20-juil.	355
20-août	20	15-oct.	76	10-déc.	132	04-févr.	188	31-mars	244	26-mai	300	21-juil.	356
21-août	21	16-oct.	77	11-déc.	133	05-févr.	189	01-avr	245	27-mai	301	22-juil.	357
22-août	22	17-oct.	78	12-déc.	134	06-févr.	190	02-avr	246	28-mai	302	23-juil.	358
23-août	23	18-oct.	79	13-déc.	135	07-févr.	191	03-avr	247	29-mai	303	24-juil.	359
24-août	24	19-oct.	80	14-déc.	136	08-févr.	192	04-avr	248	30-mai	304	25-juil.	360
25-août	25	20-oct.	81	15-déc.	137	09-févr.	193	05-avr	249	31-mai	305	26-juil.	361
26-août	26	21-oct.	82	16-déc.	138	10-févr.	194	06-avr	250	01-juin	306	27-juil.	362
27-août	27	22-oct.	83	17-déc.	139	11-févr.	195	07-avr	251	02-juin	307	28-juil.	363
28-août	28	23-oct.	84	18-déc.	140	12-févr.	196	08-avr	252	03-juin	308	29-juil.	364
29-août	29	24-oct.	85	19-déc.	141	13-févr.	197	09-avr	253	04-juin	309	30-juil.	365
30-août	30	25-oct.	86	20-déc.	142	14-févr.	198	10-avr	254	05-juin	310	31-juil.	366
31-août	31	26-oct.	87	21-déc.	143	15-févr.	199	11-avr	255	06-juin	311		
01-sept	32	27-oct.	88	22-déc.	144	16-févr.	200	12-avr	256	07-juin	312		
02-sept	33	28-oct.	89	23-déc.	145	17-févr.	201	13-avr	257	08-juin	313		
03-sept	34	29-oct.	90	24-déc.	146	18-févr.	202	14-avr	258	09-juin	314		
04-sept	35	30-oct.	91	25-déc.	147	19-févr.	203	15-avr	259	10-juin	315		
05-sept	36	31-oct.	92	26-déc.	148	20-févr.	204	16-avr	260	11-juin	316		
06-sept	37	01-nov.	93	27-déc.	149	21-févr.	205	17-avr	261	12-juin	317		
07-sept	38	02-nov.	94	28-déc.	150	22-févr.	206	18-avr	262	13-juin	318		
08-sept	39	03-nov.	95	29-déc.	151	23-févr.	207	19-avr	263	14-juin	319		
09-sept	40	04-nov.	96	30-déc.	152	24-févr.	208	20-avr	264	15-juin	320		
10-sept	41	05-nov.	97	31-déc.	153	25-févr.	209	21-avr	265	16-juin	321		
11-sept	42	06-nov.	98	01-janv.	154	26-févr.	210	22-avr	266	17-juin	322		
12-sept	43	07-nov.	99	02-janv.	155	27-févr.	211	23-avr	267	18-juin	323		
13-sept	44	08-nov.	100	03-janv.	156	28-févr.	212	24-avr	268	19-juin	324		
14-sept	45	09-nov.	101	04-janv.	157	29-févr.	213	25-avr	269	20-juin	325		
15-sept	46	10-nov.	102	05-janv.	158	01-mars	214	26-avr	270	21-juin	326		
16-sept	47	11-nov.	103	06-janv.	159	02-mars	215	27-avr	271	22-juin	327		
17-sept	48	12-nov.	104	07-janv.	160	03-mars	216	28-avr	272	23-juin	328		
18-sept	49	13-nov.	105	08-janv.	161	04-mars	217	29-avr	273	24-juin	329		
19-sept	50	14-nov.	106	09-janv.	162	05-mars	218	30-avr	274	25-juin	330		
20-sept	51	15-nov.	107	10-janv.	163	06-mars	219	01-mai	275	26-juin	331		
21-sept	52	16-nov.	108	11-janv.	164	07-mars	220	02-mai	276	27-juin	332		
22-sept	53	17-nov.	109	12-janv.	165	08-mars	221	03-mai	277	28-juin	333		
23-sept	54	18-nov.	110	13-janv.	166	09-mars	222	04-mai	278	29-juin	334		
24-sept	55	19-nov.	111	14-janv.	167	10-mars	223	05-mai	279	30-juin	335		
25-sept	56	20-nov.	112	15-janv.	168	11-mars	224	06-mai	280	01-juil.	336		

ANNEXE 4

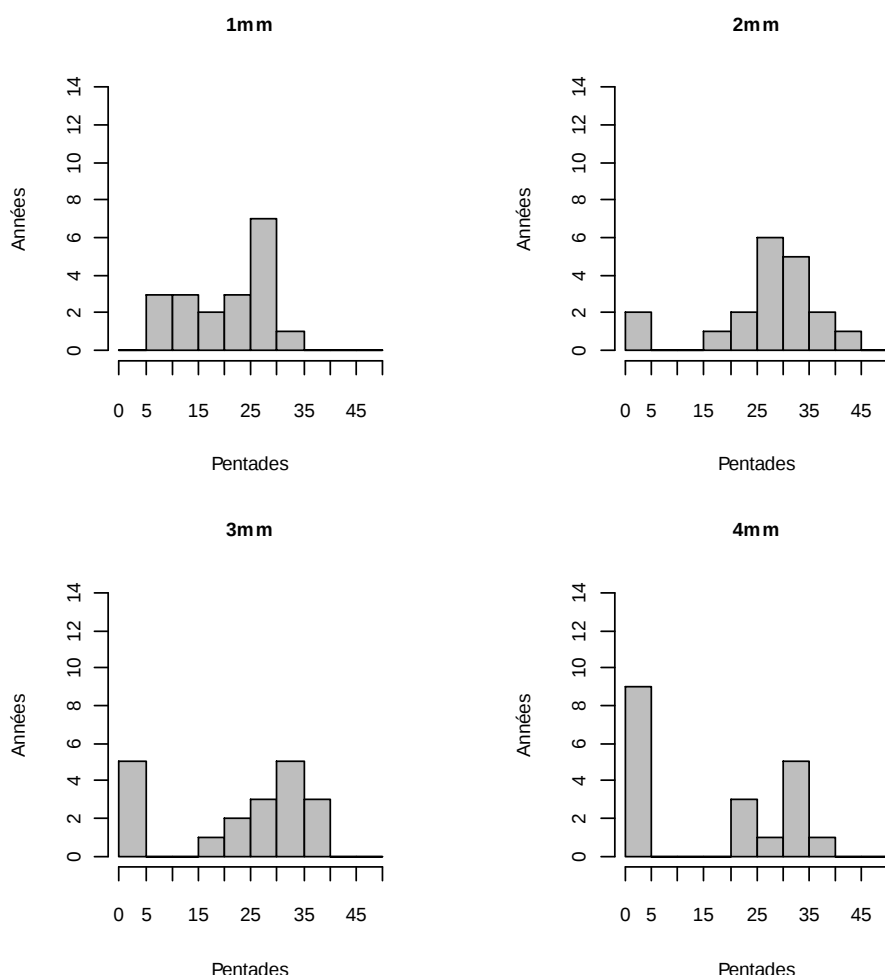
SENSIBILITE DE SEUILS POUR DETERMINER LA DATE DE DEMARRAGE DES PLUIES (DDP) ET LA DATE DE FIN DES PLUIES (DFP)

Dans cette annexe on veut montrer des résultats en employant différents seuils pour la détermination de la DDP et DFP, en utilisant les méthodes de Pentades et de NJP consécutifs

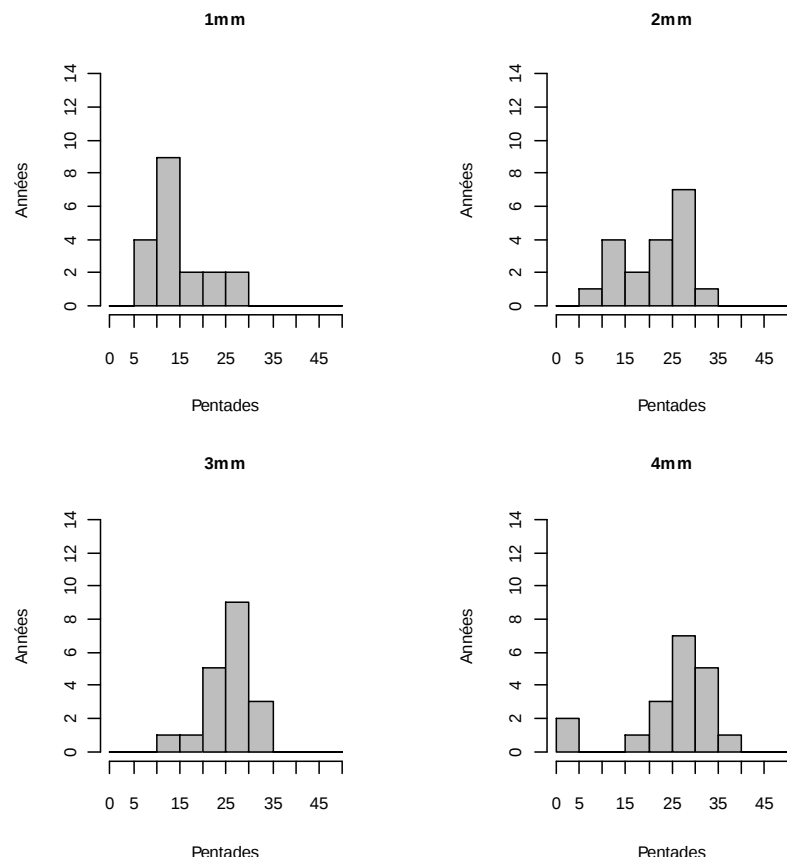
METHODE PENTADES

La figure ci-dessous montre les histogrammes de la DDP et DFP avec un seuil de 1, 2 ,3 et 4 mm à la station de Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca

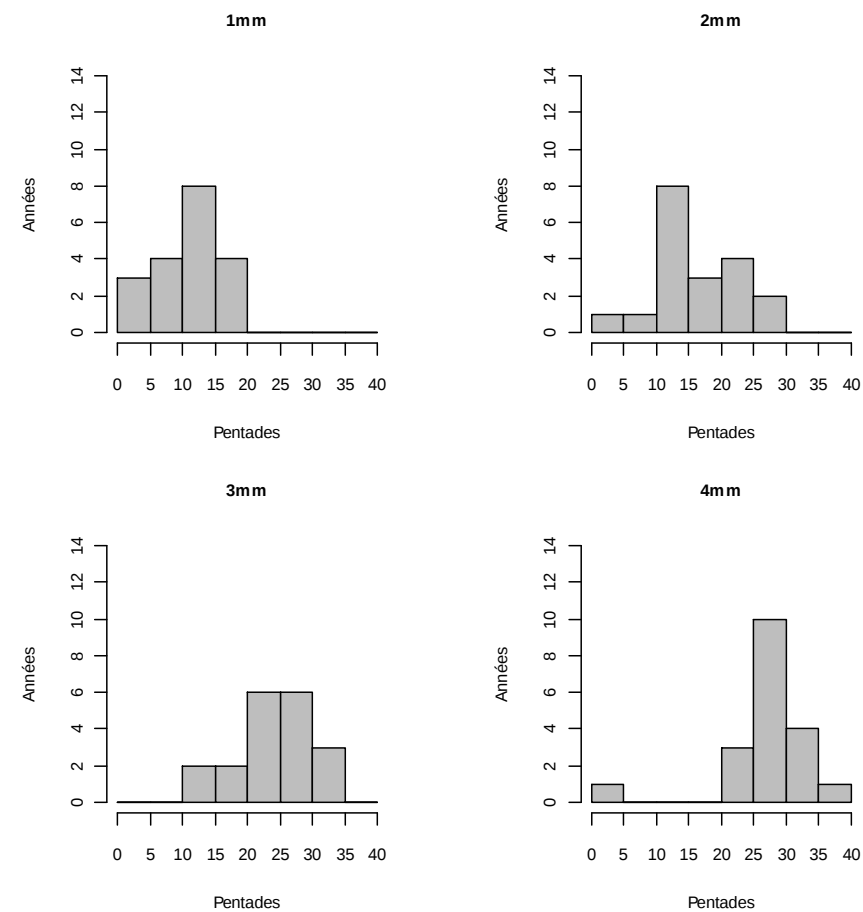
PATACAMAYA (DDP)

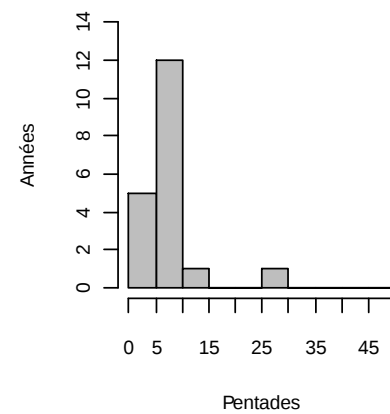
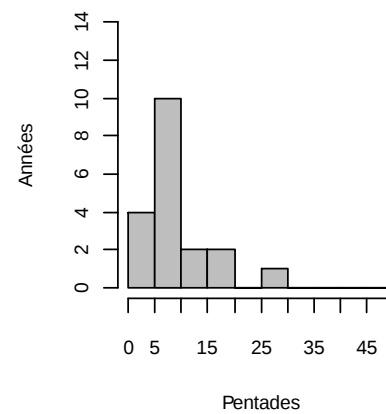
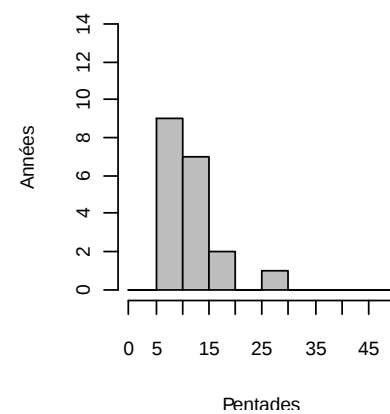
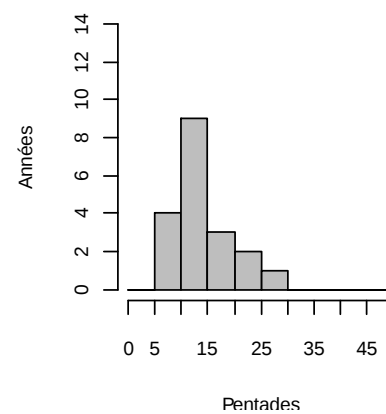


SAN CALIXTO

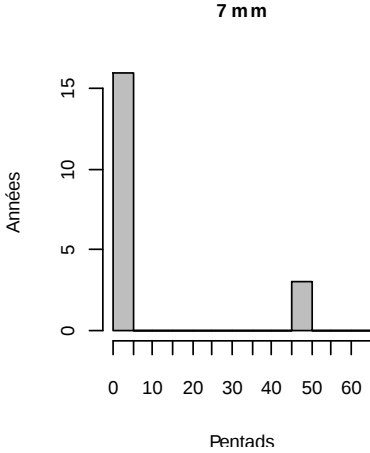
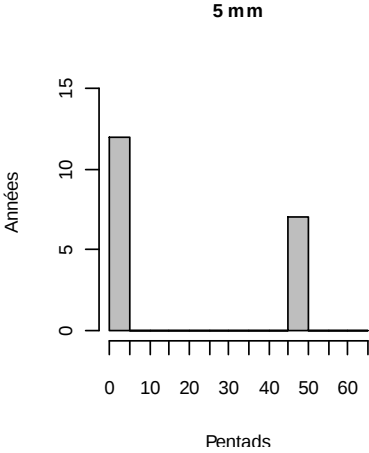
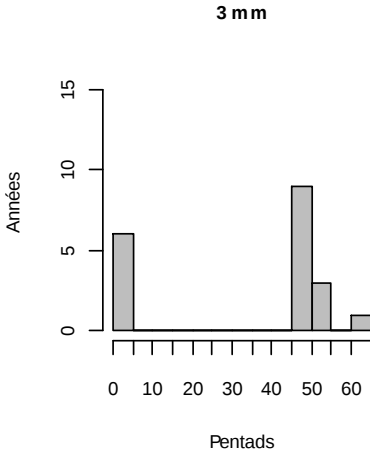
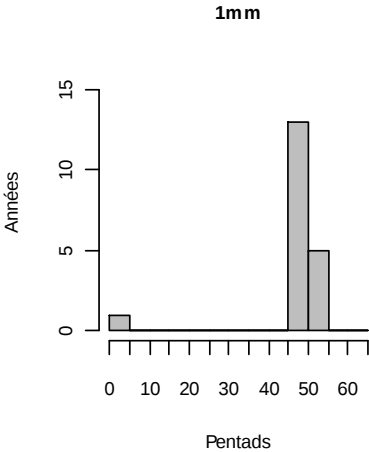


