



HAL
open science

Étude de la variabilité hydro-climatique dans le continuum Andes-Amazone à différentes échelles spatio-temporelles

Jhan-Carlo Carlo Espinoza

► **To cite this version:**

Jhan-Carlo Carlo Espinoza. Étude de la variabilité hydro-climatique dans le continuum Andes-Amazone à différentes échelles spatio-temporelles. Sciences de l'environnement. Université Grenoble Alpes, 2020. tel-02895590

HAL Id: tel-02895590

<https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/tel-02895590>

Submitted on 9 Jul 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Synthèse des travaux
Pour obtenir une
HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

UNIVERSITE GRENOBLE ALPES
ECOLE DOCTORALE TERRE UNIVERS ENVIRONNEMENT

**Étude de la variabilité hydro-climatique
dans le continuum Andes-Amazonie à
différentes échelles spatio-temporelles**

Présentée par

Jhan Carlo ESPINOZA

Chercheur à l'Institut de Recherche pour le Développement
Institut des Géosciences de l'Environnement
UMR 5001

Synthèse soutenue le 2 juin 2020, devant le jury composé de :

Nathalie de Noblet-Ducoudré, Directrice de Recherche, CEA, LSCE (Rapporteur)
Vincent Moron, Professeur, Aix-Marseille Université, CEREGE (Rapporteur)
Pierre Ribstein, Professeur Émérite, Sorbonne Université, METIS (Rapporteur)
Laurent Li, Directeur de Recherches, CNRS, LMD (Examineur)
Patrick Wagnon, Directeur de Recherche, IRD, IGE (Examineur)

Remerciements

À mes collègues, pour leurs relectures et leurs conseils : Clémentine Junquas, Thierry Lebel, Thomas Condom, Jean-Sébastien Moquet et James Apaéstegui.

Pour les discussions scientifiques très riches : Hans Segura, Jean-Emmanuel Sicart, Antoine Rabatel, Elisa Armijos, Raúl Espinoza-Villar et Jean-Loup Guyot.

Plus particulièrement, je remercie Josyane Ronchail pour ses conseils au cours de ces années.

À Clémentine, pour son énorme soutien.

Avant-Propos

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches fait le point sur mes travaux accomplis pendant les 14 dernières années. Ces travaux se sont inscrits dans un parcours international et pluridisciplinaire avec un fort accent sur la coopération scientifique entre la France et des pays sud-américains. Ces travaux ont eu pour objectif général de mieux comprendre l'impact de la variabilité et du changement climatique sur l'hydrologie dans le bassin de l'Amazone, avec un accent particulier sur l'Amazonie des pays andins. Cette région est caractérisée par un équilibre très fragile entre la croissance des populations, l'utilisation des ressources et la protection de l'environnement. Dans ce contexte, l'apport de la connaissance scientifique sur l'environnement est une clé primordiale pour une prise de décision adéquate et pour l'élaboration de politiques publiques efficaces. Néanmoins, les pays comme la Bolivie, le Pérou et l'Équateur montrent aujourd'hui le nombre le plus faible de chercheurs par habitant de l'Amérique du Sud. C'est pourquoi mes travaux n'ont pas été uniquement orientés vers une meilleure compréhension de l'origine des risques climatiques (inondations, sécheresses, incursions de fronts froids, etc), mais aussi consacrés à la formation de jeunes chercheurs sur ces thématiques prioritaires.

J'ai obtenu en 2009 mon diplôme de Docteur de l'Université Paris 6 grâce à une thèse préparée au laboratoire LOCEAN et dans le cadre de l'observatoire SNO-HYBAM. J'ai ensuite effectué des recherches post-doctorales dans le cadre des programmes CLARIS-LPB (2009, en Argentine) et SWOT-CNES (2010, au Brésil). Entre 2011 et 2014 j'ai eu un poste de chercheur (catégorie supérieure) à l'Institut de Géophysique du Pérou (IGP), puis entre 2015 et 2018 j'ai obtenu à l'IGP un poste de chercheur de catégorie principale (la plus haute catégorie au Pérou). À l'IGP mes recherches ont été principalement dédiées à l'étude des événements hydro-climatiques extrêmes dans la région Andino-Amazonienne et ont permis la génération d'outils pour la prévision de ces événements. À l'IGP j'ai eu la responsabilité de créer une équipe de recherche en hydrologie et hydro-climatologie ; puis en 2017 j'ai pris la direction de l'Unité de Recherche en Sciences de l'Atmosphère et de l'Hydrosphère de l'IGP. Depuis 2018 je suis chercheur à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), basé à l'Institut de Géosciences de l'Environnement – Grenoble (IGE) où j'ai la responsabilité de diriger le projet AMANECER financé par le programme « *Make our Planet Great Again* » du gouvernement français. Dans ce cadre, actuellement, je m'intéresse davantage à la continuité climatique entre l'Amazonie et les Andes en considérant des impacts du changement climatique et des changements d'occupation du sol en Amazonie.

Ce mémoire est composé de trois parties. Dans la **Partie I**, une synthèse de mes travaux de recherche est exposée. **La Partie II** est consacrée à détailler mes perspectives de recherche pour les prochaines années, et finalement, dans la **Partie III** je présente un résumé de mes activités d'animation, d'organisation de la recherche et de l'enseignement. Enfin, dans la finalité de fournir plus de détails sur les résultats les plus importants exposés dans ce document, une sélection de 19 articles scientifiques sont inclus comme Annexes.

Table de Matières

I.- Activités de recherche (p.5)

1. Introduction (p.6)
2. La variabilité hydro-climatique dans le bassin Amazonien et son impact sur l'hydrologie (p.9)
3. Événements hydrologiques extrêmes dans l'ouest du bassin Amazonien (p.17)
4. Variabilité climatique aux échelles synoptique et intrasaisonnière (p.25)
5. Impacts de la variabilité climatique sur la précipitation dans les Andes tropicales (p.34)
6. Collaborations en paléoclimatologie et en hydrosédimentologie (p.43)

II.- Perspectives de recherche (p.46)

1. Impacts des changements climatiques et de la végétation dans l'hydrologie du continuum Andes-Amazonie : Le projet AMANECER (p.47)
2. Événement hydro-climatiques extrêmes : Outils pour la prévision et projections futures (p.58)
3. Chronologie et collaborations internationales (p.61)

III. Animation et organisation de la recherche et de l'enseignement (p.63)

1. Animation de la recherche (p.64)
2. Formation et enseignement (p.66)

IV. Titres et travaux (p.70)

1. Publications dans des revues internationales à comité de lecture (p.71)
2. Rapports internationaux (p.76)
3. Chapitres de livres (p.76)
4. Articles dans des actes de congrès (p.77)
5. Communications invitées lors de conférences et congrès internationaux (p.78)

V.- Bibliographie (p.80)

Annexes (p.87)

Téléchargeable à l'adresse:
<https://drive.google.com/file/d/1hYclEtarysIA1OFpKbOKgfgY0zFUr4HO>



I. Activités de recherche

1.- Introduction

Mes travaux scientifiques ont été consacrés à l'étude de la variabilité climatique et de ses impacts sur l'hydrologie et sur les événements extrêmes en Amérique du Sud tropicale. En Amazonie brésilienne la variabilité spatio-temporelle des précipitations et des débits a été abondamment étudiée. Néanmoins, en dehors de l'Amazonie brésilienne, et notamment dans la partie amazonienne des pays andins (Bolivie, Pérou, Équateur et Colombie, soit 36% de la surface totale du bassin) la variabilité hydro-climatique a été beaucoup moins traitée. Au début de mes études de thèse la variabilité interannuelle des pluies et des débits avait fait l'objet de nombreux travaux pour ce qui est du nord-est du bassin amazonien où elle est influencée par la température de surface de la mer (TSO) du Pacifique équatorial (ENSO) et de l'Atlantique tropical. En 2005, une sécheresse connue comme « la sécheresse du siècle » a été observée en Amazonie brésilienne et, contrairement aux sécheresses précédentes (e.g. 1926 et 1998), elle n'a pas été associée au phénomène El Niño, mais à des conditions plus chaudes dans l'Atlantique tropical nord (Marengo and Espinoza 2016). En 2010 un nouvel épisode de sécheresse a eu lieu en Amazonie et elle a été associée à des anomalies de la TSO dans la région tropicale, El Niño 2009-10, suivis par des conditions chaudes dans l'Atlantique tropical nord. Par ailleurs, les inondations extrêmes dans le cours principal de l'Amazone ont été plus fréquentes depuis 1990 (Espinoza et al., 2009b), mais les causes de la hausse de ces débits de crue restaient inconnues. Décrire et comprendre l'origine de la variabilité hydrologique interannuelle avec une approche régionale, ainsi que l'origine et les impacts d'événements hydrologiques extrêmes à l'ouest du bassin amazonien ont donc motivé une grande partie de mes activités de recherche. De plus, la variabilité des débits en Amazonie résulte d'une variabilité spatio-temporelle complexe des précipitations liées à la circulation atmosphérique régionale et à ses interactions avec des conditions locales, par exemple avec la topographie andine, sujet qui restait mal connu. En effet, à une échelle temporelle de l'ordre du jour ou de quelques journées, la relation entre la circulation atmosphérique régionale et les épisodes de jours de précipitation extrême, ou d'absence de précipitations pendant des périodes prolongées, était très peu décrite en Amazonie brésilienne et inconnue à l'ouest du bassin amazonien.

C'est dans ce contexte que mes premiers travaux de recherche (lors de mon doctorat) ont visé à mieux comprendre la variabilité climatique dans l'ensemble du bassin de l'Amazone et son impact sur l'hydrologie. Avec l'ambition de fournir une connaissance intégrée de la variabilité hydroclimatique du bassin amazonien, je me suis intéressé à quatre grandes régions ou sous-régions, dont certaines se recouvrent partiellement mais qui présentent chacune des spécificités hydro-climatique assez uniques :

i) L'ensemble du bassin de l'Amazone (Figure 1a) : Cette région comprend le bassin versant le plus grand de la planète (~6 millions de km²) et représente un des plus riches écosystèmes connus. Il s'étend sur 7 pays : le Brésil (63% du bassin), le Pérou (16%), la Bolivie (12%), l'Équateur (2%), la Colombie (6%), le Venezuela (<1%) et la Guyane (<1%).

ii) L'ouest du bassin amazonien (Figure 1b) : Cette région comprend notamment le bassin amazonien des pays andins. Mes études se sont principalement centrées sur les bassins versants des deux plus grands tributaires de l'Amazone : l'Amazonas-Solimões en Amazonie péruvienne et équatorienne (~50% dans les Andes ; i.e. au-dessus de 500

m) et le haut Madeira en Amazonie bolivienne, brésilienne et péruvienne (~23% dans les Andes).

iii) *La région de transition Andino-Amazonienne* (Figure 1b) : Région caractérisée par de forts gradients topographiques sur le flanc est des Andes, généralement entre 500 m et 3000 m d'altitude, induisant de très forts contrastes climatiques ; elle est connue pour présenter une des plus grandes biodiversités au niveau mondial (Myers et al., 2000).

iv) *La région andine* (Figure 1b) : Cette région est caractérisée par des conditions plus sèches et une plus grande densité de population. Elle s'étend au-dessus de 500 m d'altitude sur le flanc ouest des Andes (principalement les têtes des bassins versants drainés vers le Pacifique) et au-dessus de 3000 m d'altitude sur le flanc est des Andes (tête du bassin de l'Amazone principalement). Cette région comprend également le bassin versant du Titicaca sur la région de l'Altiplano péruano-bolivien.