PLATAFORMA

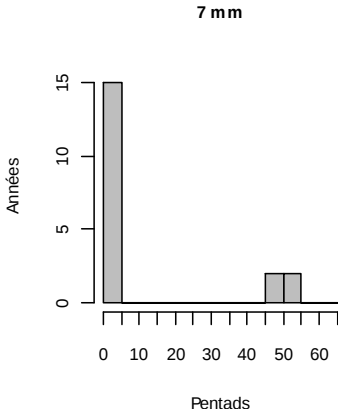
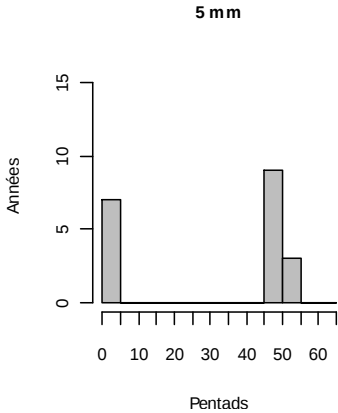
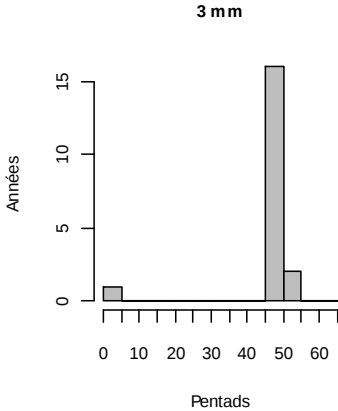
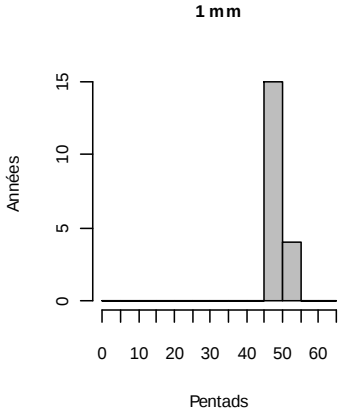


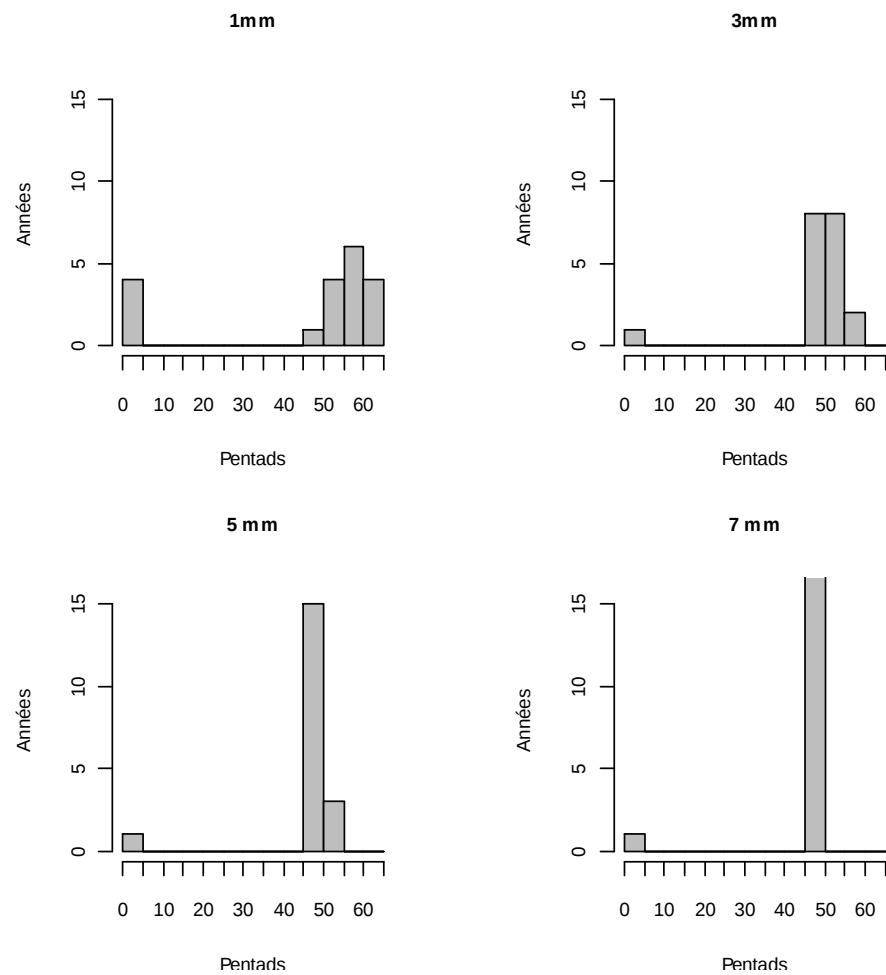
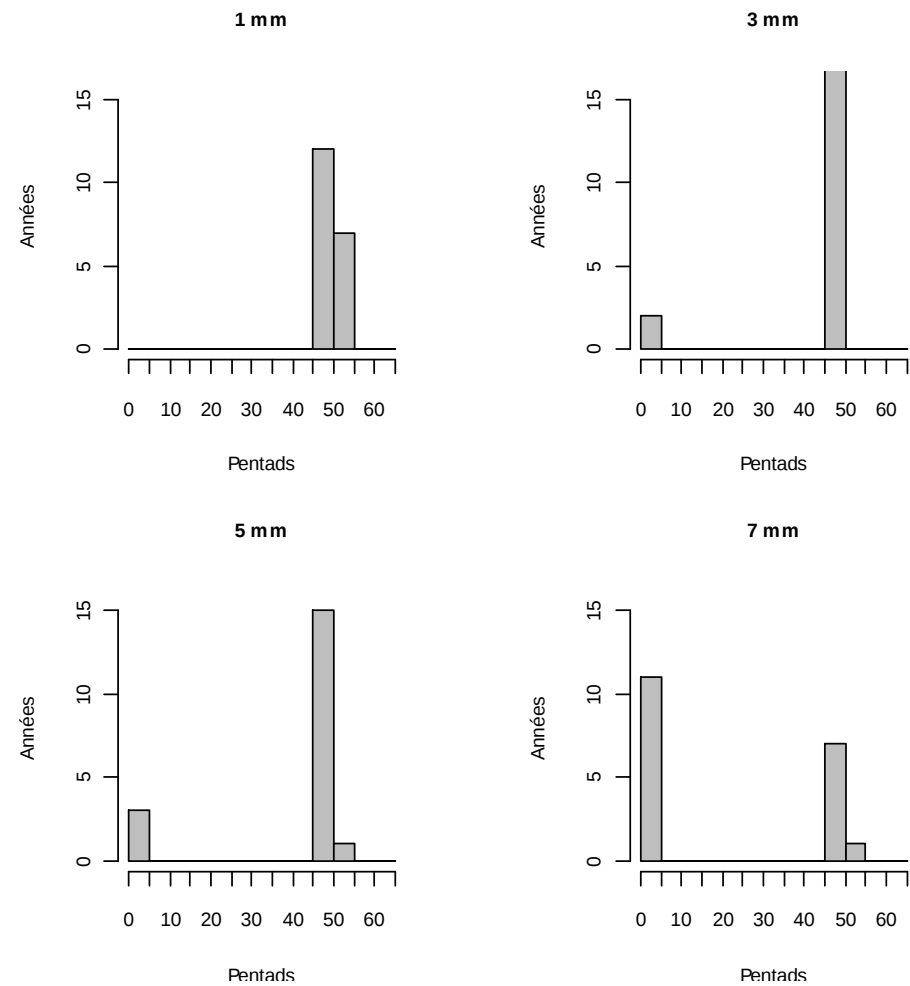
HARCA**1mm****2mm****3mm****4mm**

PATACAMAYA (DFP)



SC (DFP)

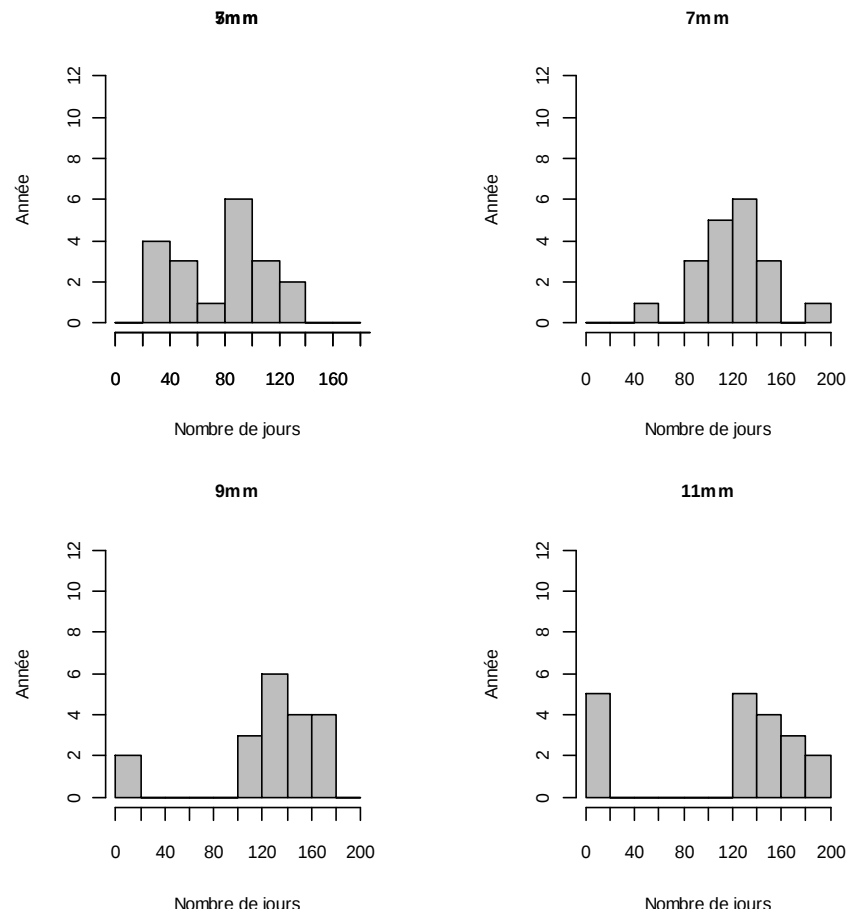


PLATAFORMA (DFP)**HARCA (DFP)**

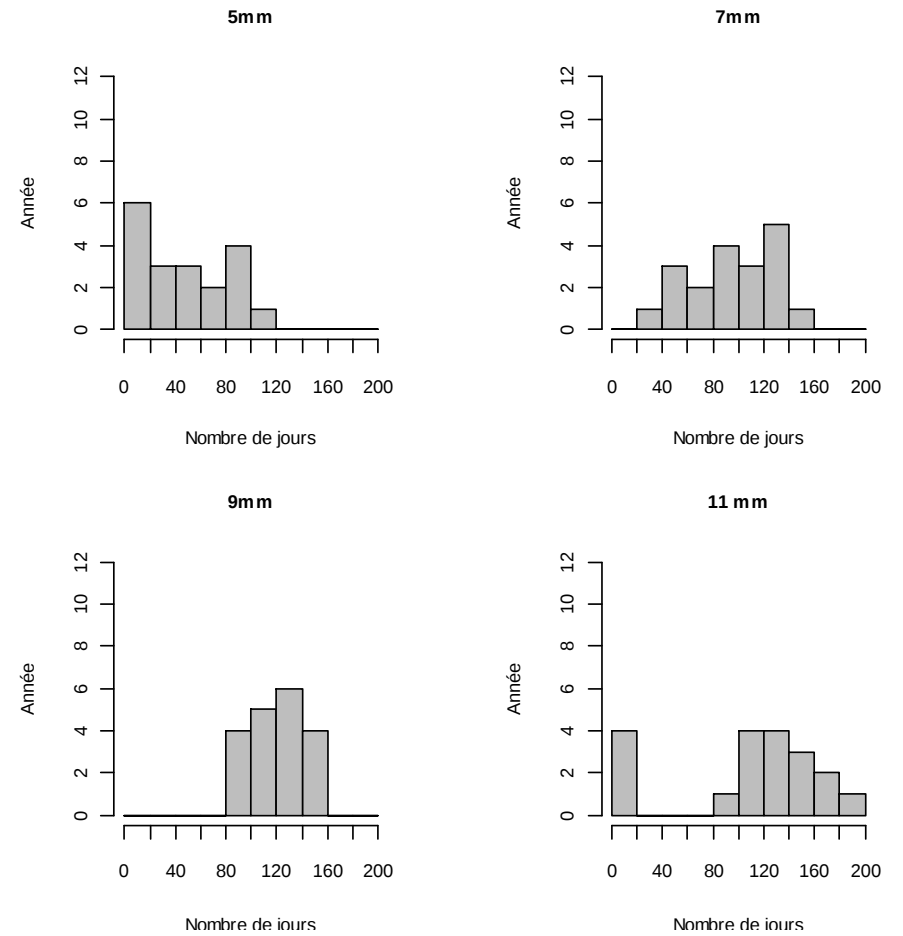
NJP CONSECUTIFS

La figure ci-dessous montre les histogrammes de la DDP et DFP selon la méthode NJP consécutifs avec un seuil de 1, 2 ,3 et 4 mm aux stations : Patacamaya, San Calixto, Plataforma et Harca.

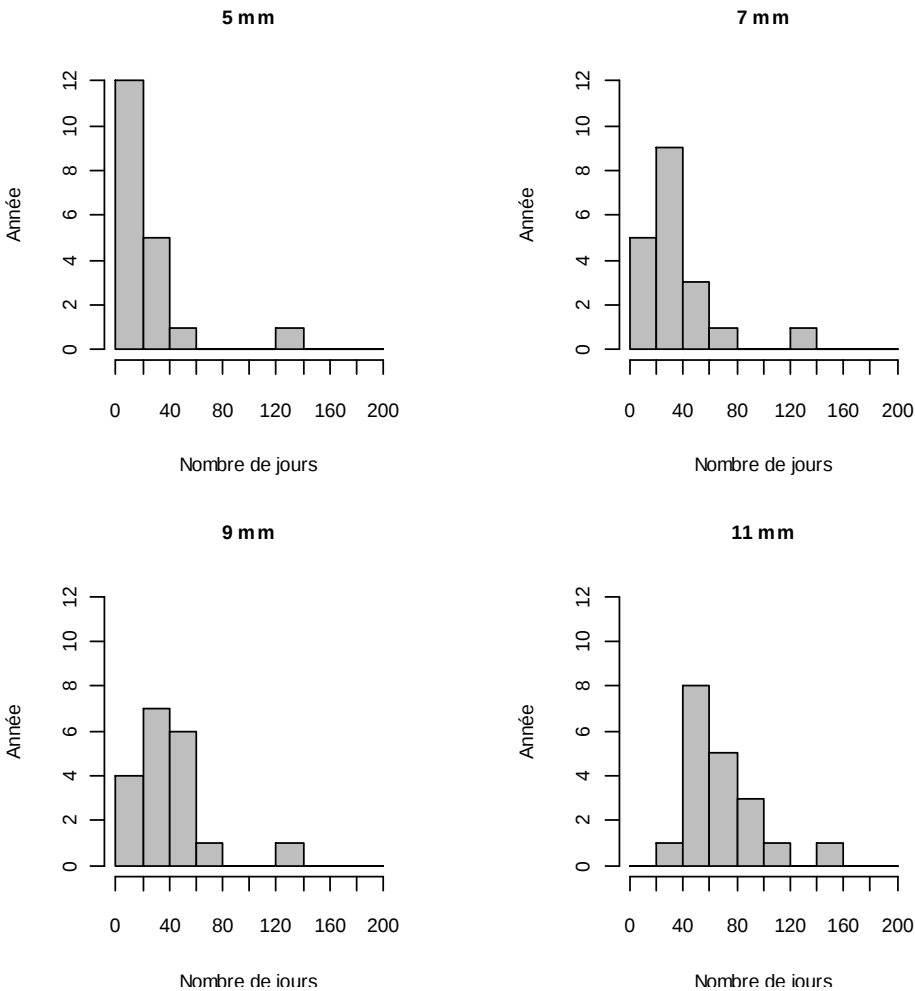
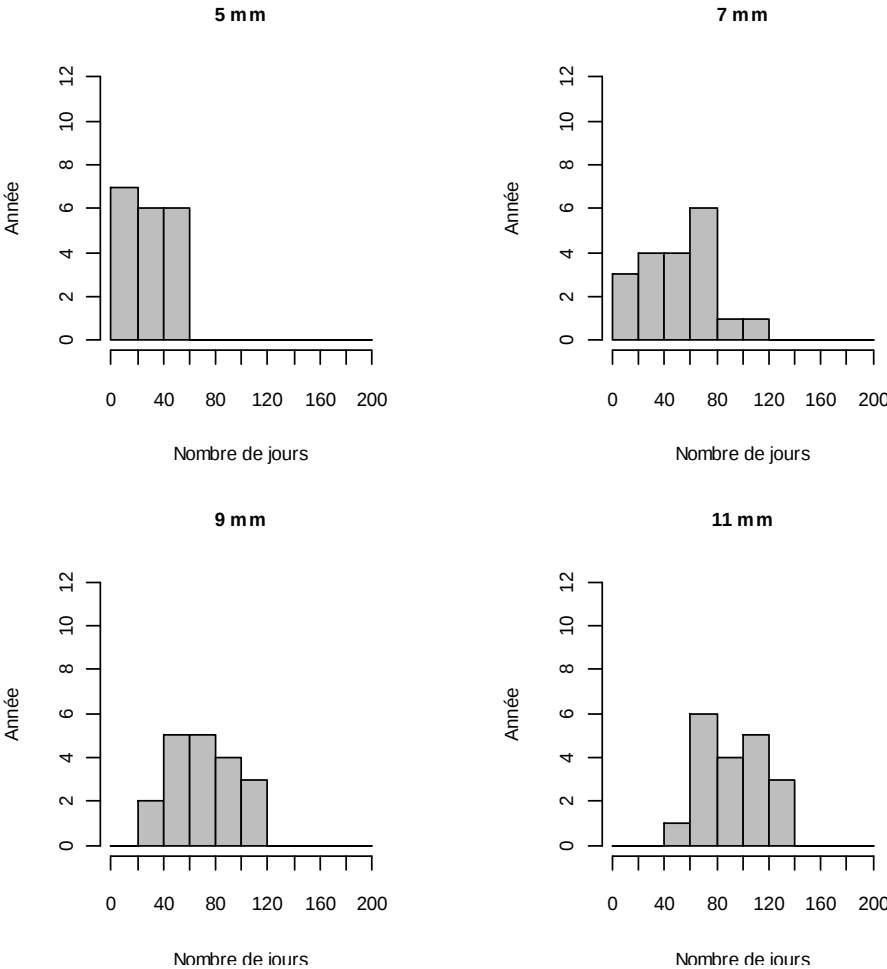
PATACAMAYA (DDP)



SAN CALIXTO

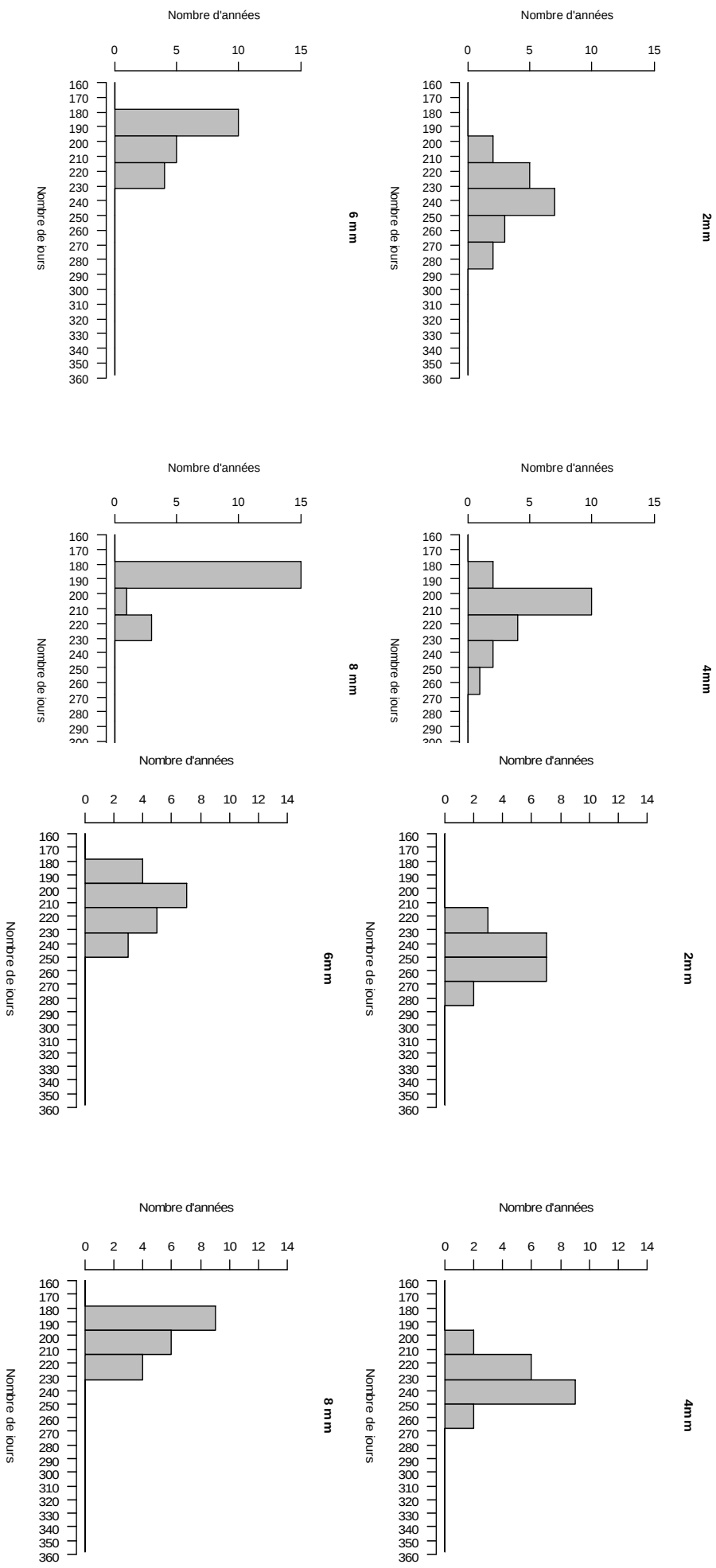


PLATAFORMA (DDP)



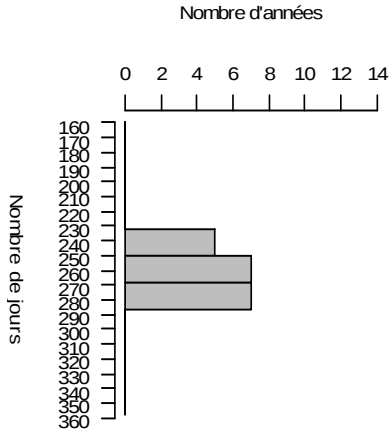
SAN CALIXTO (DFP)

PATACAMAYA (DFP)

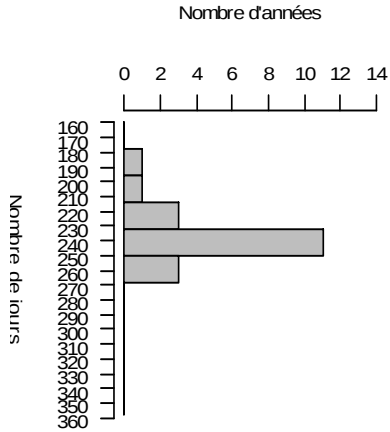


PLATAFORMA (DFP)

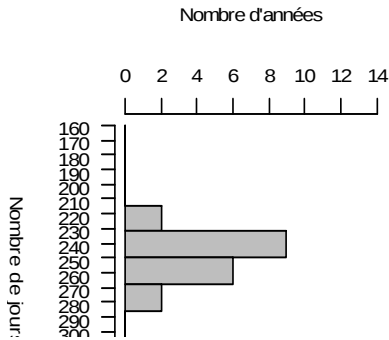
2mm



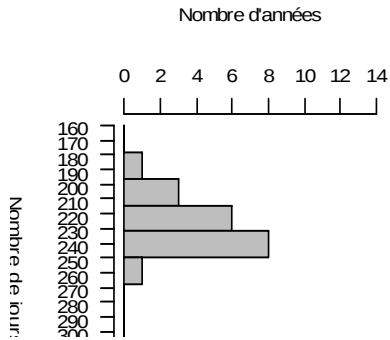
6mm



4mm

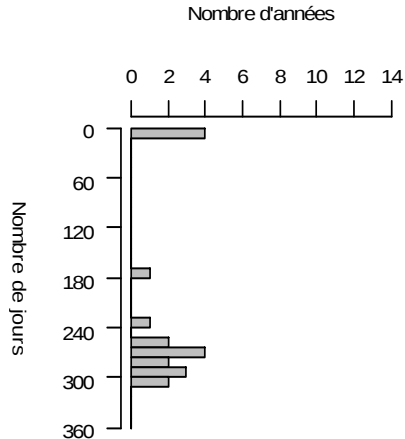


8mm

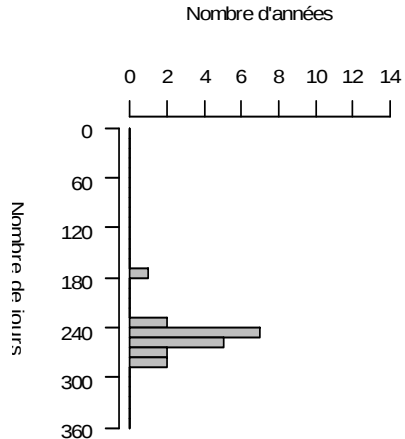


HARCA (DFP)

4mm

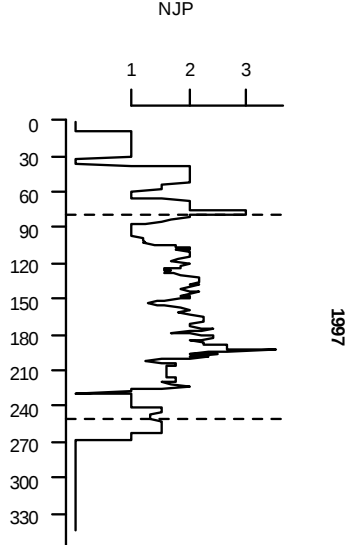
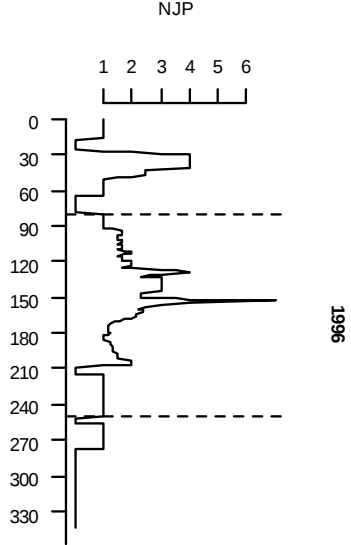
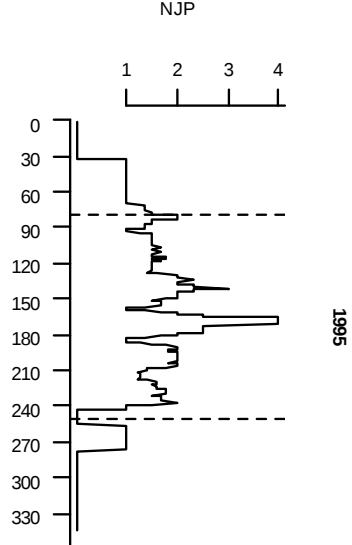
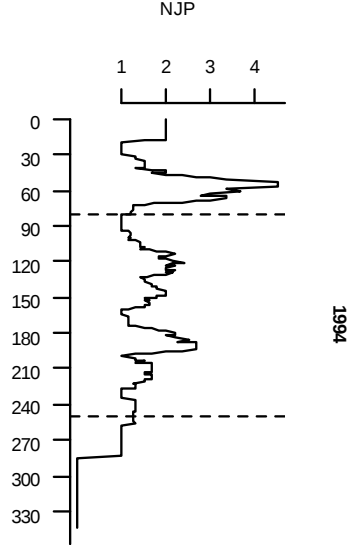
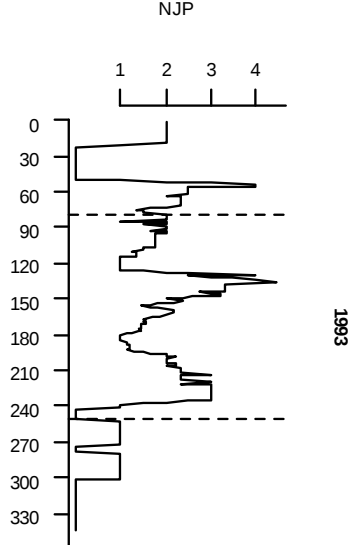
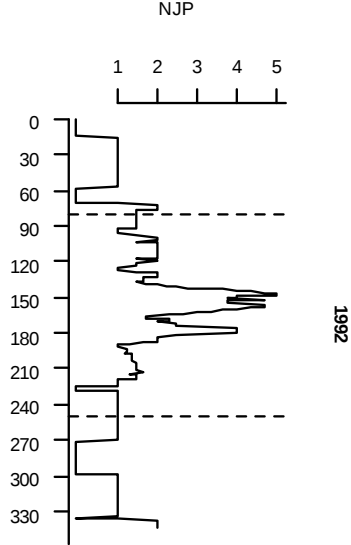