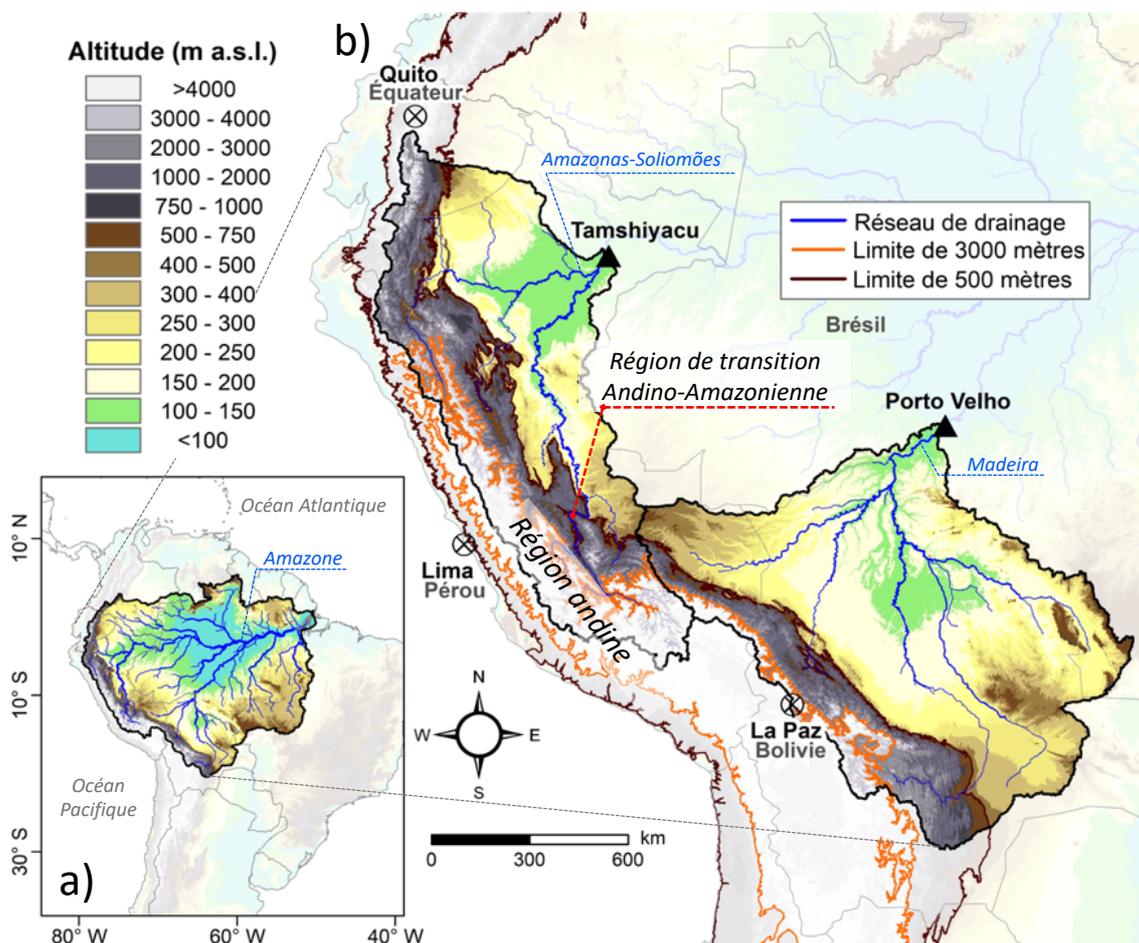


Figure 1. a) Localisation du bassin versant de l'Amazone en Amérique du Sud tropicale, relief et réseau hydrographique du bassin amazonien. b) Ouest du bassin amazonien et région andine. Les stations hydrométriques de Tamshiyacu (Pérou) sur l'Amazonas et de Porto Velho (Brésil) sur le Madeira sont indiquées (triangles noirs). La région de transition Andino-Amazonienne (500-3000 m d'altitude) est indiquée en couleur marron et gris. La région andine est indiquée en blanc. Les lignes de niveau de 500 m et 3000 m sont indiquées en marron et orange, respectivement.

J'ai focalisé mes travaux sur une analyse régionale de la variabilité hydroclimatique à différentes échelles de temps (Tableau 1) et en considérant les quatre entités géographiques décrites auparavant (Figure 1). Au-delà de la distribution spatiale des pluies et débits et de leurs cycles saisonniers caractéristiques, je me suis intéressé à la

variabilité interannuelle et à l'occurrence des événements extrêmes (principalement crues et sécheresses). Dans des régions où la disponibilité des données le permettait, je me suis intéressé à la variabilité à long-terme (analyses des tendances et variabilité interdécennale). Enfin, mes études ont aussi décrit les modes de variabilité synoptique et intrasaisonnier de la circulation atmosphérique et leur relation avec des variables hydrométéorologiques observées.

La synthèse de mes activités de recherche présentée dans ce document, s'organise autour de 5 grands axes (cf. Tableau 1.1) : le **Chapitre 2** est dédié à l'étude de la variabilité climatique dans l'ensemble du bassin amazonien et de son impact sur l'hydrologie, principalement aux échelles saisonnière, interannuelle et interdécennale. Dans le **Chapitre 3** je présente une synthèse des études sur les événements hydrologiques extrêmes, sécheresses et inondations saisonnières, à très fort impact principalement à l'ouest du bassin amazonien. Le **Chapitre 4** est consacré à l'étude de la variabilité climatique aux échelles synoptique et intrasaisonnier dans l'ensemble du bassin amazonien et principalement à l'ouest du bassin amazonien. Dans le **Chapitre 5** je présente un résumé des travaux menés sur la variabilité des précipitations dans les Andes tropicales aux échelles saisonnière, interannuelle et décennale, et finalement dans le **Chapitre 6** je décris des résultats scientifiques obtenus dans le cadre de collaborations sur l'hydrosédimentologie et sur la paléoclimatologie en Amazonie et dans la région de transition Andino-Amazonienne.

Tableau 1.1. Résumé des principales échelles spatio-temporelles décrites dans chaque chapitre.

	Ensemble du bassin amazonien	Ouest du bassin amazonien	Region Andino-Amazonienne	Région andine
Distribution spatiale des précipitations	Chap. 2	Chap. 2	Chap. 2	Chap. 5
Échelle saisonnière	Chap. 2	Chap. 2	Chap. 2	Chap. 5
Échelle interannuelle	Chap. 2/ Chap. 3	Chap. 2/ Chap. 3	Chap. 3	Chap. 5
Échelle décennale et tendances	Chap. 2	Chap. 2		Chap. 5
Événements hydro. extrêmes	Chap. 3	Chap. 3	Chap. 3	Chap. 5
Échelle intrasaisonnier	Chap. 4	Chap. 4	Chap. 4	Chap. 4

2.- La variabilité hydro-climatique dans le bassin amazonien et son impact sur l'hydrologie

2.1. Distribution spatiale et cycle saisonnier des précipitations

Lors de mes travaux de doctorat, dans le cadre du programme HYBAM et au sein de l'équipe VARCLIM du LOCEAN, une nouvelle base de données pluviométrique a été compilée pour 5 pays amazoniens (plus de 1800 postes). Suite à l'application de tests de qualité, les données mensuelles de 756 postes pluviométriques ont été retenues pour une période commune allant de 1963 à 2004. Cette base de données, particulièrement riche en informations sur les pays andins (notamment Bolivie, Pérou, Équateur et Colombie) a permis pour la première fois une analyse intégrale de la variabilité spatio-temporelle de la pluie dans le bassin de l'Amazone (Figure 2.1a). Ce travail a permis d'avoir une compréhension plus fine de la distribution spatiale des précipitations dans l'ensemble du bassin amazonien et de la variabilité pluviométrique aux échelles saisonnière, interannuelle et décennale en considérant le rôle de la circulation atmosphérique de grande échelle et les variations des températures de surfaces océaniques (TSO) du Pacifique et de l'Atlantique, principalement (Espinoza et al., 2009a, Annexe 1).

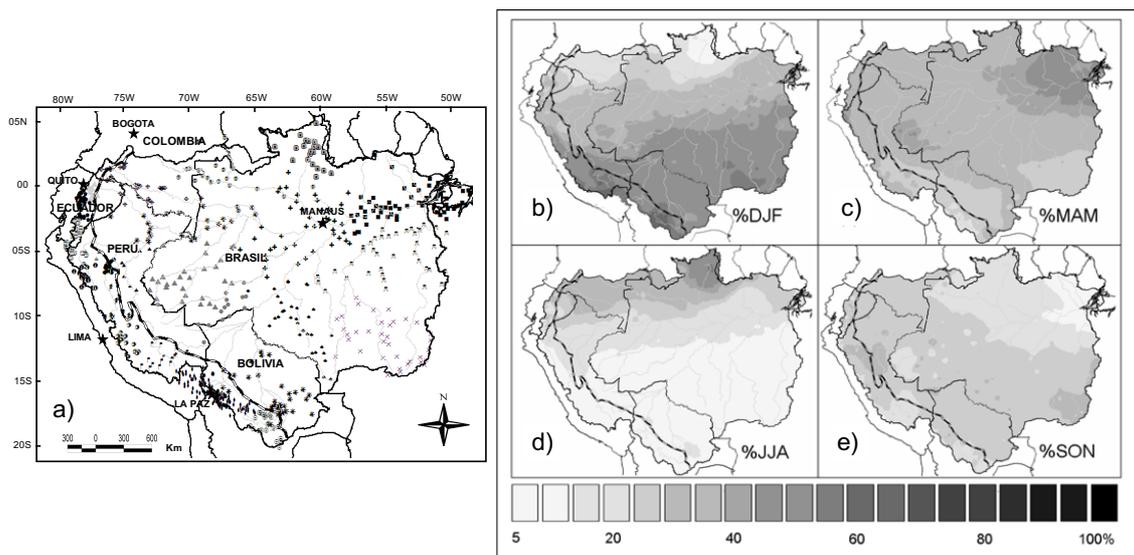


Figure 2.1. Limite du bassin amazonien et ligne de niveau de 500 m (ligne noire et blanche). a) localisation des postes pluviométriques analysés dans Espinoza et al. (2009a). De b) à e) pourcentage trimestriel des précipitations par rapport au total annuel. Source : Espinoza et al. (2009a).

Espinoza et al. (2009a) montrent une claire opposition de la période pluvieuse entre le sud et l'extrême nord du bassin pendant l'été (décembre-février) et l'hiver austral (juin-août) respectivement, tandis qu'au nord-est du bassin les plus fortes pluies se concentrent pendant l'automne austral (Figure 2.1b-e). Des informations détaillées de la variabilité des précipitations sont présentées pour la première fois pour l'Amazonie péruano-équatorienne, où l'on constate une grande diversité de cycles saisonniers dans un espace relativement réduit (quelques km). Les conditions atmosphériques qui donnent lieu aux différents cycles saisonniers sont aussi décrites.

Cette étude souligne le rôle important du relief, en particulier celui de l'exposition des stations aux vents humides dominants, non seulement sur la distribution spatiale des pluies annuelles mais aussi sur les régimes pluviométriques. En effet, le long de la région andine (depuis la Colombie jusqu'à la Bolivie), on mesure à la fois les plus faibles et les plus fortes valeurs de pluie. Cette étude a aussi mis en valeur la relation pluie-altitude dans l'Amazonie des pays andins. En complément de ces résultats, Espinoza et al (2015) ont identifié pour la première fois les facteurs atmosphériques responsables de maximums des précipitations à l'est des Andes. En effet, dans la région de transition Andino-Amazonienne, certaines zones présentent les valeurs les plus élevées de précipitation de l'ensemble du bassin amazonien (6000 mm/an) ; ces régions, situées généralement entre 500 et 1000 m d'altitude, sont connues comme des « hotspots de précipitations » (Espinoza et al., 2015, Annexe 2). En effet, grâce à la mise en place d'une nouvelle base de données pluviométriques à pas de temps journalier dans la région est des Andes, en Bolivie et au sud du Pérou, il est désormais possible d'étudier l'intensité des précipitations dans cette région ainsi que ses principales caractéristiques spatio-temporelles. Cette étude se sert aussi des estimations du radar TRMM-PR 2A25 pour avoir une vision à échelle spatiale fine ($\pm 5\text{km}$) des précipitations (Figure 2.2). Espinoza et al (2015) montrent que la direction et l'intensité des vents de basses couches (low-level jet) expliquent partiellement l'intensité des précipitations dans les régions de hotspot en Bolivie et au Pérou.

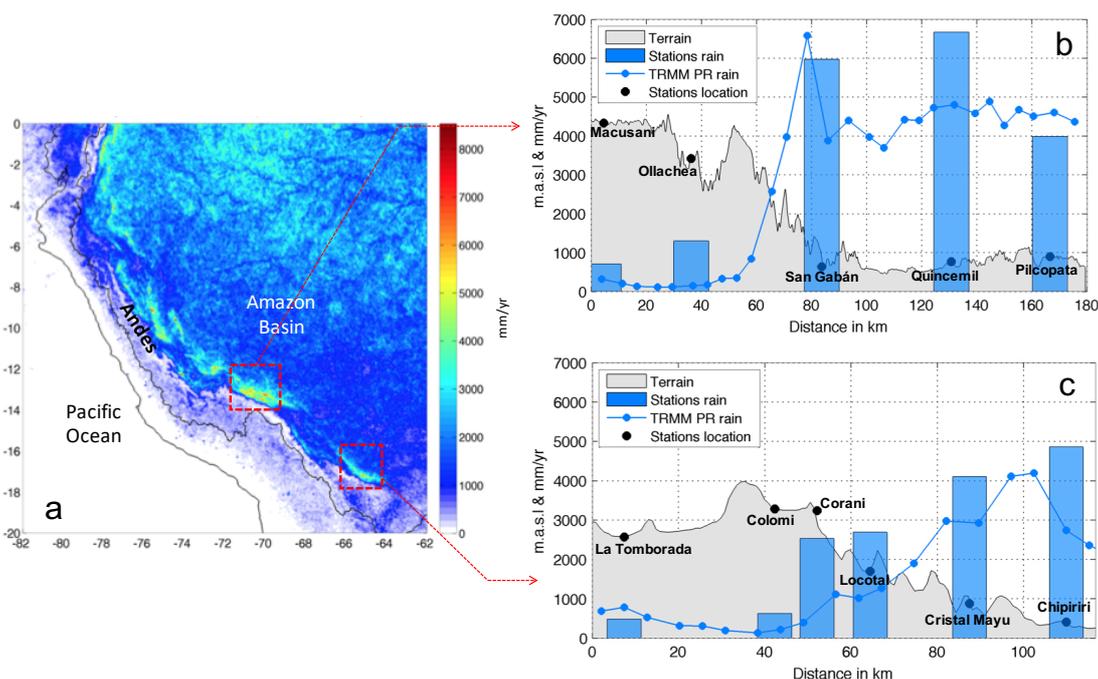


Figure 2.2. a) Précipitation moyenne annuelle dans l'ouest du bassin amazonien (mm/an, 1998-2012) estimée par TRMM-PR 2A25. b) Profil topographique (gris) et pluie totale annuelle pour des stations (barres) et des estimations de TRMM-PR (ligne) dans les régions de hotspot au Pérou (b) et en Bolivie (c). Source Espinoza et al (2015).

2.2. Évolution des intensités de précipitation dans le bassin amazonien

L'analyse pluriannuelle des pluies observées en Amazonie pour la période 1975-2004 (Espinoza et al., 2009a) montre une variabilité à long terme durant les saisons les plus pluvieuses (de décembre à mai, DJF et MAM), avec des fortes pluies dans les années 1970, une baisse ensuite et une nouvelle hausse depuis les années 1990 dans la région

nord-ouest ; le contraire est observé dans le sud du bassin. L'analyse de tendance des précipitations a été mise à jour et complétée par l'analyse de l'évolution de l'intensité de précipitation dans Espinoza et al (2019a ; Annexe 3). Cette étude se base sur deux bases de données interpolées : *Interpolated HYBAM observed precipitation* (HOP, $1^\circ \times 1^\circ$ de résolution spatiale, pour la période 1981-2009) et *The Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS, $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ de résolution spatiale, pour la période 1981-2017). Il est important de préciser que la base de données HOP a été constituée grâce aux informations provenant d'Espinoza et al (2009a) et Guimberteau et al (2012).

Espinoza et al (2019a) mettent en évidence que les précipitations les plus fortes ($>10\text{mm/jour}$) sont devenues plus fréquentes à partir de 1998 dans le nord du bassin (qui inclue le nord de l'Amazonie péruvienne et brésilienne), principalement lors de l'automne austral (mars-mai, Figure 2.3a). Ce changement de l'intensité de précipitation a affecté aussi la pluie accumulée pendant cette saison. Ainsi, pendant les deux dernières décennies du $\text{XX}^{\text{ème}}$ siècle, des totaux supérieurs à 900 mm ont été dénombrés 4 fois pour la période qui va de mars à mai, alors que depuis 1999 ce total a été dépassé 14 fois. Ce changement correspond à une augmentation de 17% de la pluie de mars à mai pendant la période 1981-2017. Ce changement d'intensité des pluies est lié au réchauffement de l'océan Atlantique tropical nord qui favorise l'ascendance de l'air et une forte convection au nord du bassin amazonien (Figure 2.4).

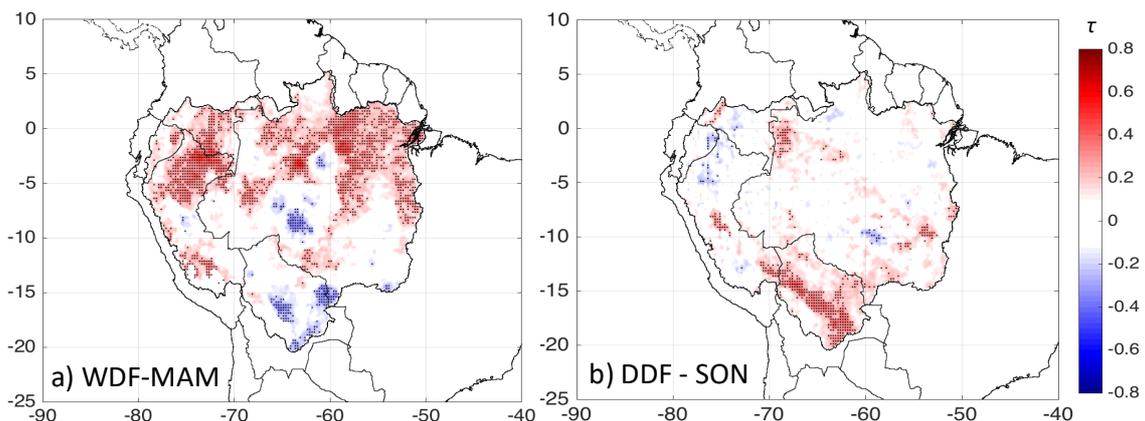


Figure 2.3. Distribution spatiale des valeurs du coefficient de Kendall ($p < 0.05$) qui montrent les tendances de : a) la fréquence des jours humides - WDF pour le sigle en anglais ($P > 10 \text{ mm/jour}$) pendant la période mars-mai et b) la fréquence des jours secs – DDF pour le sigle en anglais ($P < 1 \text{ mm/jour}$) pendant la période septembre-novembre pour la période 1981-2018. Adapté d'Espinoza et al (2019a).

Dans le sud du bassin de l'Amazone, durant les dernières décennies, un accroissement significatif du nombre de jours secs a été observé, principalement au printemps austral (septembre-novembre, Figure 2.3b) ; la diminution correspondante des pluies, de 18%, se produit lors de la mise en place de la saison des pluies et au début du cycle agricole. Ce changement est lié à une subsidence atmosphérique accrue depuis les hauts niveaux de la troposphère dans le sud du bassin amazonien, ce qui inhibe la convection et modifie la circulation atmosphérique régionale (Figure 2.5).

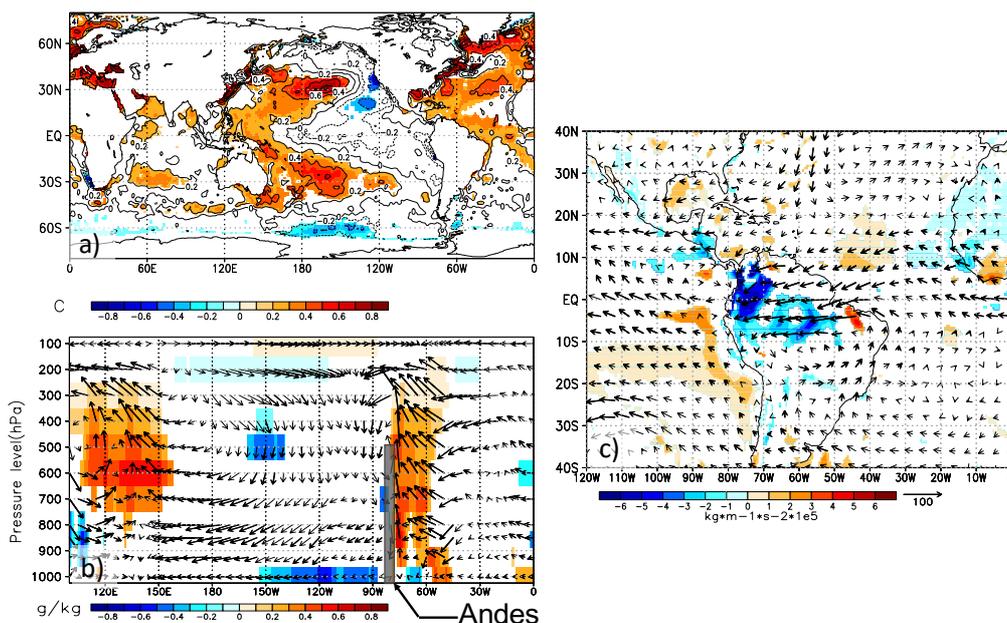


Figure 2.4. Changements des conditions océano-atmosphériques pendant la saison de mars-mai calculés à partir de la différence des périodes 1999-2017 et 1981-1998 de a) la température de surface de l'océan - TSO (°C), b) l'humidité spécifique (g/kg, couleurs) et des vents zonal et vertical (m/s, vecteurs) dans une section transversale longitude vs. niveaux de pression entre 5°S et 0°, et c) flux de vapeur d'eau verticalement intégré (vecteurs) et sa divergence (couleurs). En a, b et c les régions sont colorées lorsque les changements sont significatifs à 95% d'après un test de Student. Source : Espinoza et al (2019a).

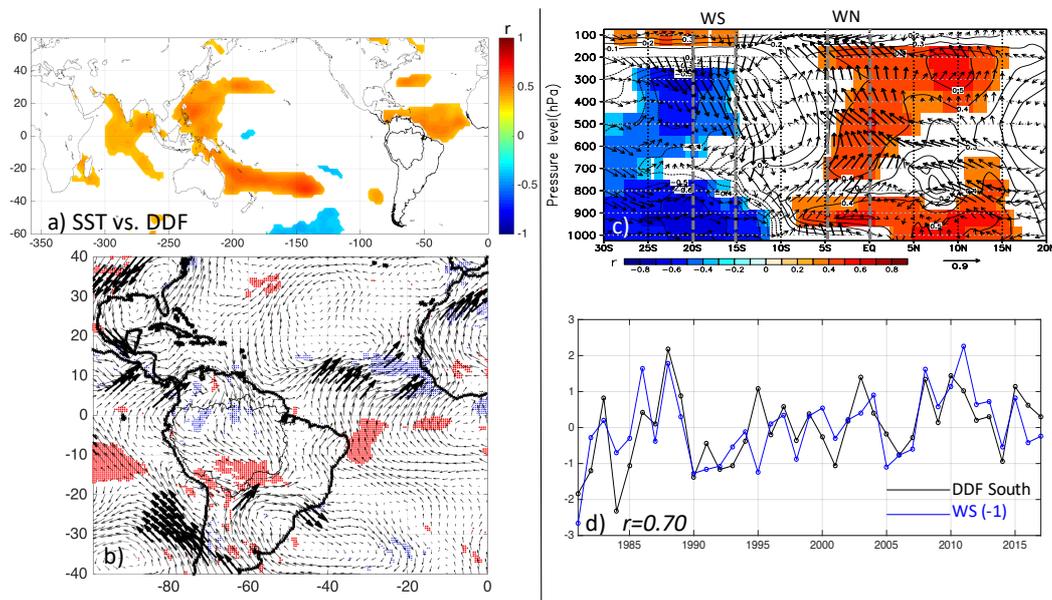


Figure 2.5. Corrélation interannuelle de Pearson entre la fréquence de jours secs (DDF) pendant le trimestre septembre-novembre en Amazonie bolivienne (sud de 12.5°S ; 70°W-60°W) et a) la TSO, b) le flux de vapeur d'eau verticalement intégré (vecteurs) et sa divergence (couleurs : rouge pour divergence et bleu pour convergence), c) humidité spécifique (couleurs) et le vent méridional-vertical dans une section transversale (latitude-niveaux de pression) entre 75°W et 55°W. En a, b et c, les valeurs colorées sont significatives à 95% et les vecteurs en gras correspondent à des valeurs de r significatifs à 95%. d) Évolution interannuelle de DDF pendant le trimestre septembre-novembre en Amazonie bolivienne (ligne noire) et valeur moyenne du vent vertical à 300 hPa dans la région 75°W-55°W ; 20°S-15°S (WS, ligne bleu). Les valeurs de DDF et WS ont été centrées réduites et WS a été multiplié par -1. Source : Espinoza et al., 2019a.

2.3. L'évolution hydrologique dans les principaux sous-bassins de l'Amazonie

Dans le cadre de ma thèse, une nouvelle base de données hydrométriques du programme HYBAM, qui prenait en compte pour la première fois les 18 stations qui contrôlent les principaux sous-bassins du bassin amazonien, a été mise en place pour la période 1974-2004 (Espinoza et al., 2009b, Annexe 4). Cette étude a permis de documenter la variabilité hydrologique du bassin de l'Amazonie avec une approche régionale, et en s'intéressant particulièrement à l'évolution des débits pendant les périodes d'étiages et de crues. L'étude met en évidence l'importance de la variabilité hydrologique pluriannuelle dans la région ouest du bassin, et particulièrement de l'Amazonie des pays andins. Initialement, l'étude a permis de documenter les états moyens de l'hydrologie à l'intérieur du bassin et a fourni des informations inédites sur les apports d'eau des principaux sous-bassins à la région centrale du bassin amazonien. Les contributions des principaux sous-bassins changent aussi au cours de l'année en fonction de leurs différents régimes hydrologiques.