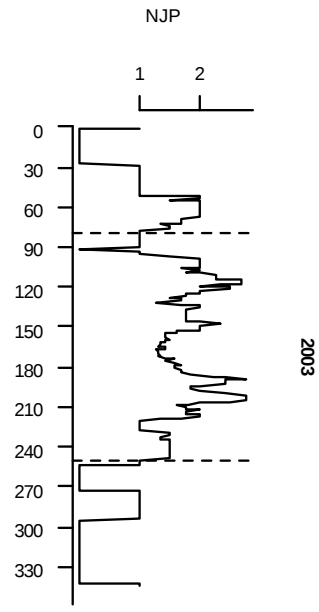
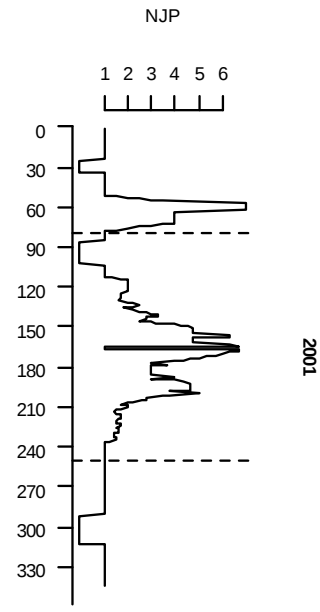
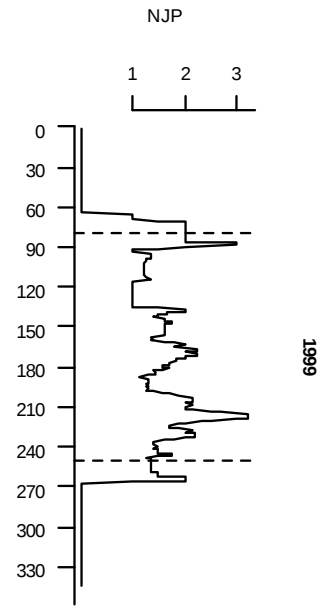
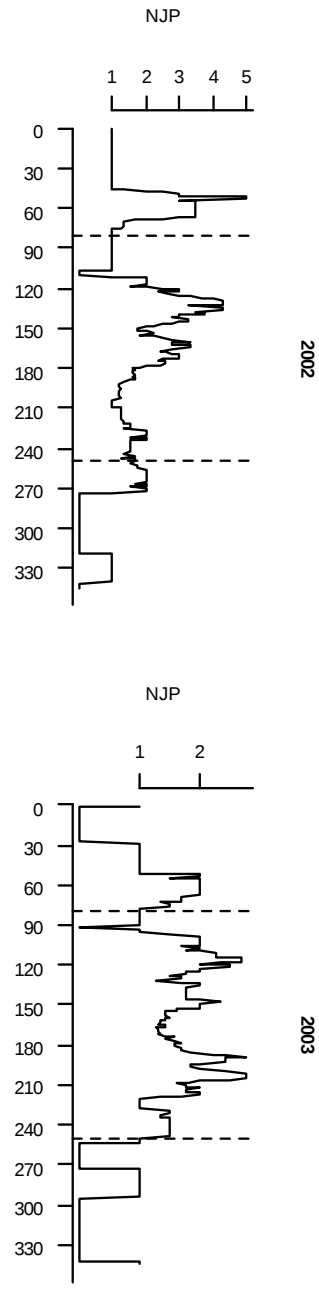
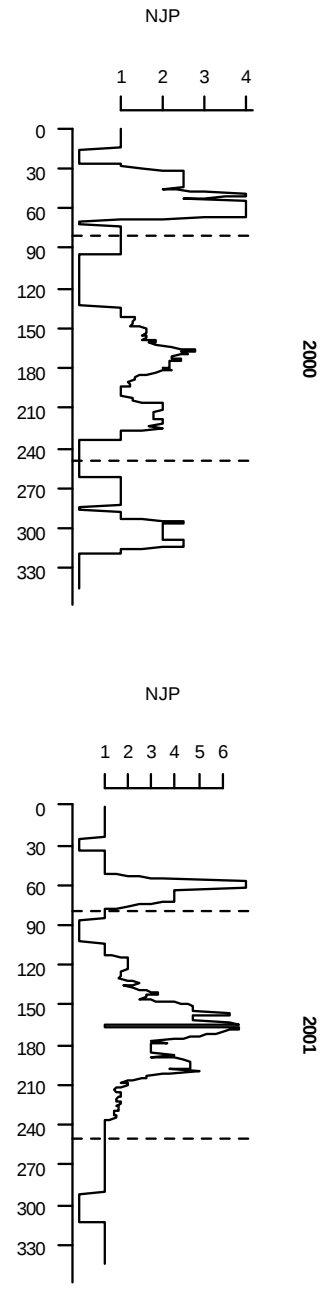
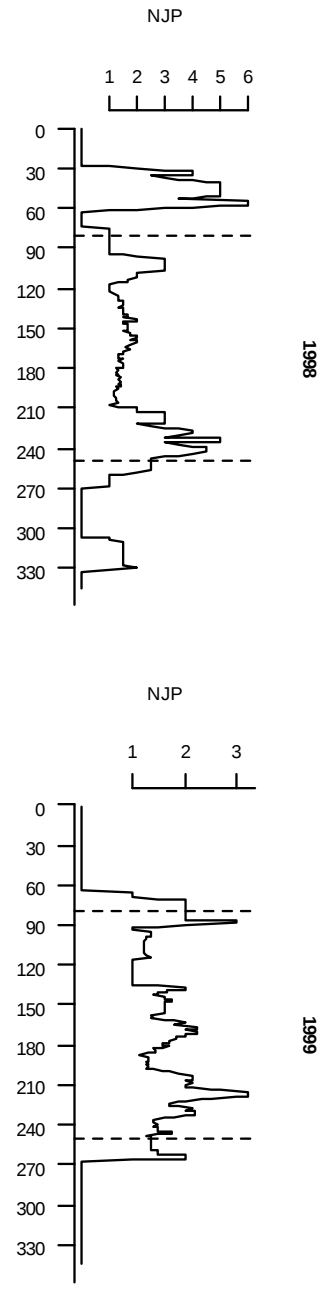
8mm

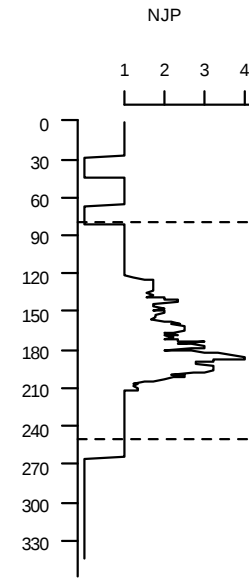
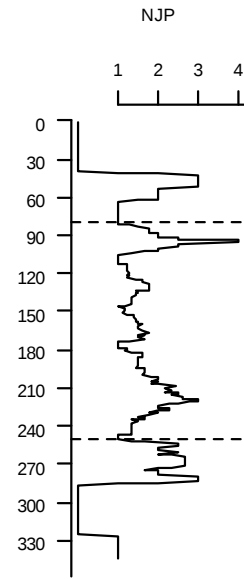
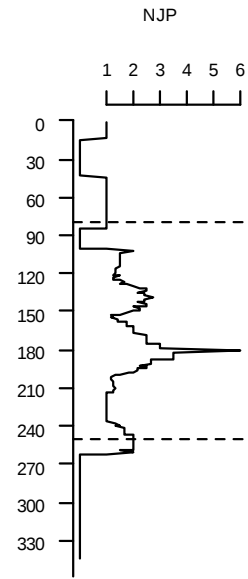
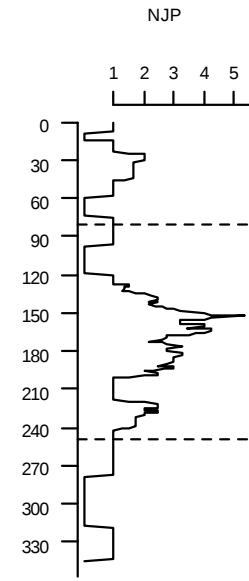
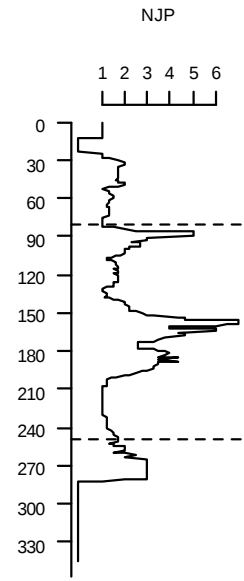
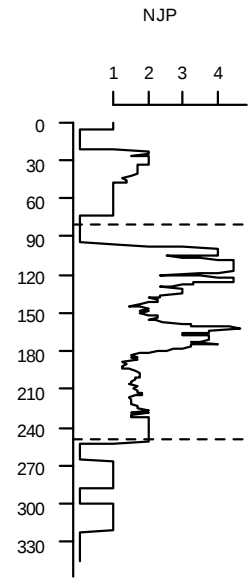


ANNEXE 5
CYCLE SAISONNIER DE CHAQUE ANNEE SELON LA METHODE NJP
CONSECUTIFS

Patacamaya

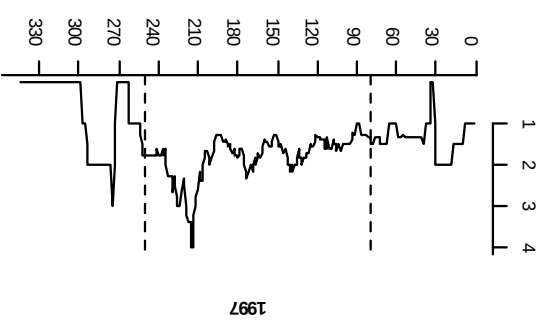
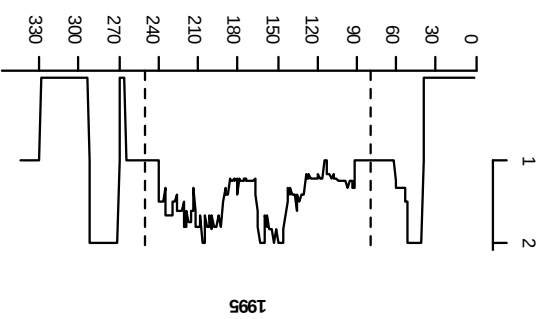
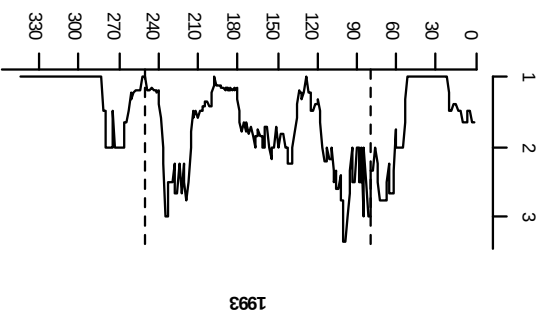
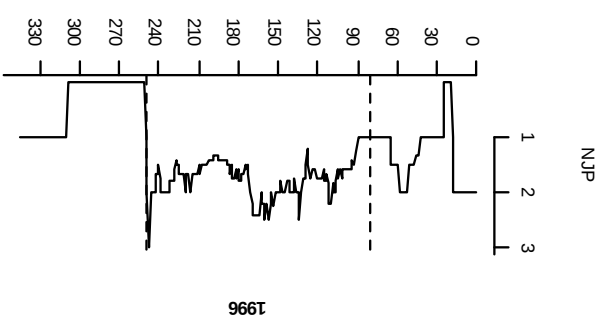
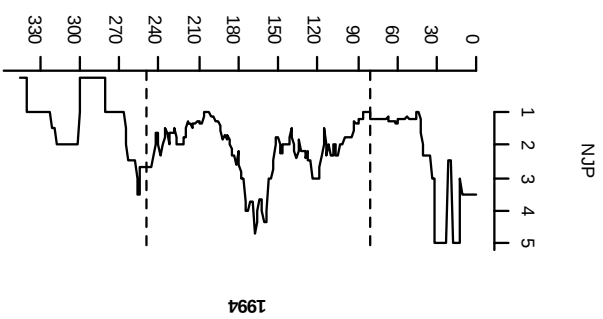
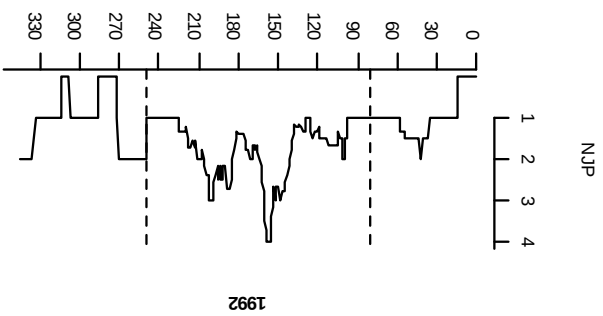


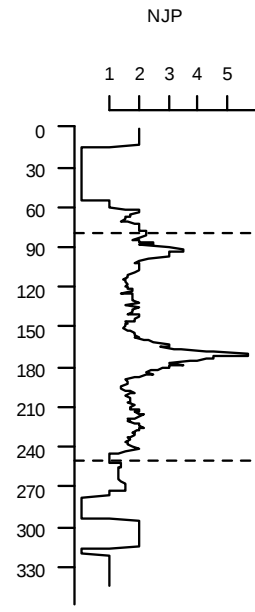
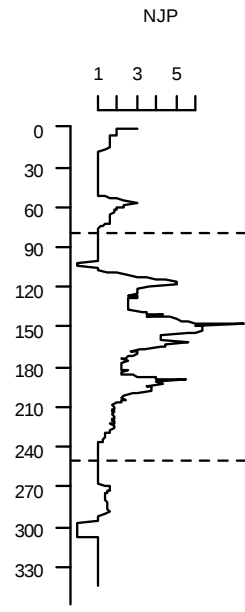
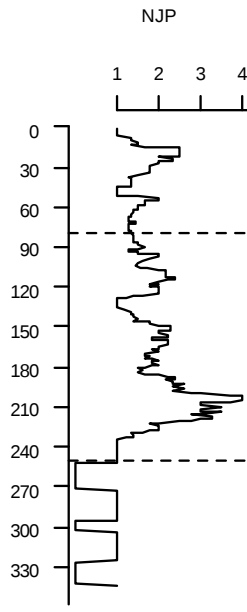
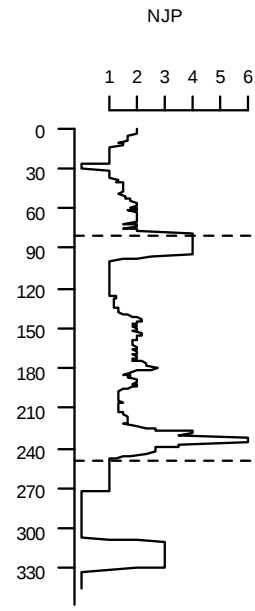
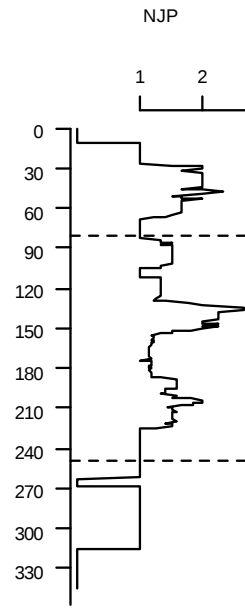
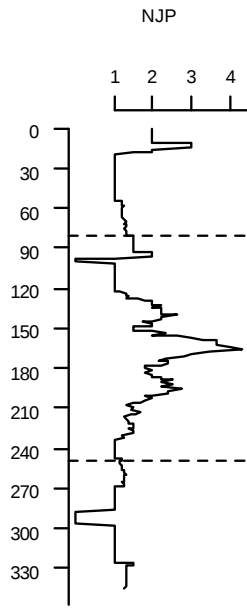


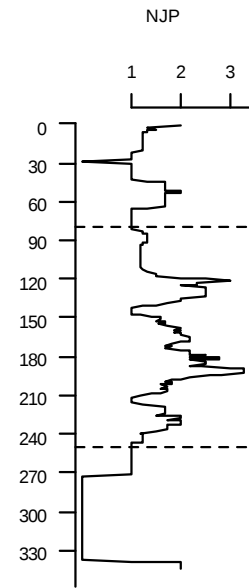
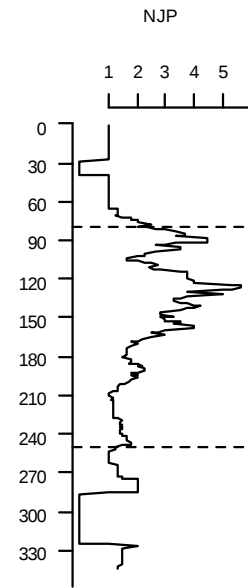
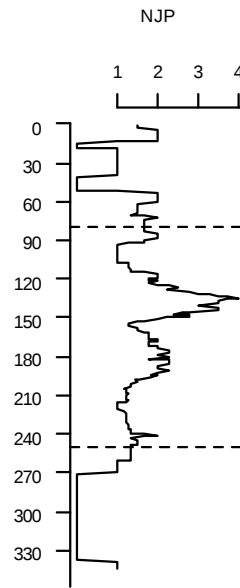
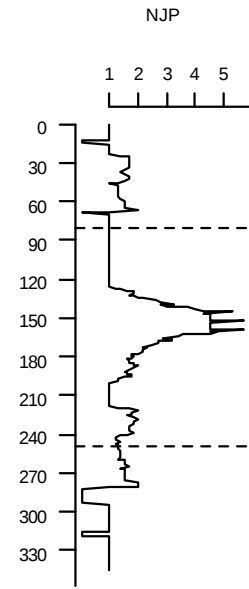
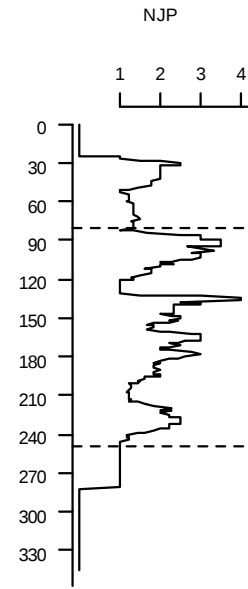
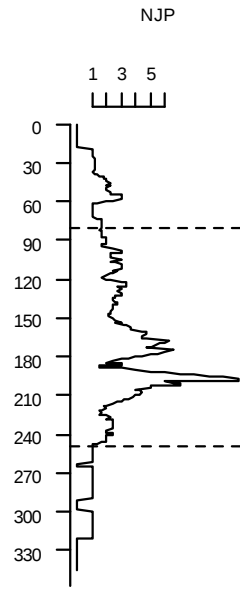