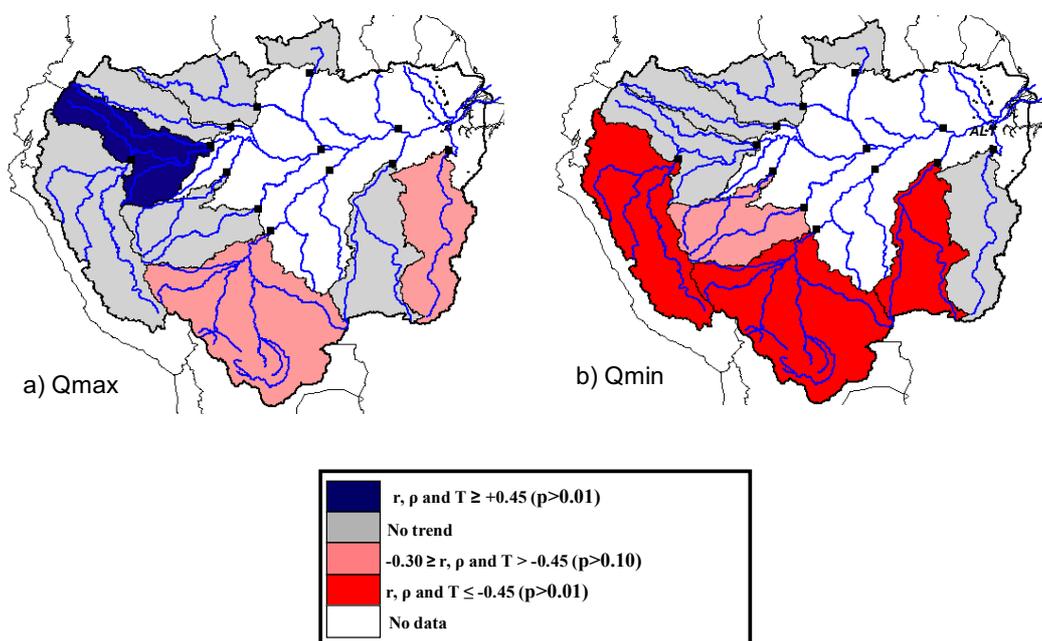


Figure 2.6. Coefficients de corrélation de Pearson (r), Spearman (ρ) et Kendall (T) entre le temps (1974-2004) et l'écoulement dans les principaux sous-bassins de l'Amazonie pour a) les maximums mensuels de chaque année (Q_{max}) et b) les minimums mensuels de chaque année (Q_{min}). Les couleurs indiquent le signe et magnitude de la tendance : rouge pour des tendances négatives et bleu pour des tendances positives. Source : Espinoza et al (2009b).

L'analyse des tendances et de la variabilité spatiotemporelle des débits montrent, entre 1974 et 2004, une diminution générale des débits d'étiage, particulièrement forte dans les bassins du sud (Amazonie bolivienne et péruvienne, principalement), et une augmentation des débits de crues dans les bassins du nord-ouest (Amazonie péruvienne, équatorienne et colombienne). Cette opposition entre sud et nord-ouest est encore plus marquée depuis le début des années 1990 et concerne notamment les bassins des pays andins (Figure 2.6). Ces tendances sont expliquées par les changements dans l'intensité des pluies décrites dans Espinoza et al (2009a et 2019a) (Section 2.2). Ainsi, l'augmentation récente des débits maximaux dans le nord-ouest du bassin est associée à une augmentation de l'activité convective dans cette région et une plus grande fréquence des jours très pluvieux. Par contre, la diminution des débits d'étiages est associée à une intensification de la subsidence des vents dans le sud du bassin et

une fréquence plus importante des jours secs pendant le début de la saison humide. Plusieurs études récentes, auxquelles j'ai participé comme co-auteur ou auteur principal, ont confirmé ces changements dans le régime hydro-climatique en Amazonie, par exemple Espinoza et al (2011), Lavado-Casimiro et al (2012, 2013) et Ronchail et al (2018) en Amazonie péruvienne, Molina-Carpio et al (2017) et Espinoza et al (2019b) en Amazonie bolivienne, Gloor et al (2013) et Barichivich et al (2018) dans le cours principal de l'Amazone, et Wongchuig-Correa et al (2018), Zubieta et al (2015, 2017) dans différents tributaires de l'Amazone à l'aide du modèle hydrologique MHB-IPH.

Dans le cours principal de l'Amazone, Barichivich et al (2018) analysent la série historique des niveaux à Manaus, Brésil, pour la période 1903-2015. L'étude montre une intensification du cycle annuel de la variabilité des niveaux à partir des années 1990s, principalement lié à une augmentation des hauteurs d'eau pendant la période de crues (Figure 2.7). Ces résultats mettent en évidence le rôle de l'intensification des précipitations dans le nord-ouest du bassin, qui correspond à la région la plus pluvieuse du bassin (Espinoza et al., 2019a). Par ailleurs, cette étude montre que ces changements observés récemment sont les plus remarquables à l'échelle du bassin amazonien en tenant compte de plus de cent ans d'information hydrologique.

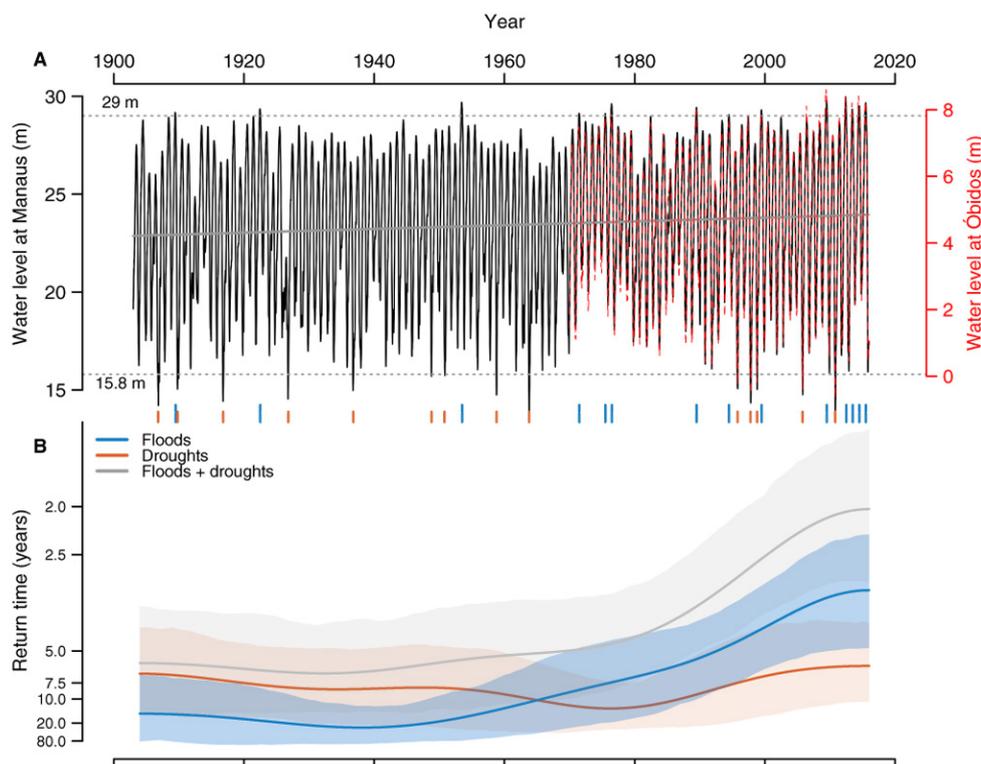


Figure 2.7. a) Niveaux journaliers du Rio Negro à Manaus (ligne noire, 1903-2015) et de l'Amazone à Óbidos (ligne rouge ; 1968-2015). Les lignes horizontales (15.8 m et 29 m) montrent les seuils utilisées pour la définition des étiages et crues extrêmes (les événements résultant sont indiqués par des tirets verticaux de couleur orange pour les étiages et bleue pour les crues). b) Temps de retour des étiages et crues identifiés en a) entre 1993-2015.

En Amazonie bolivienne, où de forts changements en termes des précipitations ont été observés (Espinoza et al., 2019a), Molina-Carpio et al (2017) montre une diminution du débit dans les stations hydrométriques du bassin du Madeira (1985-2013), qui est plus remarquable lors de l'étiage (Figure 2.8a). Plus récemment, en analysant la période 1982-2017, Espinoza et al (2019b, Annexe 5), montrent que la diminution des débits

pendant la période d'étiage est associée à une diminution des précipitations dans la région sud du bassin du Madeira (bassins des rivières Mamoré et Guaporé, principalement). Par contre, au nord du bassin du Madeira (bassins des fleuves Beni et Madre de Dios) une augmentation des pluies intenses est constatée, principalement pendant la période de décembre-février. Ce changement régional des précipitations a modifié le régime hydrologique du Madeira, où une diminution significative du coefficient d'écoulement est constatée durant la période 1982-2017 (Figure 2.8b).

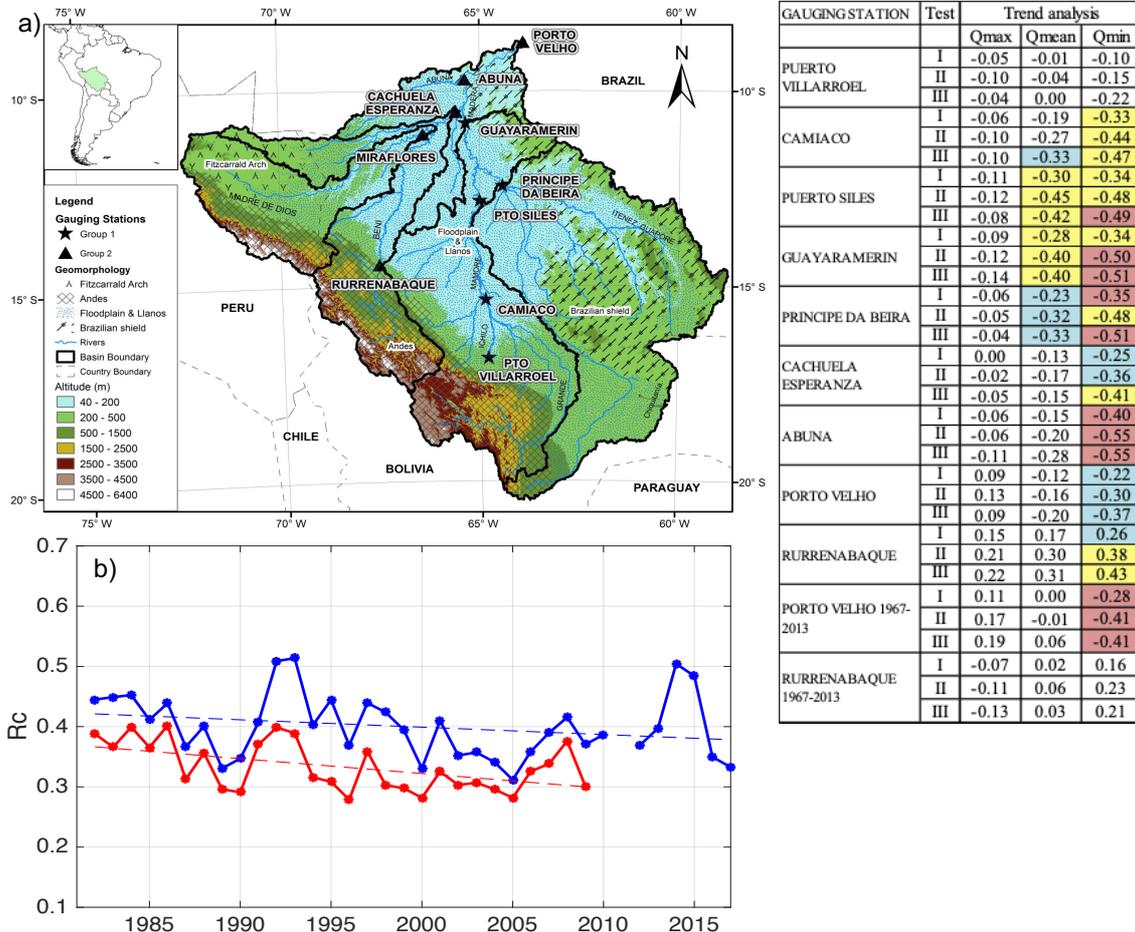


Figure 2.8. a) Localisation des principales stations hydrométriques dans le haut bassin du Madeira (à gauche) et analyse de tendance (à droite) des débits maximums mensuels (Q_{max}), moyens (Q_{mean}) et minimums (Q_{min}) annuels pour la période 1985-2013. Les valeurs des coefficients de Mann-Kendall (I), Spearman (II) et Pearson (III) sont indiqués. Les significativités statistiques à 99%, 95% et 90%, sont indiquées en couleur rose, jaune et bleu clair, respectivement. Source : Molina-Carpio et al (2017). b) Évolution temporelle du coefficient d'écoulement dans le haut Madeira à Porto Velho en utilisant la pluie moyenne annuelle de HOP (ligne rouge, 1982-2009) et CHIRPS (ligne bleu, 1982-2017). Source : Espinoza et al (2019b).

Enfin, mes connaissances scientifiques sur la variabilité spatiale et temporelle des précipitations en Amazonie, m'ont permis de collaborer à différentes études où des comparaisons entre des produits pluviométriques et des validations des estimations des précipitations par des satellite sont faites en Amazonie et dans les Andes (Getirana et al., 2011 ; Condom et al 2011 ; Zubieta et al., 2015, 2017, 2019 ; Wongchuig-Correa et al., 2017).

2.4. Conclusions et commentaires finaux du chapitre

Dans ce chapitre la variabilité spatio-temporelle des pluies dans l'ensemble du bassin amazonien a été analysée grâce à des estimations de données satellites et d'informations in-situ, provenant de cinq pays du bassin. Ces résultats ont été particulièrement importants pour les pays andins (notamment le Pérou, l'Équateur, la Bolivie et la Colombie) où on constate le rôle important du relief, non seulement sur la distribution spatiale des pluies annuelles mais aussi sur les régimes pluviométriques. La région Andino-Amazonienne est caractérisée par une forte interaction entre les flux d'humidité de grande échelle et la topographie andine, responsable de contrastes extrêmes de précipitation.

Dans le sud du bassin amazonien, la précipitation a diminué pendant la période 1970-2009. Par ailleurs, la pluie dans le nord du bassin a montré une forte augmentation et les inondations sont plus fréquentes depuis 1990. Ainsi, une intensification du cycle annuel de la variabilité des niveaux a été constatée dans le cours principal de l'Amazone pendant les deux dernières décennies avec un signal très important dans la région andine du bassin. Cette intensification des niveaux extrêmes est expliquée par un changement des régimes de pluies lié au réchauffement de l'océan Atlantique tropical nord et une modification de la circulation atmosphériques régionale. En effet, le réchauffement de l'océan Atlantique tropical nord favorise l'ascendance de l'air et une forte convection au nord du bassin amazonien, principalement pendant l'été et l'automne austral. Néanmoins, dans le sud du bassin, une subsidence atmosphérique accrue depuis les hauts niveaux de la troposphère a été observé durant les dernières décennies, ce qui inhibe la convection sur cette région. Par conséquent, dans le sud du bassin une saison sèche plus longue a été mise en évidence depuis les années 1980s, ayant des impacts sur la végétation, et sur la fréquence des incendies forestiers (Espinoza et al., 2016). Dans un contexte de changement climatique, la fréquence d'événements extrêmes de type sécheresses extrêmes, pourraient devenir plus importante (e.g. Guimberteau et al., 2013) et en conséquence produire des changements significatifs de la végétation dans le sud du bassin, où l'on pourra avoir une transformation progressive en forêt saisonnière ou de type savane (voir références dans Marengo and Espinoza, 2016).

3.- Événements hydrologiques extrêmes dans l'ouest du bassin amazonien

Les résultats obtenus dans Espinoza et al (2009a et 2009b) ont montré que les événements hydrologiques extrêmes dans le bassin de l'Amazone sont plus fréquents depuis les années 1990s. De plus, le rôle de la variabilité interannuelle des pluies et débits dans l'Amazonie des pays andins a aussi été mis en évidence. Ces résultats ont été ensuite confirmés dans Gloor et al (2013) et Barichivich et al (2018) à l'échelle du cours d'eau principal de l'Amazone où nous utilisons plus de cent ans d'information hydrométrique.

Dans la continuité de la variabilité hydro-climatique à long-terme observée dans le bassin de l'Amazone et détaillée dans le Chapitre 2, l'Amazone a connu récemment des événements hydrologiques extrêmes sans précédent. Les sécheresses les plus intenses de ces dernières décennies ont eu lieu en 2005 et en 2010, tandis que des inondations sévères se sont produites en 2009, 2012 et 2014 (Espinoza et al., 2012 ; 2013 ; 2014 ; Marengo and Espinoza., 2016). Ces événements ont fortement affecté les sociétés amazoniennes, en particulier dans l'Amazonie des pays andins où les fleuves sont les seuls moyens de transport et permettent l'échanges de marchandises. En termes d'impacts, Les inondations extrêmes impactent l'agriculture locale, les infrastructures des villes amazoniennes et sont à l'origine de problèmes sanitaires liés à la contamination des eaux. Dans la partie sud du bassin, la saison sèche et la période d'étiage sont plus longues ce qui affecte le cycle agronomique et les récoltes. De plus cela limite le transport fluvial des produits d'exportation vers les ports de l'Atlantique. Ces périodes sèches prolongées ont un impact sur l'activité photosynthétique de la forêt amazonienne et favorisent des incendies fréquents qui alimentent le stock de gaz à effet de serre atmosphérique. En effet, lors des sécheresses de 2005 et 2010, différentes études ont montré que l'Amazonie a été une source nette de gaz à effet serre, contrairement à des conditions normales de puits net (voir résumé dans Marengo et Espinoza, 2016).

Au cours des huit dernières années, une partie importante de mes efforts ont été consacrée à l'amélioration de la compréhension de ces événements hydrologique extrêmes, principalement dans les pays andins du bassin amazonien. En conséquence, différentes études ont été publiées sur cette thématique. Les résultats de ces études ont permis la publication du premier article de type « *review* » sur les événements hydrologiques extrêmes en Amazonie (Marengo and Espinoza, 2016 ; Annexe 6). Une synthèse des événements hydrologiques extrêmes dans le bassin de l'Amazone depuis le début du XX^{ème} siècle est présentée dans la Tableau 3.1, où les facteurs climatiques associés et des références bibliographiques sont indiqués.

La Figure 3.1 montre des anomalies de précipitation pendant les années où des inondations et sécheresses extrêmes ont été observées dans le bassin de l'Amazone depuis les années 1980s.

Year	Extreme seasonal event	Related to	References
1906	Drought	EN	Sombroek (2001)
1912	Drought	EN	Williams et al (2005), Marengo et al (2008)
1916	Drought	EN	Sombroek (2001), Jenkins (2009)
1925-26	Drought	EN	Sternberg (1968, 1987), Meggers (1994), Williams et al. (2005), Marengo et al (2008), Sheffield and Wood (2011)
1948	Drought	EN	Sombroek (2001)
1963-64	Drought	warm TNA	Sombroek (2001), Marengo et al., 2008, Sheffield and Wood (2011)
1979-81	Drought	warm TNA	Sheffield and Wood (2011)
1982-83	Drought	EN + warm TNA	Sombroek (2001), Richey et al., (1989), Ronchail (2005); Marengo et al., (1992, 2008)
1995	Drought	EN + warm TNA	Espinoza et al., (2011)
1997-98	Drought	EN + warm TNA	Sombroek (2001), Marengo et al., (2008; 2011); Zeng et al., (2008); Espinoza et al., (2011); Tomasella et al., (2011, 2013), Coelho et al. (2013); dos Santos et al (2017)
2005	Drought	warm TNA	Marengo et al., (2008; 2011); Zeng et al., (2008); Phillips et al. (2009); Espinoza et al., (2011), Frappart et al (2012); Cox et al. (2008); Tomasella et al. (2011,2013), Anderson et al (2010); Yoon and Zeng., (2010); Aragão et al. (2007), Coelho et al. (2013); Saatchi et al; (2013); Davidson et al (2012); Maeda et al (2015); Mendes de Moura et al (2015); dos Santos et al (2017); Panisset et al (2018)
2010	Drought	EN + warm TNA	Phillips et al. (2009); Lewis et al., (2011); Davidson et al (2012); Marengo et al., (2011); Espinoza et al., (2011); Coelho et al. (2013); Shiogama et al (2013); Saatchi et al; (2013); Gatti et al (2014); Maeda et al (2015); Mendes de Moura et al (2015); dos Santos et al (2017); Broedel et al (2017); Panisset et al (2018)
2015-16	Drought	EN + warm TNA	Jimenez-Muñoz et al., (2016); Marengo et al (2017); Aragão et al (2018); Panisset et al (2018)
1953	Flood	?	Salati and Vose (1984), Ronchail et al (2005), Marengo et al (2010)
1976	Flood	LN	Marengo et al (2010), Satyamurty et al (2013b)
1989	Flood	LN	Ronchail et al (2006); Marengo et al., (2011, 2013 a, b); Espinoza et al., (2013)
1999	Flood	LN	Ronchail et al (2006); Marengo et al., (2011, 2013); Espinoza et al., (2013); Satyamurty et al., (2013b)
2009	Flood	warm TSA	Marengo et al., (2011); Filizola et al., (2014), Sena et al., (2012), Vale et al., (2011); Chen et al (2010)
2012	Flood	LN + warm TSA	Marengo et al., (2013a,b); Espinoza et al., (2013); Satyamurty et al., (2013a)
2014	Flood	warm IP + warm SSA	Espinoza et al., (2014); Ovando et al (2016); dos Santos et al (2017)

Tableau 3.1. Sécheresses et inondations remarquables en Amazonie depuis 1903. Les anomalies climatiques associées aux événements hydrologiques extrêmes sont indiqués : EN (El Niño), LN (La Niña), TNA (Atlantique tropical nord), TSA (Atlantique tropical sud), SSA (Atlantique subtropical sud), IP (Océan Indo-Pacifique). Source : Espinoza et al (2019a), d'après Marengo and Espinoza (2016).

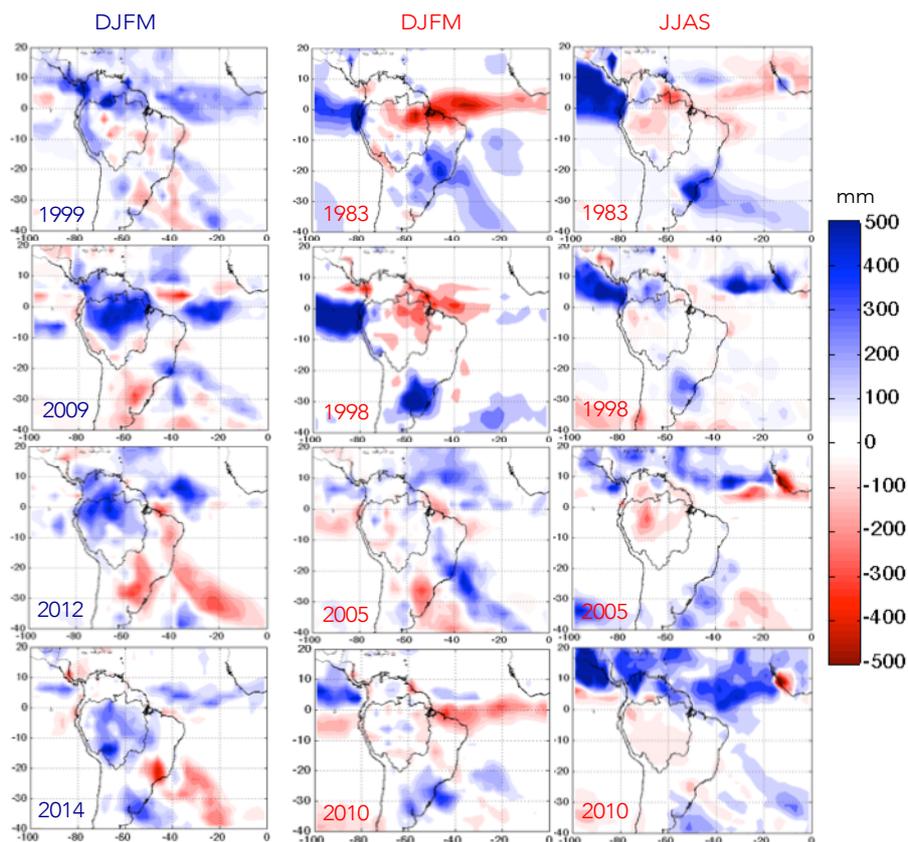


Figure 3.1. Anomalies de précipitation (mm/saison) pendant les années d'inondations, en considérant la saison humide décembre-mars (DJFM, à gauche), et les sécheresses, en considérant la saison humide DJFM (au milieu) et la saison sèche (juin-septembre, JJAS, à droite). Les anomalies sont calculées à partir d'une moyenne climatique de 1980-2013 avec les données du GPCP. Source : Marengo and Espinoza (2016).

3.1.- Sécheresses dans l'ouest du bassin amazonien

En Amazonie péruvienne, Espinoza et al. (2011, Annexe 7) ont réalisé une synthèse des causes et impacts hydrologiques des sécheresses les plus intenses (1995, 1998, 2005 et 2010). Bien que le manque de pluie en Amazonie est le plus souvent attribué aux événements El Niño (comme en 1998), les derniers événements secs, les plus sévères, ont montré le rôle fondamental de la TSO de l'Atlantique tropical qui se réchauffe depuis les années 1970. Associé à des anomalies chaudes de la surface de l'Océan Atlantique tropical, un affaiblissement des vents alizés est observé et, en conséquence, une diminution du transport de vapeur d'eau depuis l'Océan Atlantique vers l'ouest du bassin amazonien (Figure 3.2). Les étiages très bas ont des impacts sociaux et économiques importants ; par exemple, ils occasionnent une hausse du coût des aliments dans les régions où le transport fluvial est le mode principal de mobilité des biens et des personnes. En septembre 2010, l'Amazonas à Tamshiyacu (Pérou ; 750000 km²) a connu son niveau le plus bas (8300 m³/s) ; ce phénomène a été attribué, d'une part à des conditions El Niño pendant l'été austral 2009-10 et d'autre part, à des températures exceptionnellement chaudes dans l'Atlantique tropical nord pendant l'hiver austral suivant (Espinoza et al., 2011). Suite à cet événement de sécheresse extrême, une transition rapide entre étiage et crue a été observé pendant l'année hydrologique 2010-2011 en Amazonie péruvienne (Espinoza et al., 2012a ; Annexe 8). Pendant cette transition, le débit à Tamshiyacu sur l'Amazonas est passé de 8300 m³/s à 49500 m³/s, un des quatre débits les plus élevés jamais observés. Cette transition

exceptionnelle a aussi été observée dans les sédiments en suspension mesurés à cette station hydrométrique. En effet, en considérant la période 2004-2011, la valeur la plus basse de la concentration de sédiments en suspension a été observée en octobre 2010 et la plus élevée en février 2011 (Espinoza et al., 2012a).