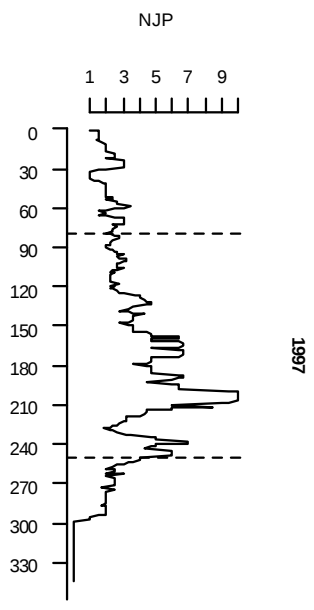
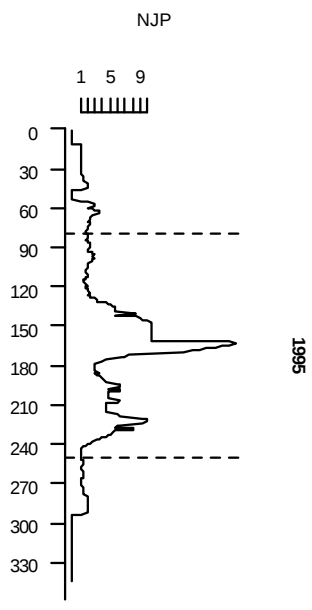
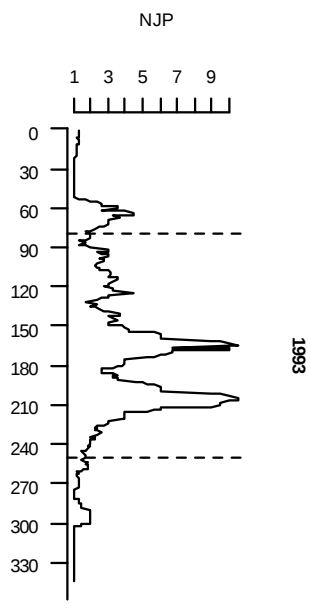
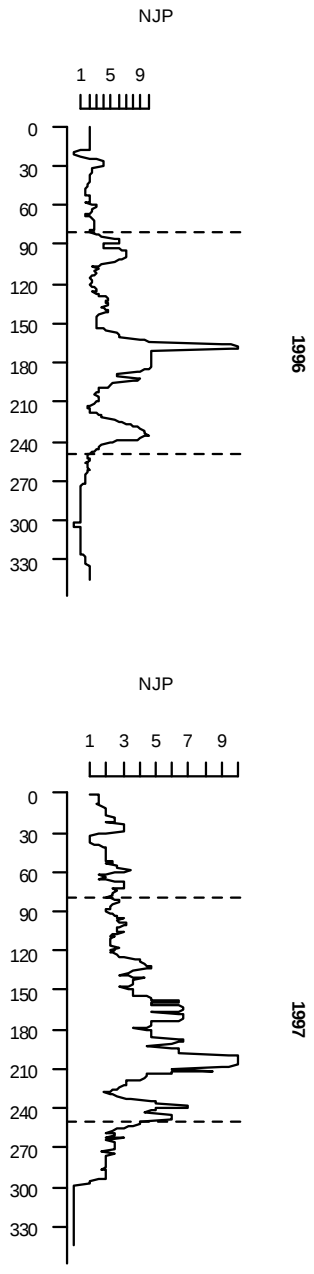
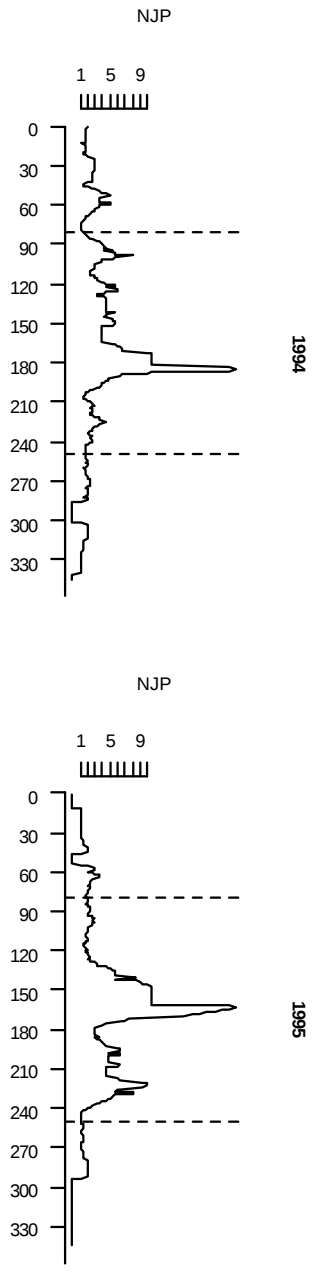
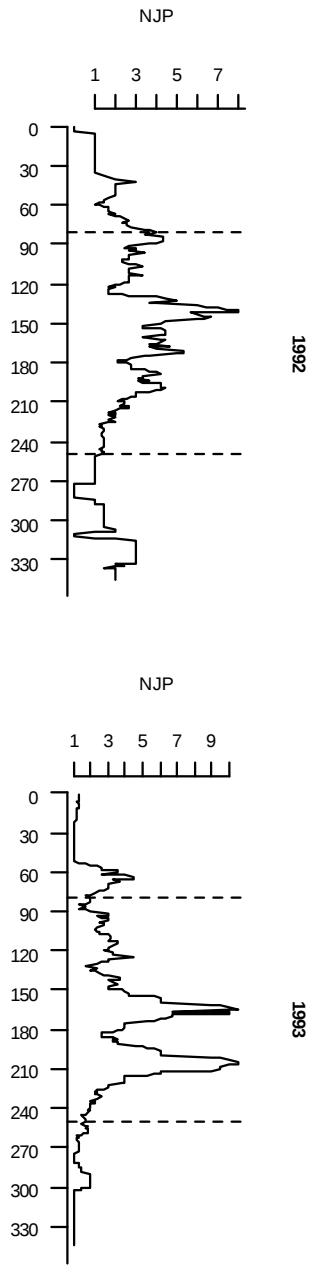
San Calixto

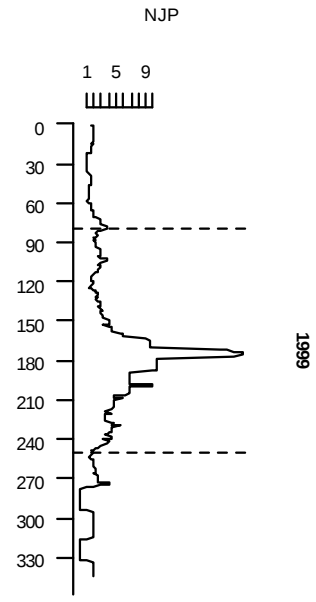
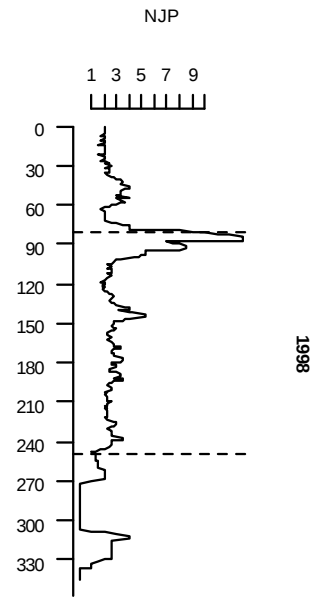
234



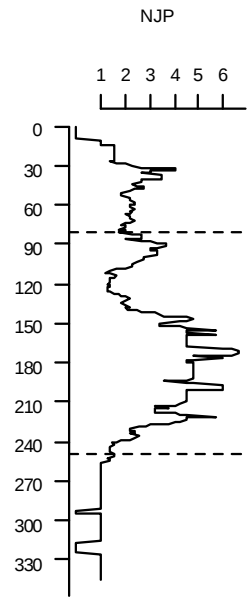




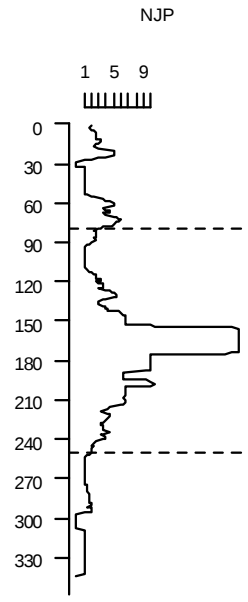
Plataforma



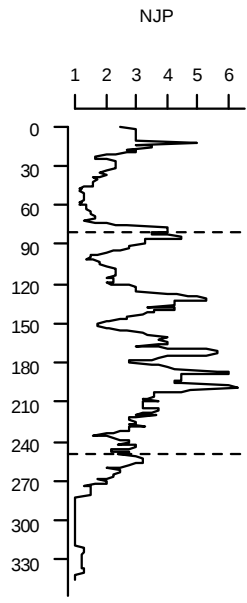
2000



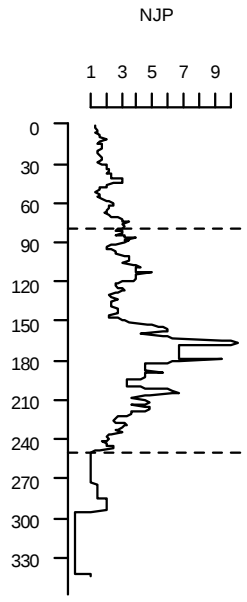
2001

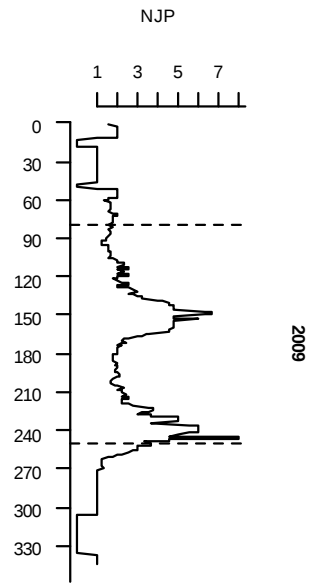
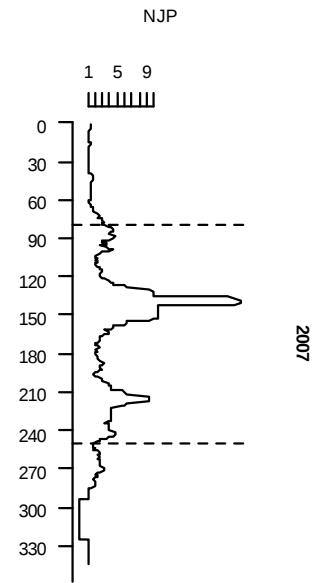
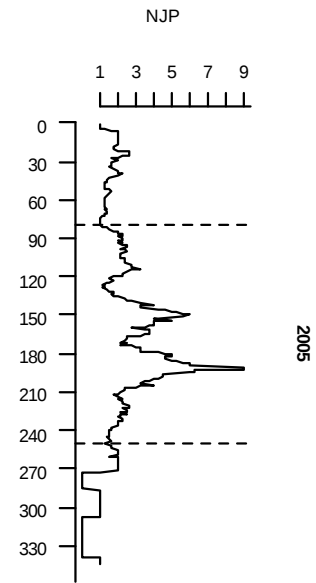
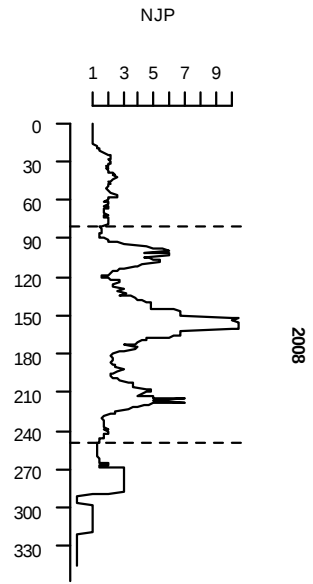
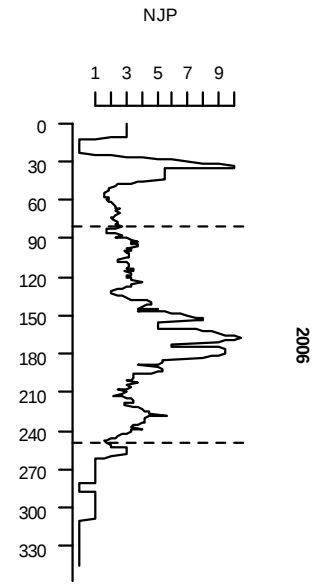
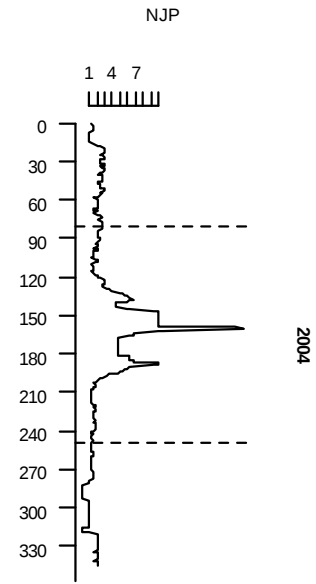


2002

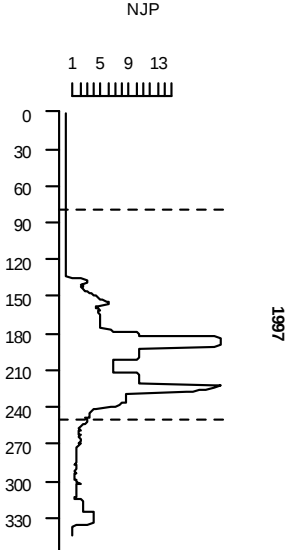
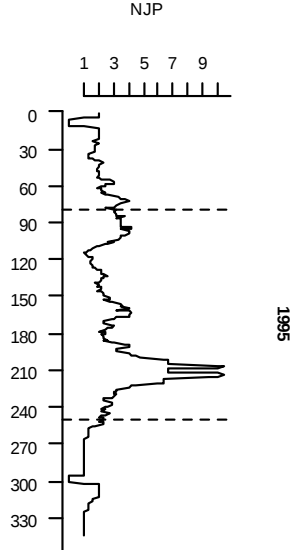
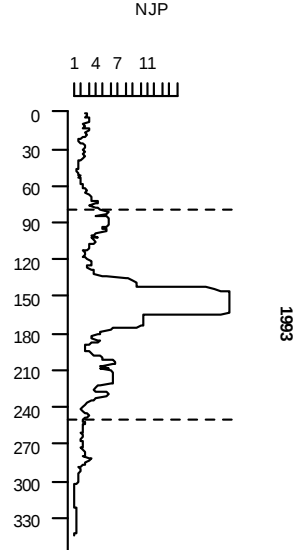
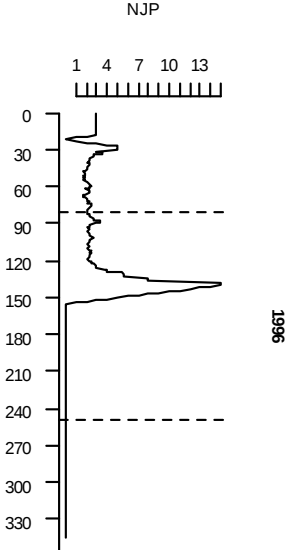
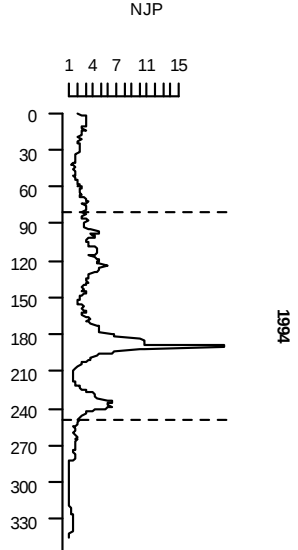
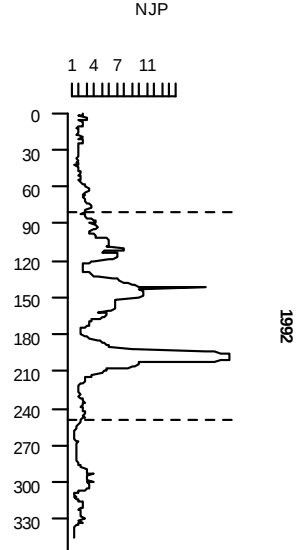


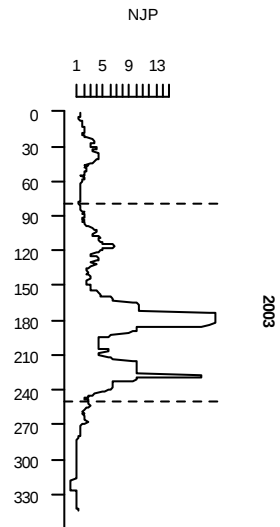
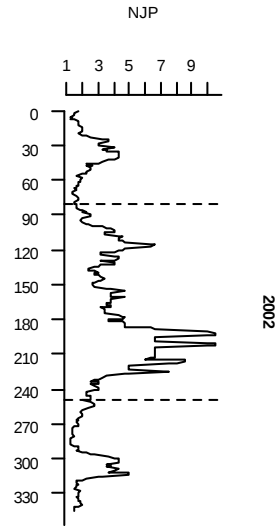
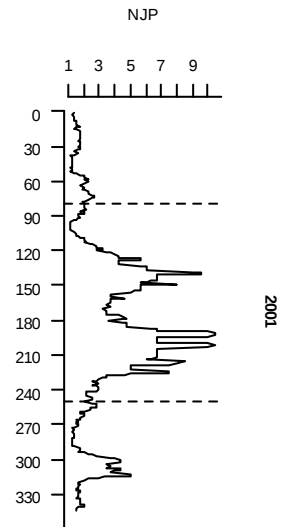
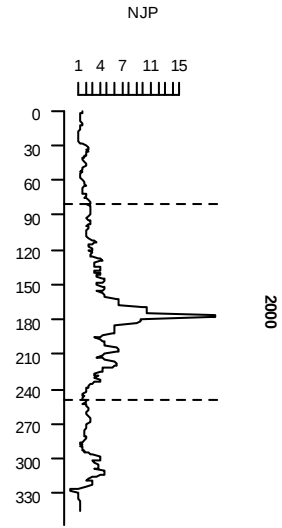
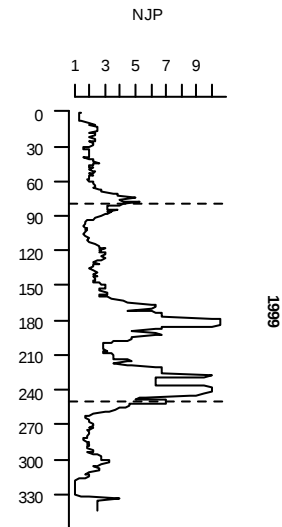
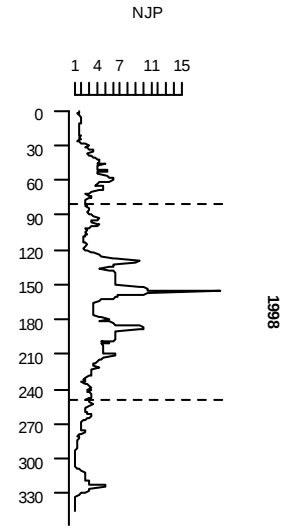
2003

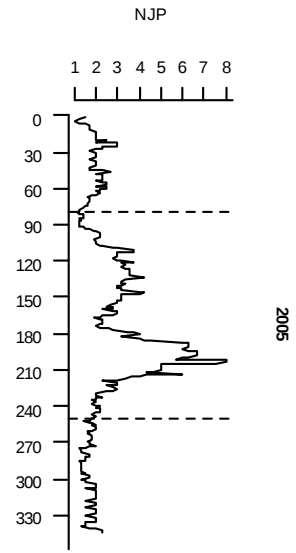
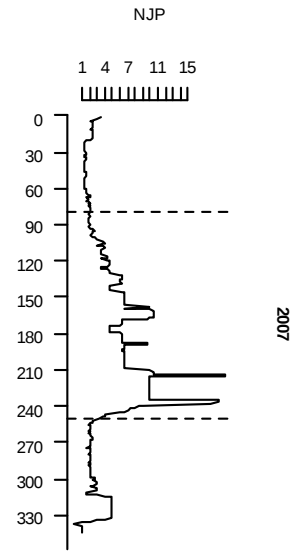
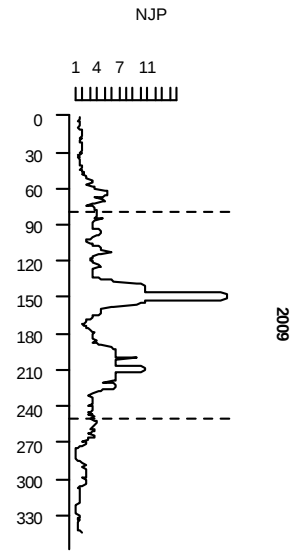
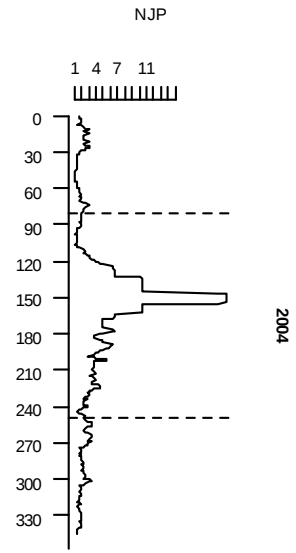
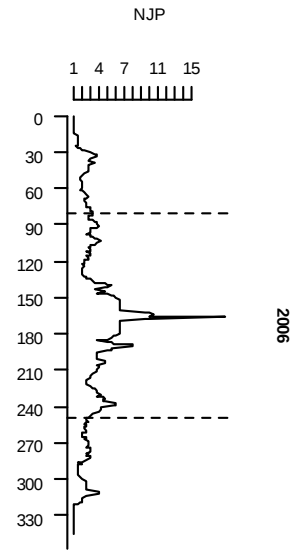
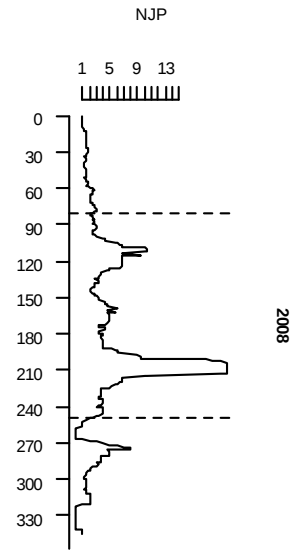




Harca



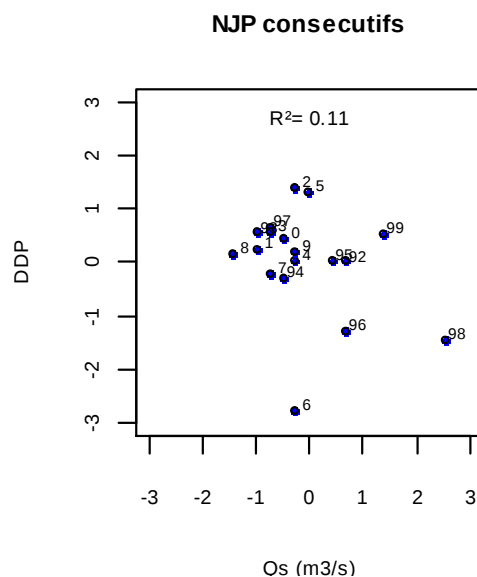
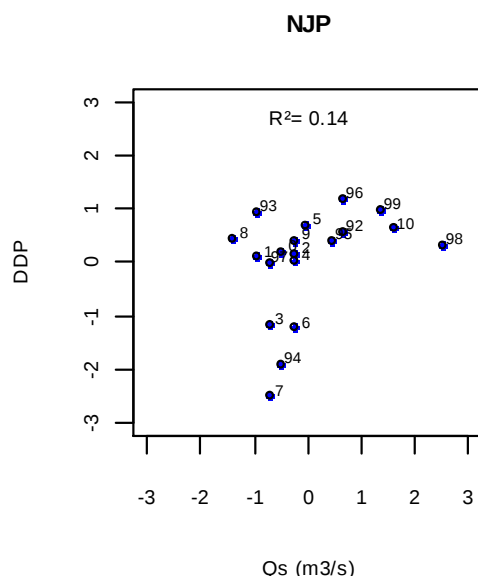
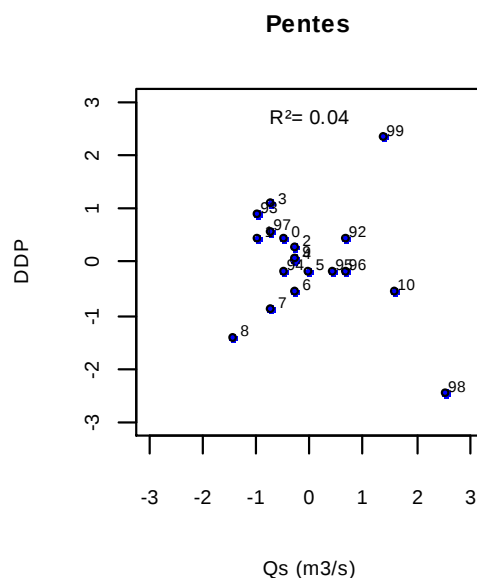
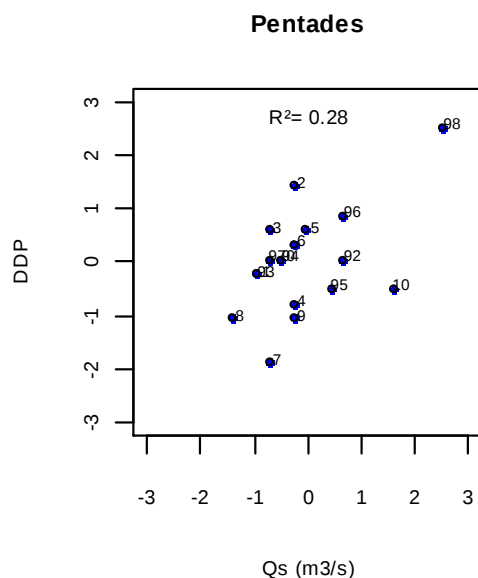




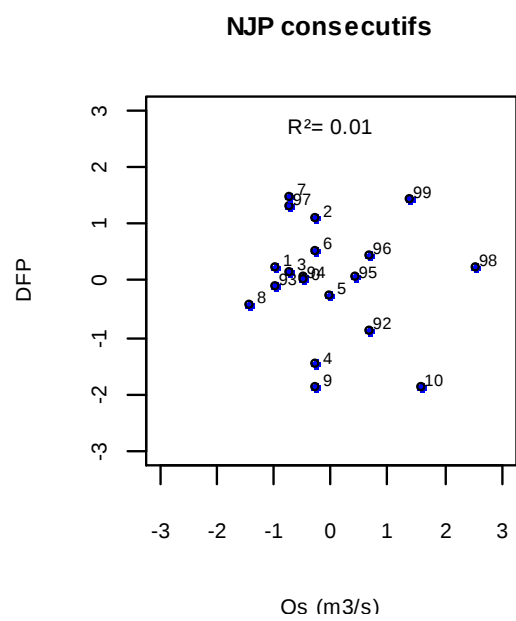
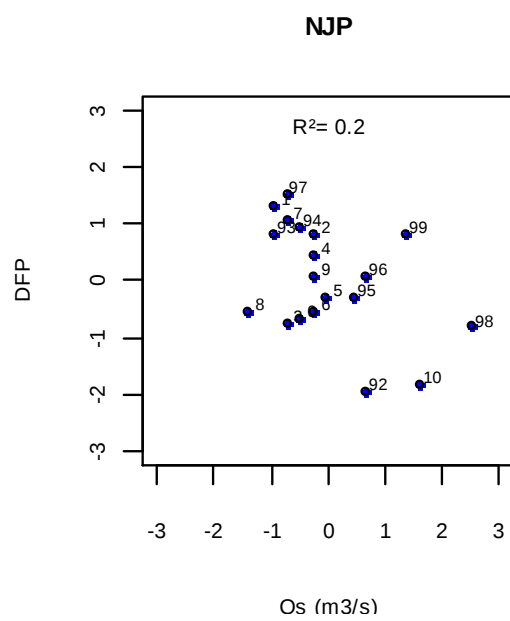
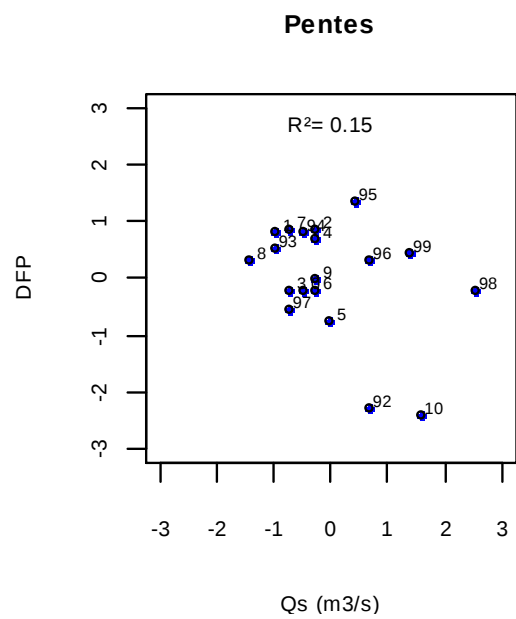
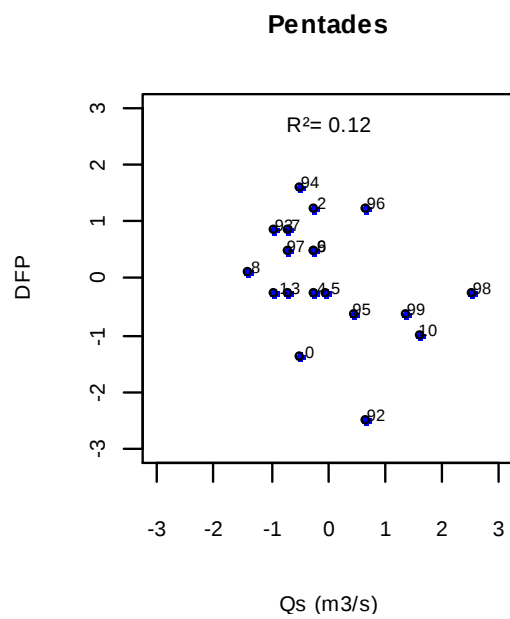
ANNEXE 6

CORRELATIONS ENTRE LES PROPRIETES DE LA SAISON DES PLUIES ET LES DEBITS DE FONTE DE LA STATION TUBO_4830m (1992-2010).