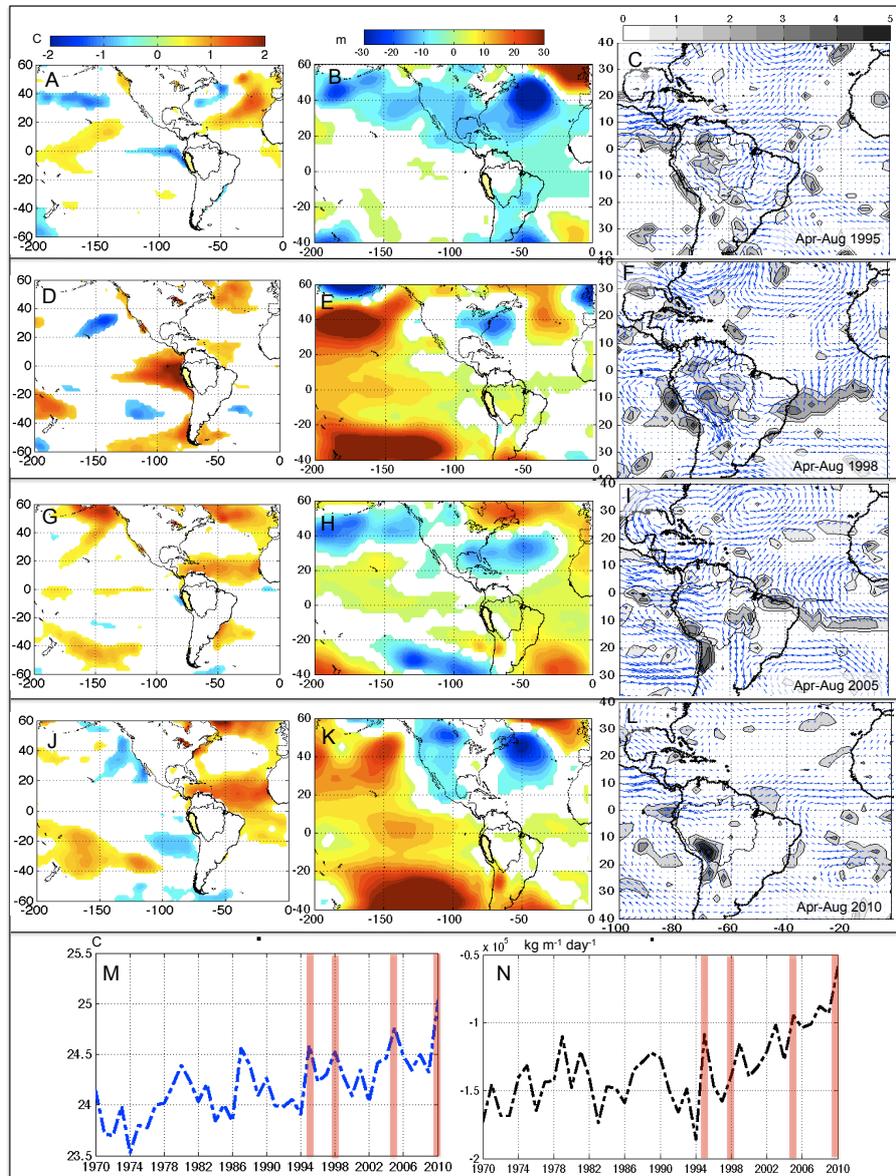


Figure 3.2. Anomalies moyennes pour la période d'avril-août de TSO (gauche), hauteur du géopotential à 850 hPa (centre) et (à droite) flux de vapeur d'eau verticalement intégré (vecteurs) et sa divergence (couleurs, en valeurs centré-réduites), en (a-c) 1995, (d-f) 1998, (g-i) 2005, et (j-l) 2010. Seules les anomalies supérieures à une fois l'écart type sont montrées (deux fois l'écart type pour les anomalies de TSO). (m) TSO moyenne pour la période avril-août dans la région 20°-60°W et 0°-30°N et (n) anomalies du flux de vapeur d'eau méridionale pour la période avril-août à 75°W et entre 0° et 15°S. La limite du bassin versant de Tamshiyacu est indiquée en jaune sur les figures de gauche et du centre. Source : Espinoza et al (2011).

3.2.- Crues extrêmes dans l'ouest du bassin amazonien

Des crues exceptionnelles caractérisent aussi les deux dernières décennies, en 1999, 2009, 2012 et 2014. Notamment, des inondations très importantes se sont produites, parfois sur l'ensemble de l'Amazonie, parfois uniquement sur certains sous-bassins (Figure 3.1). En avril 2012, la crue la plus forte observée jusqu'à ce moment s'est produite dans le Rio Amazonas au Pérou où le débit a atteint 55400 m³/s (Espinoza et al., 2013a, Annexe 9). Cette crue exceptionnelle a été attribuée au phénomène La Niña dans le Pacifique, à des processus de téléconnexion qui permettent une augmentation de la convergence des flux d'humidité à l'ouest du bassin, et, également, à une crue très intense et plus précoce que d'habitude du fleuve Marañón (tributaire du nord-ouest). Cette crue s'est produite en même temps que la crue de l'Ucayali (tributaire du sud) – alors qu'elles sont habituellement décalées d'un mois – en produisant de sévères inondations dans l'Amazonie péruvienne (Figure 3.3). Par ailleurs, des événements La Niña produisent également des anomalies positives de précipitation dans le nord-ouest du bassin amazonien, comme observé aussi dans le nord-est du bassin et dans les fleuves du bouclier guyanais, comme nous avons mis en évidence dans Labat et al. (2012).

Dans le bassin du Madeira, au sud du bassin amazonien (Figure 2.8a), des conditions pluvieuses sans précédent ont été observées au cours de l'été 2014 (décembre – mars), avec des précipitations environ 100% supérieures à la moyenne climatologique (Espinoza et al., 2014 ; Annexe 10). Ces anomalies de précipitation ont été principalement observées dans les régions de transition Andes-Amazone en Bolivie et au sud du Pérou (Figure 3.1). Les débits des rivières Madeira à Porto Velho et Beni à Rurrenabaque (Figure 2.8a) ont montré des anomalies de 74% (58 000 m³/s) et de 380% (25 000 m³/s) supérieures à la moyenne climatologique (Figure 3.4). La crue de 2014, générée dans la région de transition Andino-Amazonienne principalement dans les régions de « hotspots » de précipitation au Pérou et Bolivie), a eu de forts impacts sur l'hydrologie du cours principal de l'Amazone. Ainsi, le niveau d'eau à Manaus s'élevait à 29,47 m en juin 2014, ce qui correspond au cinquième record en 113 années d'observations dans cette station.

Alors que les inondations précédentes en Amazonie ont été liées à La Niña, les anomalies de pluie de 2014 sont associées à des conditions chaudes dans l'ouest de l'Océan Indien et à un Océan Atlantique sud subtropical exceptionnellement chaud. Ces résultats suggèrent que le gradient de la TSO de l'Atlantique sud, tropical et subtropical, est l'un des principaux facteurs du transport de l'humidité de l'Atlantique vers le sud-ouest de l'Amazone, et qu'il est devenu extrêmement intense au cours de l'été 2014 (Espinoza et al., 2014).

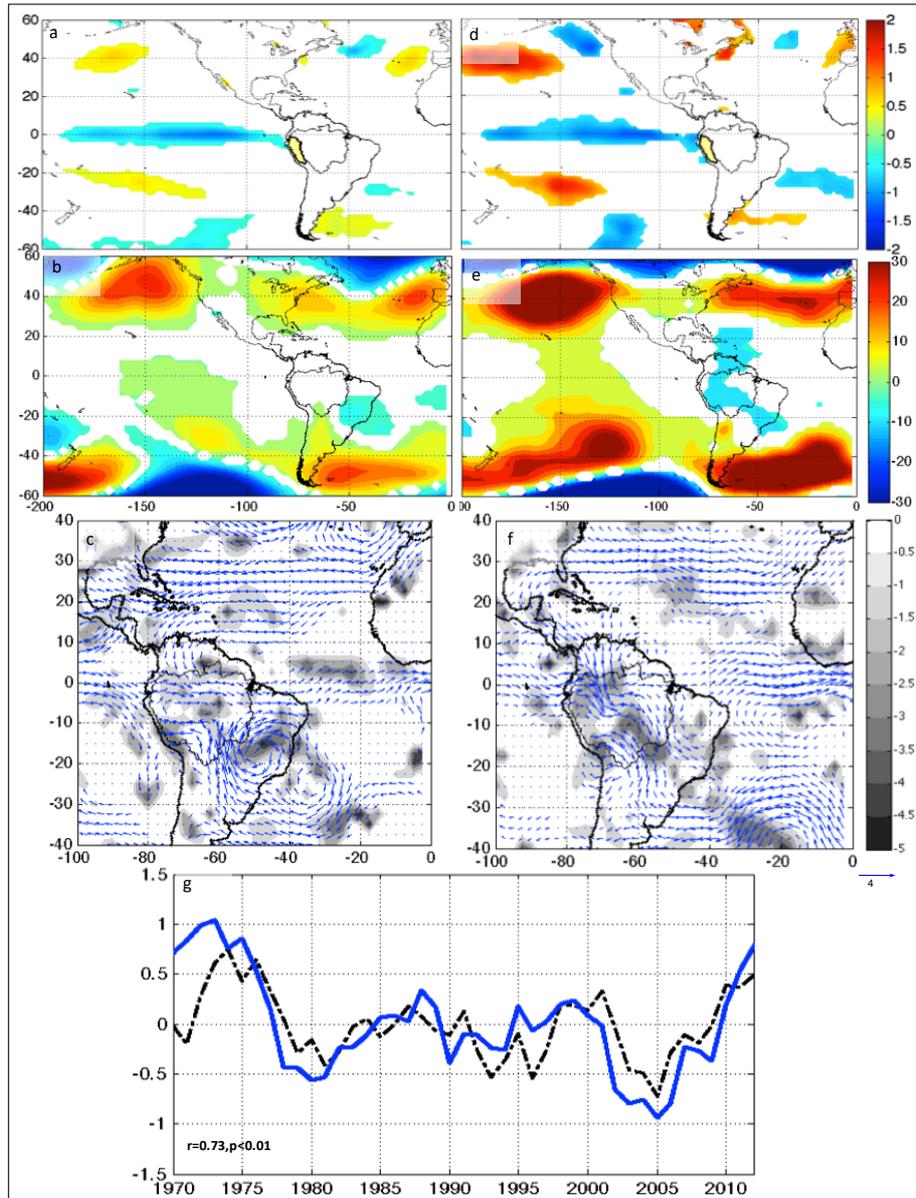


Figure 3.3. Composite des anomalies pendant la période octobre-décembre de 1985, 1992, 1998 et 2011 (précédant les années d'inondations extrêmes) de a) TSO, b) hauteur de géopotential à 850 hPa et c) flux de vapeur d'eau verticalement intégré (vecteurs) et sa convergence (couleurs, en valeurs centré-réduites). d)-f) comme en a)-c), respectivement mais pour 2011. Seules les anomalies supérieures à une fois l'écart type sont montrées (deux fois l'écart type pour les anomalies de TSO). g) moyenne mobile (4 ans) de : TSO d'octobre-décembre dans la région 4°N-4°S et 160°E-100°W (ligne noire), et débit à la station hydrométrique de Tamshiyacu (Amazonas, Pérou) de mars-avril (ligne bleu). La limite du bassin versant de Tamshiyacu est indiquée en jaune sur les figures a) et b). Source : Espinoza et al (2013a).