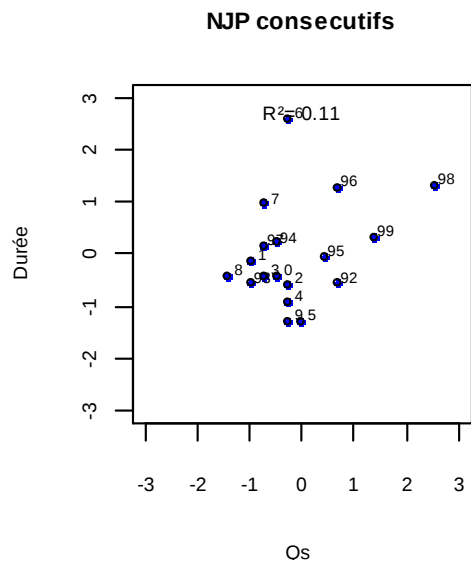
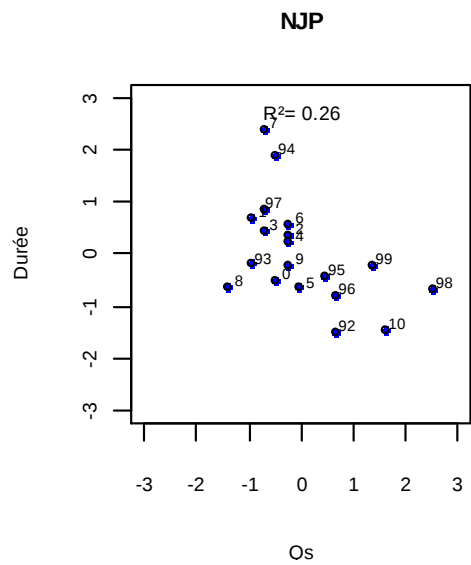
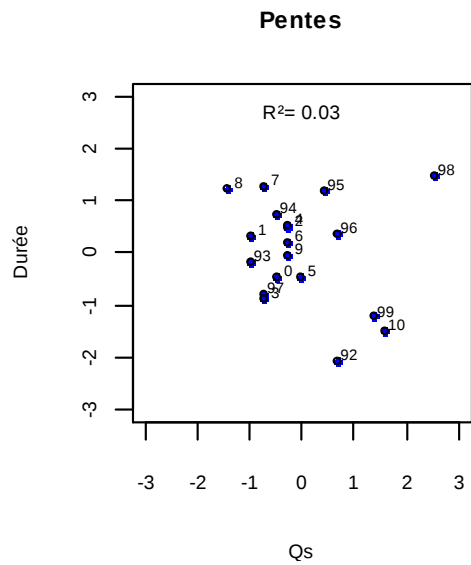
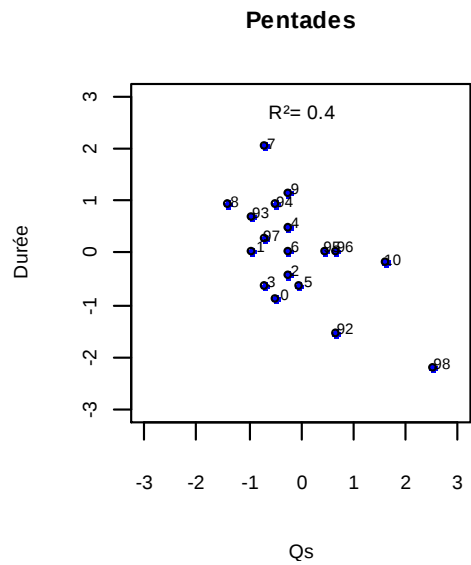
DATE DE DEMARRAGE DES PLUIES (DDP) – DEBIT DE FONTE (Qf)



DATE DE FIN DE SAISON DES PLUIES (DFP) – DEBIT DE FONTE (QF)

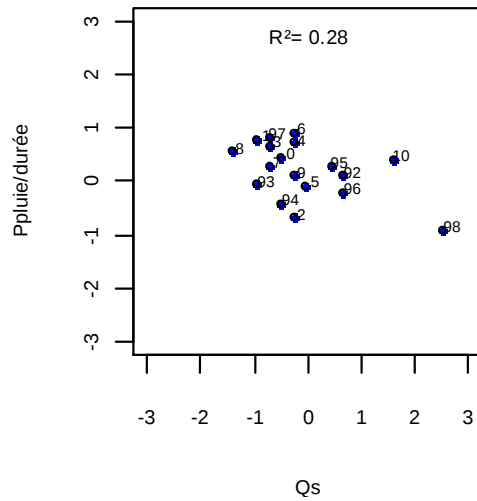


DUREE DE LA SAISON DES PLUIES - DEBIT DE FONTE (QF)

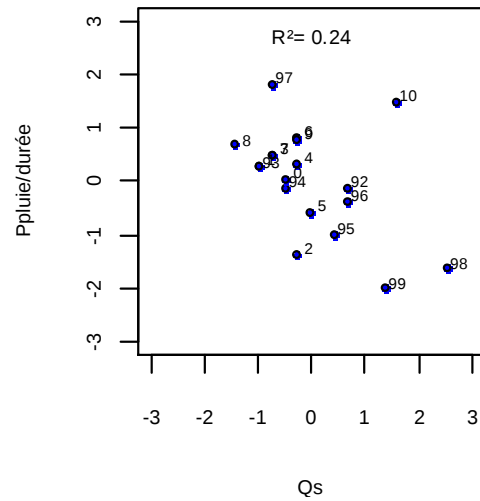


INDICE D'INTENSITE (P pluie/ durée) - DEBIT DE FONTE (QF)

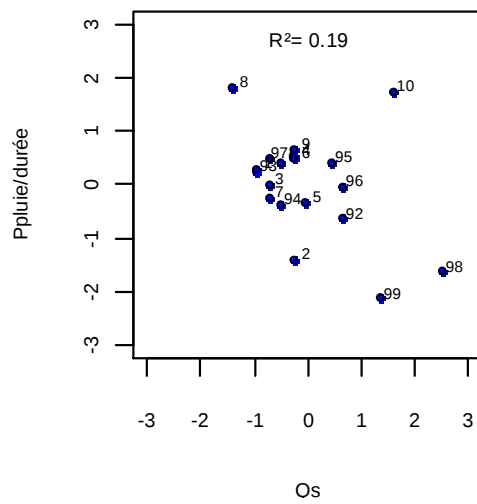
Pentades



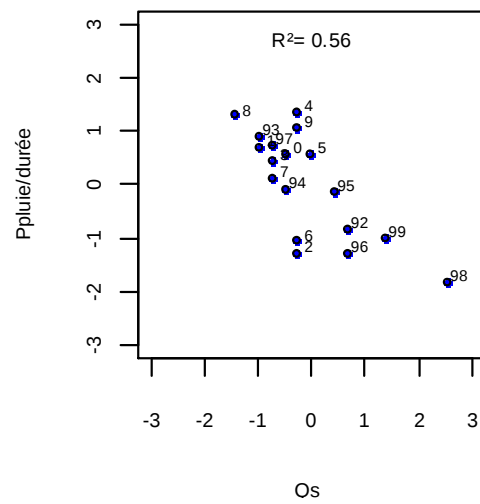
Pentes



NJP

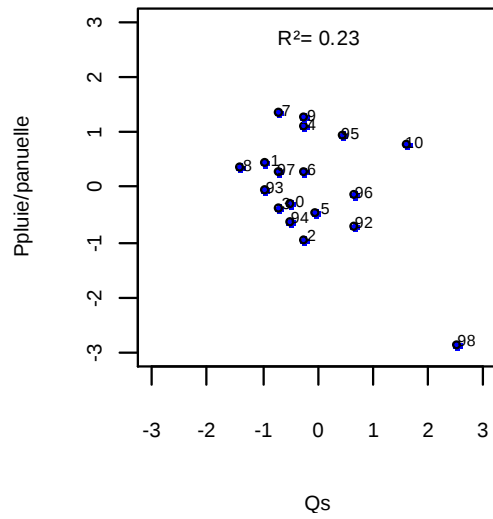


NJP consecutifs

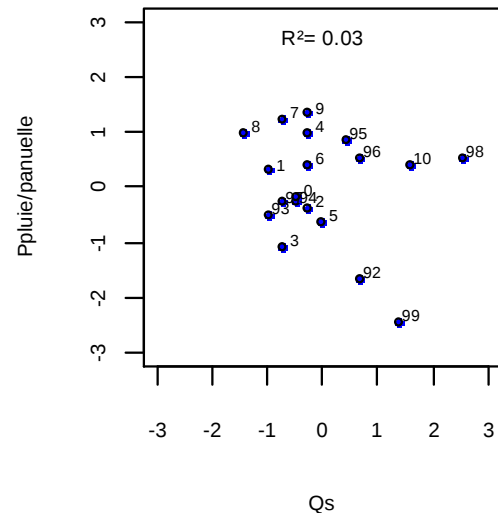


INDICE DE CONCENTRATION DES PLUIES (P pluies/ P annuelle) - DEBIT DE FONTE (QF)

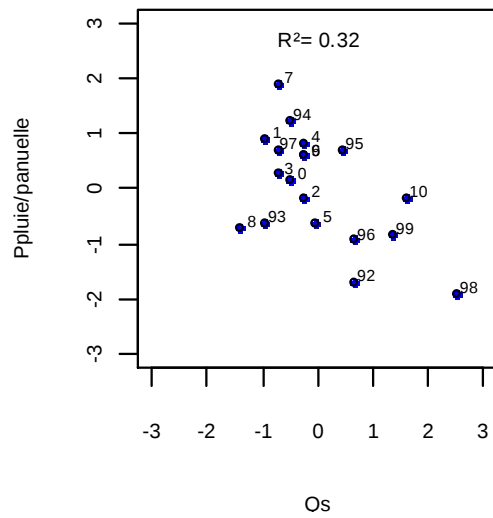
Pentades



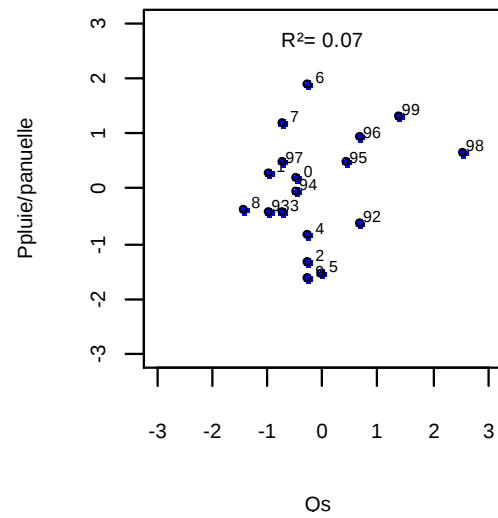
Pentes



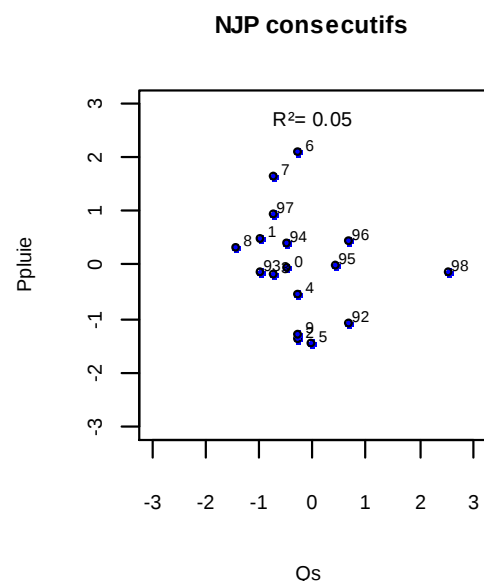
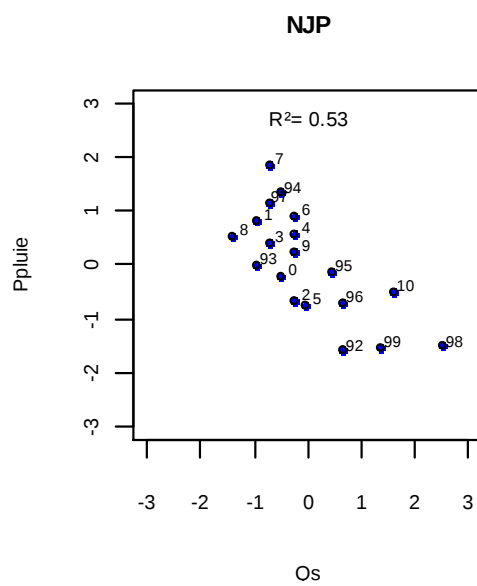
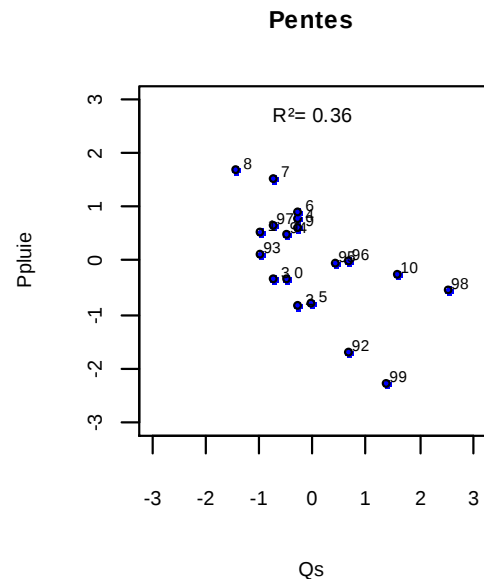
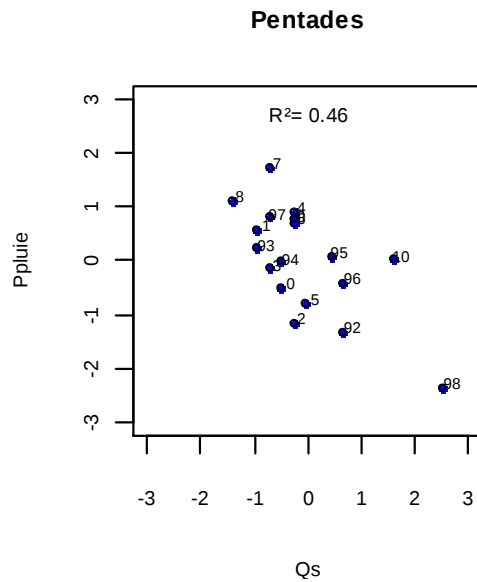
NJP



NJP consecutifs



PRECIPITATION DURANT SAISON DES PLUIES (P pluies) - DEBIT DE FONTE (QF)



BIBLIOGRAPHIE

- Aceituno** (1996) «Elementos en el Clima en el Altiplano SudAmericano.» *Revista geofisica*, 44, 38-55.
- Andressen**, Monasterio M, Terceros Luis F (2007). «Regímenes climáticos del altiplano sur de Bolivia: una region afectada por la desirteficacion .» *Revista Geográfica Venezolana*, 48(1) , 11-32.
- Ashok**, K., Behera, S., Rao,S., Weng, H.,Yamagata, T.,. (2007). «El Niño Modoki and its possible teleconnection.» *Journal of geophysical research*, 112, 2-27.
- Balme**, M.,(2004). Hydrologiques « dans une perspective hydrologique et agronomique. Etude de l'impact de sa variabilité sur la culture du mil. Thèse de doctorat: *Institut National polytechnique de Grenoble*.
- Balme**, M., Lebel, T., Amani, A.(2006). «Années sèches et années humides au Sahel: quo Vadimus?? .» *Hydrological Sciences Journal*, 51, 254-271.
- Berthier, E** (1998). Reconstitution des debits de trois bassins glaciaires des Andes Boliviennes. *Rapport de stage de Magistère*. Ecole normale Superieure de Paris. 44p
- Bois**, P. (1986). Controle de séries chronologiques corrélées par étude du cumul des résidus de la corrélation.
- Brubaker, K.**, Entekhabi, D., Eagleson, S. (1993). Estimation of continental precipitation recycling. *J. Climate*, **6**, 1077–1089.
- Brunet-Moret**. (1971).Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitation annuelles par la methode des doubles masses série hydrologie. *Cahier ORSTOM*. 4, 3-33.
- Caballero,I.** (2001). Modélisation des écoulements d'origine pluvio-nivo-glaciaire en contexte de haute montagne tropicale. Thèse de doctorat: *Université de Montpellier II*.
- Caballero, I.** (1998). Modelisation integree d'un système bassin versant aménagé de la cordillere des Andes (*Vallee du Zongo - Bolivie*). Mémoire de DEA: *Universite Montpellier II*.
- CAN** (2007). El fin de las cumbres nevadas ? Glaciares y cambio climatico en la comunidad Andina. 96p
- Carvalho L.**, Jones.C, Silva Diaz.P.(2011). Moisture transport and intraseasonal variability in the South America monsoon system. *Clim Dyn*, 36, 1865–1880.
- Carvalho.L**, Jones.C, Liebmann.B. (2003). The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. *Journal of Climate*,17; 88-108.
- Condom, T.** Coudrain,A. Sicart,JE. Thery,S. (2007). «Computation of the space and time evolution of equilibrium-line altitudes on Andean glaciers (10°N5°S latitude).» *Global and Planetary change*.
- Diaz H.**, Markgraf.,V. El Niño : Historical and pale climatic aspects of the southern oscillation. *Cambridge University Press*: 470-476
- De la casa, A.** (2009). Onset of the rainy season in the province of Cordoba (Argentina) determined by rainfall records and evaluation of its agricultural risk condition. *Chilean journal of agricultural research*, 69(4):567-576

- Enfield, D.** (1996). Relationships of inter-American rainfall to tropical Atlantic and Pacific SST variability. *Geophysical research letters*, 23, 3305-3308.
- Espinoza, C.** (2009). Impact de la variabilité climatique sur l'hydrologie du bassin amazonien. Thèse de doctorat: *Université Paris 6 - Pierre et Marie Curie*.
- Figueroa S,** and Nobre C. (1990) Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanalise*, **5**, 36–44.
- Francou B,** Ribstein P. (1995) «Glacières et évolution climatique dans les Andes Boliviennes: Glacier du Zongo et Glacier de Chacaltaya: Cordillère Royale, 16°S.» *Bull.Inst.fr.études Andines*, 24(1), 23-36.
- Francou, B.,** Vuille, M., Favier,V.,Caceres,B. (2004). «New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers:Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S.» *Journal of geophysical Research*, 109, 1-18.
- Francou, B.,** Vincent,C. (2007). Les Glacières à l'épreuve du Climat. *IRD*, 1-271.
- Garreaud,R.** (2000). Intraseasonal Variability of Moisture and Rainfall over the South American Altiplano. *American Meteorological Society*. 128, 3337-3346.
- Garreaud,R,** Aceituno. (2007). Atmospheric Circulation and Climatic Variability. *Chapter 3 in the Physical Geography of south America*: Ed. T.Veblen, K. Young and A.Orme.
- Garreaud, R.,** Aceituno P. (2000). Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano. *Journal of Climate*, 14, 2779-2788.
- Garreaud, R.** (1999). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*. 22, 3-11.
- Garreaud,R,** Wallace (1998). Summertime Incursions of Midlatitude Air into Subtropical and Tropical South America. *American Meteorological Society*. 126, 2713-2733.
- Giovannettone P,** Barros A. (2008). Probing Regional Orographic Controls of Precipitation and Cloudiness in the Central Andes Using Satellite Data. *American Meteorological Society*, 10, 167-182.
- Hardy DR,** Vuille M, Braun C, Keimig F, Bradley RS. 1998. Annual and daily meteorological cycles at high altitude on a tropical mountain. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79: 1899–1913.
- Haylock, M.,** Peterson,C,Alves,.M.,Ambrizzi,T. (2005). Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *journal of Climate*. 19, 1490-1512.
- Horel, J.,** Hahmann,A., Geisler, J. (1989) An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. *Journal of Climate*, 2, 1388-1403.
- Jaffrain,** Ledru, Jomelli,Mestre, Grancher. (2008). Changes in precipitation regime in the Tropical Andes under global warming. *Geophysical research letters*, 3-15.
- Joseph, P.,** Liebmann B., Hendon H., (1991) Interannual variability of the Australian summer monsoon onset: Possible influence of Indian summer monsoon and El Niño. *J. Climate*, **5**, 529–538.
- Kaser.G.** (1999). Glacier-Climate Interaction at Low-Latitudes. *Journal of Glaciology*, 1-19.

- Kaser, G.** (1996). On the mass Balance of low latitude glaciers with particular consideration of the Peruvian Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 643-651.
- Kodama, Y.** (1996). Large scale Common features of subtropical precipitation zones (The Baiu frontal Zone, the SPCZ and the SACZ). Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *Meteor.soc. Japan*. 70(4), 813-836
- Li, G., Ren, B., Yang, Ch., Zheng, J.** (2010). Traditional e Niño and el Niño Modoki revisited: Is el Niño Modoki lineary independent of traditional el Niño? *Atmospheric and oceanic science letters*, 3, 70-74.
- Lau, K., Zhou, J.** (2003). Anomalies of the south American Summer Monsoon associated with the 1997–99 El Niño–Southern Oscillation. *Journal of Climatology*, 23, 529–539.
- Lavado, W., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J.C., Guyot, J.L.** (2012). Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*, 4, 1–18.
- Lavado, W., Silvestre, E., Obando, O.** (2009). Impact of the ENSO on the Hydrology of Peru (1968–2006). *Revista Peruana Geo atmosferica RPGA* » 1, 48-57.
- Lebel, T., Diedhiou A., Laurent, H.** (2003) Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *Journal of geophysical research*, (108) 1-11
- Le Lay, M., Galle, S.** (2005). Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 50, 509-524.
- Lejeune, Y.** (2010). Apports des modèles de neige CROCUS et de sol ISBA à l'étude du bilan glaciologique d'un glacier tropical et du bilan hydrologique de son bassin versant. *Thèse de Doctorat: Université Joseph Fourier (Grenoble)*.
- Lejeune, Y., Wagnon, P., Bouilloud, L., Chevallier, P., Etchevers, P., Martin, E., Sicart, J.E., Habets, F.** (2006). Melting of Snow Cover in a Tropical Mountain Environment in Bolivia: Processes and Modeling. *Journal of hydrometeorology*, 8, 922-937.
- Lenters et Cook.** (1995). On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate. *Journal of the atmospheric Sciences*, 54, 656- 676.
- Leonardini, G.** (2009). Impact des précipitations neigeuses sur le bilan de masse et le bilan d'énergie de surface du Glacier Zongo (Bolivie). *Memoire Master 2: Université Joseph Fourier*.
- L'Hôte, Y., Chevallier, P., Coudrain, A., Lejeune, Y., Etchevers, P.** (2005). Relationship between precipitation phase and air temperature : Comparison between the Bolivian Andes and the Swiss Alps. *Hydrological sciences*. 50(6), 989-997
- Li, G., Ren, B., Yang, Ch., Zheng, J.** (2010). Traditional e Niño and el Niño Modoki revisited: Is el Niño Modoki lineary independent of traditional el Niño?. *Atmospheric and oceanic science letters*, 3, 70-74.
- Liebmann, B. et Marengo, J.** (2001). Interannual Variability of the Rainy Season and Rainfall in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*, 14, 4308-4318.

- Litt, M.**, Soruco. A, Leonardini, G., Ramallo, C., Sicart, J.E., Fuertes, R., Lehman, B. (2009-2010). Mesures Meteorologiques, hydrologiques et Glaciologiques sur le glacier du Zongo. *Rapport Annuel, GlacioClim*.
- Mantua, N.**, Hare, S., Zhang, Y., Wallace, J., Francis, R. (1996). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1-18.
- Marengo, J.**, Liebmann, B., Flizola, N., Wainer, I. (2001). Onset and End of the Rainy Season in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*, 14, 833-852.
- Minvielle, M.**, et Garreadu, G. (2011). Projecting Rainfall Changes over the South American Altiplano. *Journal of Climate*, 24, 4577-4583.
- Montes de Oca, I.** (1995). Geografia y Clima de Bolivia. *Bull. Ins. fr. Etudes Andines*, 3, 357-368.
- Nicholls, N.**, McBride, L., Ormerod, J. (1988). On Predicting the Onset of the Australian wet season at Darwin. *Monthly weather review*, 110, 14-17.
- Paterson, W.** (1994). The physics of glaciers. 3ième ed., 480pp: Pergamon, New York.
- Pouyaud, B.**, Zapata, M., Yerren, J., Gomez, J., Rosas G., Suarez, W. (2005). Avenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanche. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 50(6), 999:1021.
- Rabatel, A.**, Berthier E, y Soruco., Chazarin, J.P., Gallaire, R., Fuertes, R., Ribstein, P., Wagnon, P., Francou, B., Baldivieso, H. (200-2001). Mesures Meteorologiques, hydrologiques et Glaciologiques sur le glacier du Zongo. *Rapport Annuel, GlacioClim, 2000-2001*.
- Ramallo, C.** (2006). Aplicacion de la imagen satelital Aster para la modelizacion de una cuenca de alta Montaña. *Tesis de ingenieria*: Universidad Mayor de San Andres (UMSA).
- Ramirez, E.** (2003). Interpretation de la variabilité Climatique engistrée dans les Carottes de glace à partir des isotopes stables de l'eau: Cas des Andes Tropicales. *Thèse doctorat*: Université de Paris VI - Pierre et Marie Curie.
- Ramirez, E.**, Francou, B., Ribstein, P., Descloîtres, M., Guerin, R., Mendoza, J., Gallaire, R., Pouyaud, B. (2001). Small glaciers disappearing in the Tropical Andes: A case study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16°S). *Journal of Glaciology*, 47, 187-193.
- Ramirez, E.**, Francou, B., Olmos, C., Ramallo, C, y Garreta, P., Berger, T. (2007). Deshielo de la cuenca Tuni Condoriri y su impacto sobre los recursos hidricos de las ciudades de La Paz y El Alto. *Plan Quinquenal PNCC*.
- Ramirez, E.**, Mendoza, J., Salas, E., Ribstein, P. (1995) «Regimen espacial y temporal de las precipitaciones en la cuenca de la Paz.» *Bull. ins. fr. études Andines*, 24(3), 391-401.
- Rayner, N.A.**, Parker, D.E., Horton, E.B., Folland, C.K., Alexander, L.V., Rowell, D.P., Kent, E.C., Kaplan, A., 2003, Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, 108(D14), 4407.
- Ribstein, P.**, Pouyaud, B., Sicart, J.E., Wagnon, P., Francou, B. (1999). Variabilité climatique et fonctionnement hydrologique d'un glacier Tropical. *XXII*

- Assemblée Générale de l'union Géodésique et Géophysique Internationale.* Birmingham (Angleterre), 280-285.
- Ribstein.P**, E. Tiriau.A, Francou.B, Saraviab.B. (1995). Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia. *Journal of hydrology*, 221-234.
- Ribstein.P**, Tiriau, E. (1993). Reconstitution des débits journaliers du torrent émissaire du glacier du Zongo. ORSTOM Bolivie
- Roche, M.** (1993). El clima de Bolivia. *Actas del seminario PHICAB.* SENAMHI,IHH,ORSTOM,CONAPHI, 81:93.
- Ronchail, J.**, Gallaire,R. (2006). ENSO and Rainfall along the Zongo Valley (Bolivia) from the Altiplano to the Amazon basin. *Journal of Climatology*,26, 1223–1236.
- Ronchaill,J.** (1995). L'aridité sur l'Altiplano Bolivien. *sécheresse*, 6,45-51.
- Sanchez L, Vide J.**, (2006). Spatial distribution of the daily precipitation concentration in the Iberian Peninsula. *5^a Asamblea hispano – Portuguesa de geodesia y geofísica*
- Saravanan, R.**, Chang, P. (2000). Interaction between Tropical Atlantic Variability and El Nino–Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 13, 2177-2194.
- Seiler, C.**, Hutjes, R., Kabat, P. (2012). Climate Variability and Trends in Bolivia. *Journal of applied meteorology and climatology*, 52, 130-146.
- Sicart JE**, Ribstein P, Francou B, Gallaire R. (2003). Etude des précipitations et de la fonte sur un glacier tropical: le glacier du Zongo, Bolivie, 16°S. *Journal–des Sciences Hydrologiques*, 48(5), 799-88.
- Sicart JE**, Ribstein P, Francou B, Pouyaud B, Condom T. (2007). Glacier mass balance of tropical Zongo glacier, Bolivia, comparing hydrological and glaciological methods. *Global and Planetary Change*, 59, 27–36.
- Sicart, JE.**, Hock, R., Ribstein, P., Litt, M., Ramirez,E. (2011). Analysis of seasonal variations in mass balance and meltwater discharge of the tropical Zongo Glacier by application of a distributed energy balance model. *Journal of Geophysical research*, 16, 1-18.
- Sicart.JE.** (2002). *Contribution à l'étude des flux d'énergie du bilan de masse et du débit de fonte d'un glacier tropical : Le Zongo, bolivie. Thèse de doctorat: Université Paris VI.*
- Sivakumar, M.** (1988). Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42, 295-305.
- Soruco,A.** (2008). *Etude du retrait des glaciers depuis cinquante ans dans les bassins hydrologiques alimentant en eau la ville de La Paz – Bolivie (16°S).* Thèse de doctorat: Université Joseph Fourier (Grenoble 1).
- Soussou S.**, (2004) Modèle statistique des hauteurs de pluies journalières en zone sahélienne: exemple du bassin amont du fleuve Sénégal. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 49(1)
- Taschetto, A.**,England,M. (2009). El Niño Modoki impacts on Australian Rainfall. *Journal of Climate*, 22, 3167-3172.
- Trenberth, K.** (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2771-2776.
- Unesco** (1982). Guia metodologica para la eaboraciondel Balance Hidrico de America del Sur. *Ed.Unesco.* Montevideo

- Urrutia, R.,** Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of geophysical research*, 14, 1-15.
- Vacher, J. 1998.** Responses of two main Andean crops, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and papa amarga (*Solanum juzepczukii* Buk.) to drought on the Bolivian Altiplano: Significance of local adaptation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 68, 99-108
- Vera, C.,** Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, T., Gochis, D., Gutzler, G., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, R. (2006). Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. *Journal of Climate*, 19, 4977-4996.
- Vincent, C.,** Ribstein, P., Favier, V., Wagnon, P., Francou, B., Le Meur, E., Six, S. (2005). Glacier fluctuations in the Alps and in the tropical Andes. *C. R. Geoscience*, 337, 97-106.
- Virji, H.** (1981). A Preliminary Study of Summertime Tropospheric Circulation Patterns over South America Estimated from Cloud Winds. *Monthly Weather Review*, 109, 599-610.
- Vuille, M.** (1999). Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the southern oscillation. *Journal of climatology*, 19, 1579-1600.
- Vuille, M.,** Amman, C. (1997). Regional snowfall patterns in the high, arid Andes. *Climatic Change*, 36, 413-423,.
- Vuille, M.,** Bradley, R., Werner, M., Keimig, F. (2003). 20th Century climate change in the tropical andes observations and model results. *Climatic Change*, 59, 75-99.
- Vuille, M.,** Bradley, R., Keimig, F. (2000). Interannual climate variability in the central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic Forcing. *Journal of Geophysical Research*. 105, 447-450.
- Vuille, M.,** Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B., Bradley, R. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89, 79-96.
- Wagnon, P.** (1999). Analyse du bilan d'énergie d'un glacier tropical, application à la relation glacier climat. *Thèse de doctorat*: Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble I.
- Wagnon, P.,** Ribstein, P., Schuler, T., Francou, B. (1998). Flow Separation on Zongo Glacier Cordillera Real, Bolivia. *Hydrological Processes*, 12, 1911-1926.
- Yeh, S., Kug, J.S.,** Dewitte, B., Kwon, M.H., Kirtman, P., Jin, F.F. (2009) «El Niño in a changing climate. *Nature*, 461, 511-515.
- Zhang, Y.,** Wallace, J., Battisti, D. (1997). ENSO like Interdecadal variability 1900-93. *Journal of Climate*, 10, 1004-1020.
- Zeng, N.** (1999). Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle. *Journal of geophysical research*, 104, 9097-9106.
- Zebiak, S.** (1993). Air-Sea interaction in the Equatorial Atlantic. *Journal of Climate*, 6, 1567-1586.
- Zhou, L** et Lau K.M. (1997). Does a Monsoon Climate Exist over South America?. *Journal of climate*, 11, 1020-1040.

Pages internet

*(<http://www.lgge.ujf-grenoble.fr/ServiceObs>
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre>. s.f.
<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei>. s.f.
<http://www.pmel.noaa.gov>. s.f.*