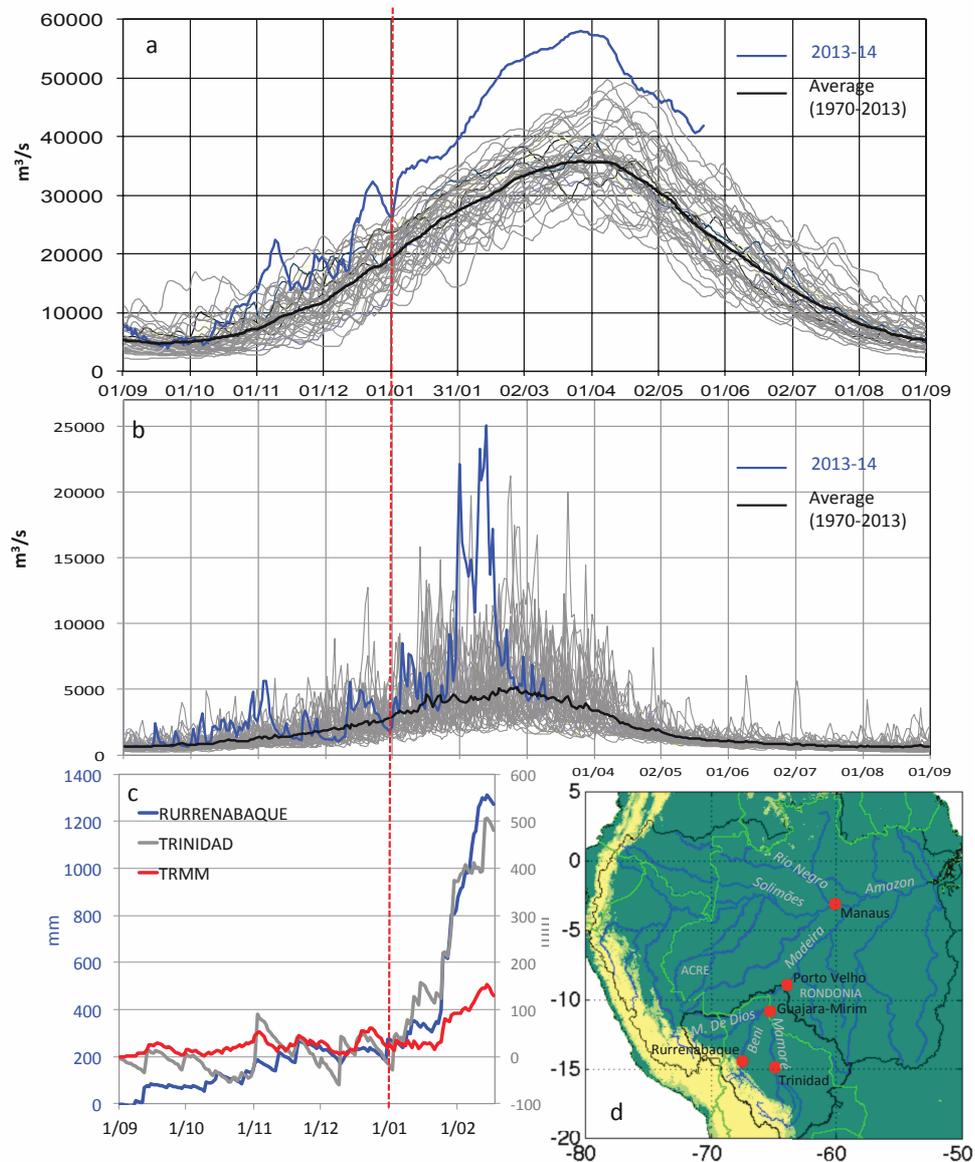


Figure 3.4. Débit journalier à a) Porto Velho et b) Rurrenabaque pendant la période 1970-2013 (lignes grises), année hydrologique moyenne (ligne noire) et débit lors de l'année hydrologique 2013-2014 (ligne bleue). c) anomalies cumulées de précipitation pendant la période 01/09/2013-17/02/2014 à Rurrenabaque (ligne bleue, axes-Y de gauche) et à Trinidad (ligne grise, axes-Y de droite) et anomalies cumulées moyennées estimées par TRMM-RT 3B42 V7 sur le bassin de Porto Velho (ligne rouge, axes-Y de droite). Les anomalies sont calculées sur la période 1950-2013 pour les stations météorologiques, et sur 2000-2013 pour TRMM. d) Emplacement des stations hydrologiques et météorologiques.

3.3. Conclusions et commentaires finaux du chapitre

Ce chapitre propose une synthèse des études sur les événements hydrologiques extrêmes en Amazonie, particulièrement à l'ouest du bassin. En considérant les séries historiques en Amazonie brésilienne (depuis le début du XX^{ème} siècle) les études précédentes ont souligné le rôle des événements El Niño et La Niña pour expliquer des étiages et des crues extrêmes, principalement avant les années 1960s (Tableau 3.1). Bien que le manque de pluie en Amazonie soit le plus souvent attribué aux événements El Niño, les derniers événements secs, les plus sévères, ont montré le rôle fondamental de la TSO de l'Atlantique tropical nord qui se réchauffe depuis les années 1970. Ces conditions produisent une diminution du transport de vapeur d'eau depuis l'Océan Atlantique vers l'ouest du bassin amazonien et une forte diminution des précipitations en Amazonie péruvienne et bolivienne.

Des crues exceptionnelles caractérisent aussi les deux dernières décennies (1999, 2009, 2012 et 2014). En Amazonie péruvienne les crues extrêmes ont été attribuées au phénomène La Niña et à une crue plus précoce qu'en temps normal du fleuve Marañón (tributaire du nord-ouest). De plus, une augmentation de l'activité convective a été constatée dans le nord-ouest du bassin amazonien depuis la fin des années 1990s (Chapitre 2) qui est intensifiée pendant les années La Niña. En Amazonie bolivienne les inondations ont été fréquemment liées à La Niña, néanmoins les anomalies des précipitations sans précédentes observées pendant l'été austral de 2014 sont associées à des conditions chaudes dans l'ouest de l'Océan Indien et à un Océan Atlantique sud subtropical exceptionnellement chaud.

Les résultats synthétisés dans cette section ont permis le développement d'un système de suivi des événements hydrologiques extrêmes en Amazonie péruvienne, mise en place en 2014 grâce à la collaboration entre l'Institut de Géophysique du Pérou (IGP), l'IRD (observatoire HYBAM) et l'Autorité de l'Eau du Pérou (ANA) avec le support financier de INNOVATE-Perú (<http://intranet.igp.gob.pe/eventos-extremos-amazonia-peruana/>). De plus, depuis 2014 je suis coauteur du supplément spécial « *State of the Climate* » publié par le journal « *Bulletins of the American Meteorological Society* » (BAMS), où des articles en « *peer review* » sont publiés avec une analyse des événements climatiques annuels les plus remarquables annuels dans les régions tropicales d'Amérique du Sud (Marengo et al., 2014 ; 2015, 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019). Ces suppléments nous donnent l'occasion de faire un suivi continu des événements extrêmes dans cette région. Même si des progrès importants ont été faits dernièrement sur l'origine de ces événements, des changements environnementaux, principalement le changement climatique et la déforestation en Amazonie, constituent un défi majeur pour anticiper le futur de l'hydrologie amazonienne, y compris le futur des événements extrêmes (cf. discuté dans la Partie II).

4.- Variabilité climatique aux échelles synoptique et intrasaisonnière

Certains événements hydro-climatiques extrêmes observés en Amazonie sont produits par des conditions atmosphériques de courte durée, typiquement d'une durée comprise entre quelques jours et quelques semaines. Depuis mon doctorat je me suis intéressé à l'étude de la circulation atmosphérique aux échelles synoptique et intrasaisonnière (<30 jours) et à sa relation avec des variables hydro-météorologiques de terrain, comme la précipitation, la température, et le niveau ou la hauteur d'eau des rivières.

4.1. Types de circulation atmosphérique et précipitations

Une première étude a permis d'identifier des situations météorologiques dominantes ou « types de circulation atmosphériques » sur le bassin amazonien (Espinoza et al 2012b, Annexe 11). Les types de circulation permettent de décrire l'état de l'atmosphère sur une aire définie et sur une durée déterminée. Les types de circulation sont amplement utilisés pour analyser les conditions météorologiques et climatiques en classifiant l'état de l'atmosphère dans des groupes avec des caractéristiques similaires et récurrentes. Une méthode neuronale, carte auto organisatrice (SOM, ou carte de Kohonen), est employée pour identifier pour la première fois dans le bassin de l'Amazonie les types de circulation caractéristiques de la circulation atmosphérique à grande échelle. Le vent dans la basse troposphère (850 hPa) issu des données de ré-analyses permet d'identifier les types de circulation. Le passage de perturbations extra tropicales dont la pénétration vers les basses latitudes est favorisée par les Andes, génère des anomalies méridiennes du vent et du géopotential, causes principales de la mise en place des types de circulation dans le bassin de l'Amazonie et de la définition de leurs trajectoires temporelles (Figure 4.1).

Dans un premier temps les types de circulation sont associés aux pluies quotidiennes dans Amazonie bolivienne et le nord-ouest du bassin, c'est-à-dire les deux régions où la variabilité hydrologique à long terme est la plus forte (Espinoza et al., 2009b, 2019a). La pluie dans le sud du bassin est liée à de fortes anomalies simultanées de vent de nord-ouest (flux de mousson autour de l'été austral) et de vent de sud (provenant des régions extratropicales) et à leur convergence sur la plaine bolivienne. Ce type de circulation se produit habituellement en présence d'anomalies négatives de géopotential centrées sur le nord-est du bassin de La Plata et d'anomalies positives à l'arrière, résultant d'une onde extratropicale (CP2 et CP3 dans la Figure 4.1). La pluie dans le nord-ouest du bassin est associée à des anomalies de vent de sud-est, faisant suite à des incursions de vent depuis les régions subtropicales, qui convergent avec les alizés de nord-est. Ce type de circulation apparaît lorsque d'importantes anomalies positives de géopotential sont centrées dans la région du Chaco et est donc consécutif aux types de circulation pluvieux dans le sud (CP4 dans la Figure 4.1).

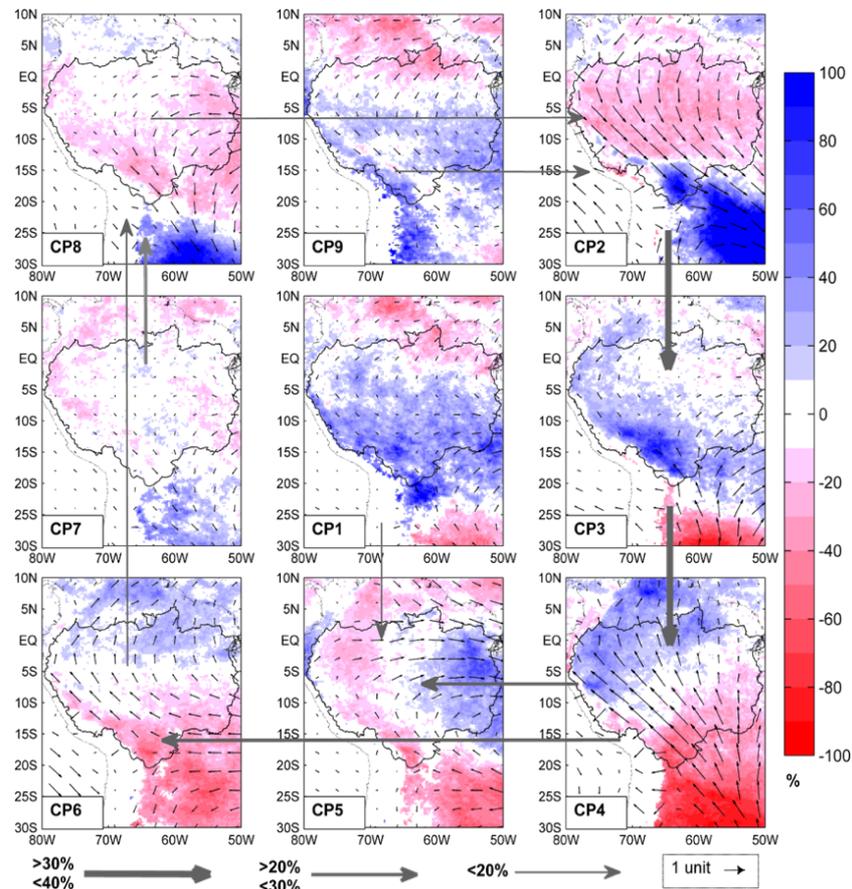


Figure 4.1. Types de circulation atmosphériques (ou « circulation patterns » - CP) et anomalies de précipitations associées (couleurs, en pourcentage) du produit TRMM 3B42 ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) pour la période 1998-2009. Les vents à 850 hPa (vecteurs) sont centrés réduits par rapport à chaque point de grille. Les flèches grises représentent la probabilité de transition d'un CP à un autre. Source : Paccini et al (2017).

Dans une deuxième étude, les types de circulation ont servi à effectuer une évaluation des données de pluies estimées par satellites pour la première fois à l'échelle intrasaisonnière dans l'ouest du bassin amazonien (Paccini et al., 2017, Annexe 12). Cette étude a permis d'identifier des anomalies de précipitation dans l'ensemble du bassin amazonien associées aux types de circulation (Figure 4.1). Par ailleurs, ce travail est notamment important pour mieux comprendre la relation entre la circulation atmosphérique et les pluies extrêmes en Amazonie péruvienne, où des estimations de précipitation à haute résolution sont évaluées (TRMM-PR 2A25 et CHIRPS). Ces résultats ont permis d'avoir une vision plus fine de la signature des précipitations associées à chaque type de circulation, ainsi que d'évaluer la capacité des types de circulation à déterminer la probabilité de précipitation extrême à l'échelle du bassin de l'Amazonas au Pérou (Figure 4.2). Cette dernière approche a permis, par ailleurs, d'établir les premières relations entre l'occurrence de certains types de circulation et des anomalies de niveaux d'eau observées en Amazonie péruvienne à Tamshiyacu. Dans Figueroa-Culqui et al. (in prep.) nous avons mis en évidence que l'occurrence des « *repiquetes* », défini comme des renversements ou inversions inattendus des niveaux d'eau pendant la période de décrue (e.g. Ronchail et al 2018 ; Figure 4.3a), est favorisée par des anomalies des vents du sud et une intensification des vents de l'est dans les basses couches de l'atmosphère (850 hPa), comme montré dans la Figure 4.3b. Ces anomalies de vents sont liées à une transition rapide des types de circulation CP2 (six jours

avant l'occurrence du repiquete) à CP4 (quatre jours avant l'occurrence du repiquete) (Figure 4.3b). Ces résultats sont particulièrement importants compte tenu des impacts sur l'agriculture locale. En effet, la période de basses eaux permet la mise en culture de vastes zones exondée et fertiles sur les berges des rivières et dans les plaines d'inondation (Ronchail et al., 2017) ; or, les repiquetes sont particulièrement néfastes lorsqu'ils se produisent juste après le semis puisqu'ils provoquent alors la perte des graines.

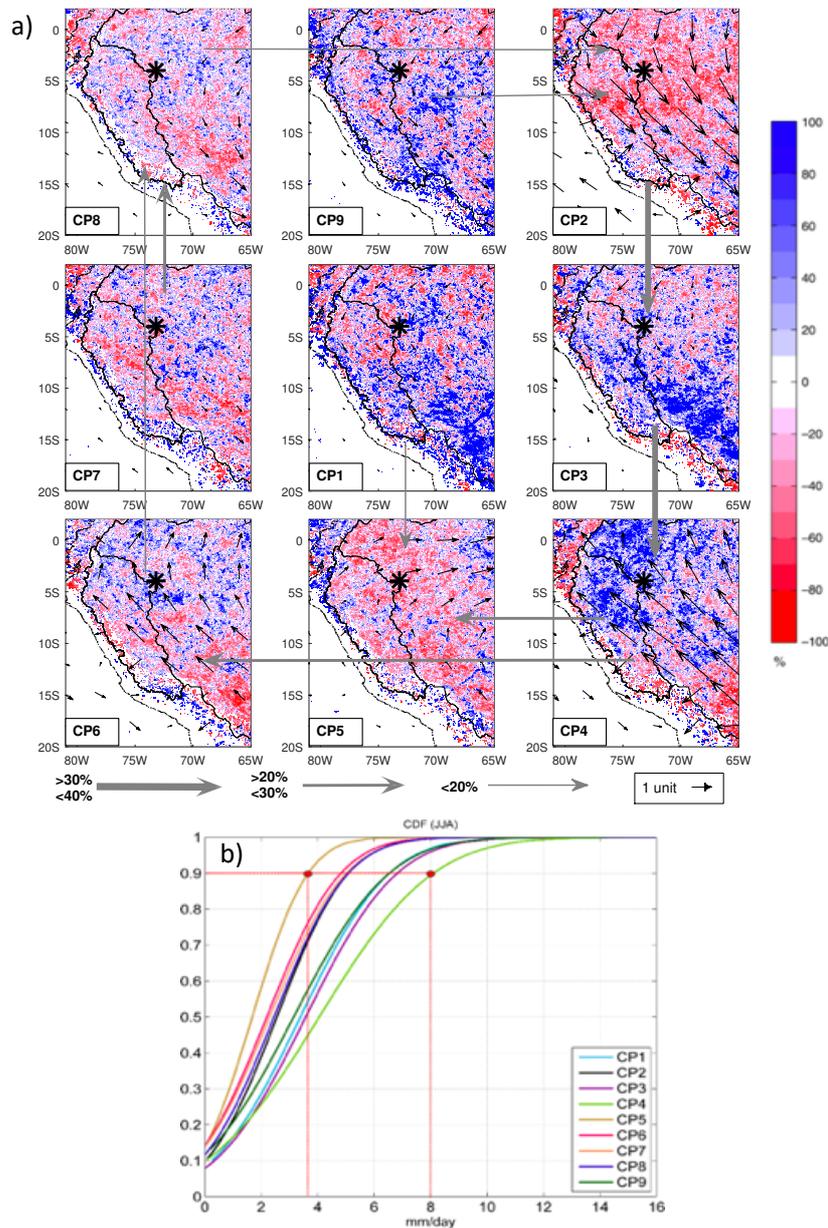


Figure 4.2. a) Types de circulation atmosphériques (ou « circulation patterns » - CP) et anomalies de précipitations associées (couleurs, en pourcentage par rapport à la précipitation climatologique de chaque point de grille) du produit TRMM-PR 2A25 ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$) sur l'ouest du bassin amazonien. Les vents à 850 hPa (vecteurs) sont centrés réduits par rapport à chaque point de grille. Les flèches grises représentent la probabilité de transition d'un CP à un autre. b) Fonction de fréquence cumulée de la précipitation moyennée dans le bassin hydrographique de Tamshiyacu (Amazonas, Pérou ; étoile noire dans a) pendant la période de juin-août (JJA). Les points rouges indiquent le percentile 90 de précipitation calculée individuellement pour les groupes de jours définis comme CP4 et CP5. Source Paccini et al (2017).

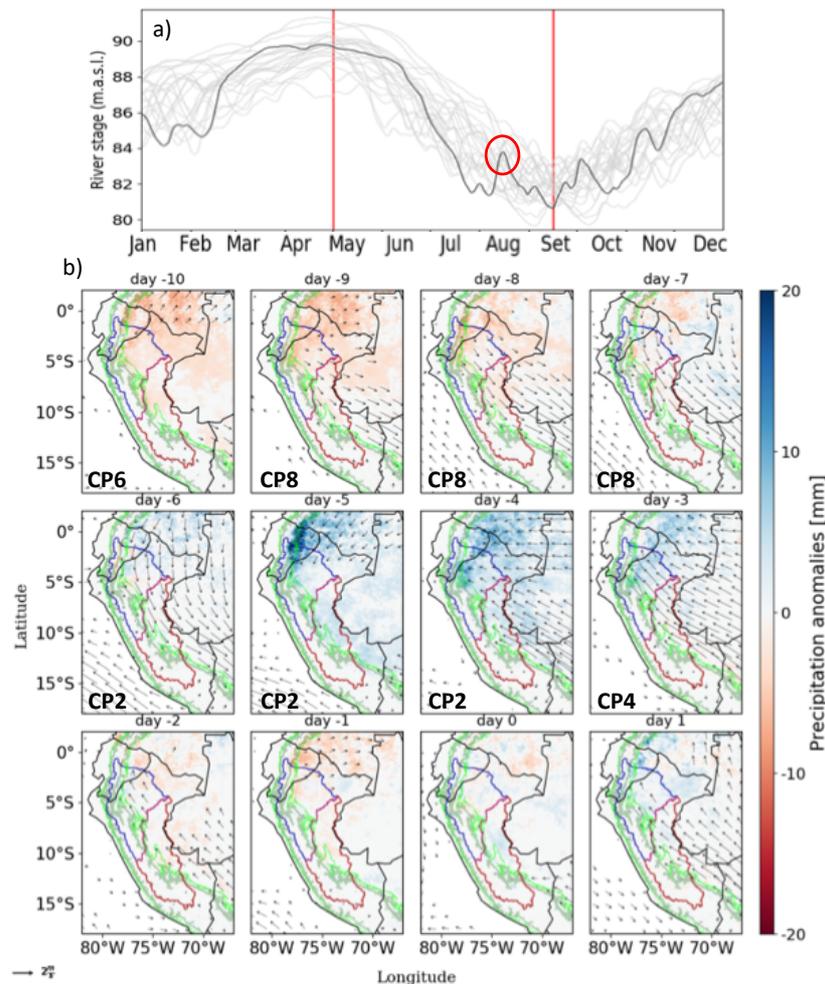


Figure 4.3. a) Cycles annuels des niveaux d'eau dans la station hydrométrique de Tamshiyacu (Amazonas, Pérou). La ligne noire correspond à 1997 et le cercle rouge indique le « repiquete » observé en août 1997. b) Composites de circulation des vents à 850 hPa (vecteurs, ERA-Interim) et des précipitations (couleurs, CHIRPS) lors de 52 cas de repiquetes identifiés à Tamshiyacu, les 12 panneaux correspondent aux 10 jours avant le début d'un épisode de repiquete, au jour du repiquete et au jour suivant. Le panneau indiqué comme « day 0 » correspond au jour où commence un épisode de repiquete. Les types de circulation (CPs) les plus probables pendant chaque jour sont indiqués (s'ils sont observés au moins 20% des jours). Les composites des vents et des précipitations sont calculées par rapport à la moyenne historique de la période juin-août (1982-2018). La ligne verte correspond à 500 m d'altitude. Les bassins versants de l'Ucayali (en rouge) et du Marañón (en bleu) sont indiqués. Source : Figueroa-Culqui (in prep.).

Nous avons également identifié dans Espinoza et al (2015 ; Annexe 2) les facteurs atmosphériques responsables de la variabilité intrasaisonnière des précipitations dans la région de « hotspots » dans la région de transition Andino-Amazonienne (stations de Quincemil et San Gabán, Figure 2.2). Des épisodes d'au moins trois jours sans pluie (très rares dans cette région) et exceptionnellement humides (plus de 60 mm/jour) sont associés à la variabilité des vents cross-équatoriaux et à des incursions de vents originaires du sud du continent (Figure 4.4). Ces résultats mettent en évidence le rôle de la connectivité entre les régions extratropicale et équatoriale en termes de circulation atmosphérique pour expliquer la variabilité intrasaisonnière des précipitations dans la région Andino-Amazonienne.

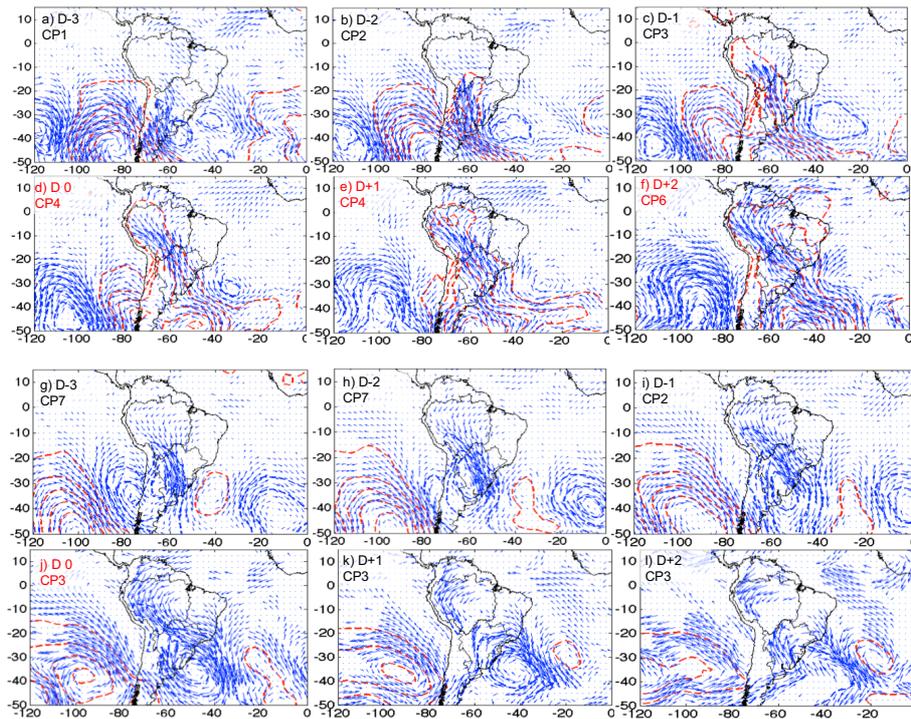


Figure 4.4. Composites d'anomalies de vents (vecteurs en m/s) et hauteur du géopotential (contours, m) à 850 hPa du jour D-3 au jour D+2 en considérant des événements secs (a-f) et humides (g-l) sur la région de Quincemil et San Gabán (voir Figure 2.2). Dans les figures a-f le D0 est défini comme le jour où commence une période sèche d'au moins trois jours consécutifs. Dans les figures g-l le jour D0 est défini comme le jour où est observée une chute de pluie supérieure au percentile 90.

4.2. Types de circulation atmosphérique et incursions de vents du sud (Friajes)

L'analyse de la circulation atmosphérique à l'échelle intrasaisonnière et, en particulier, la définition des types de circulation, nous a permis de mieux comprendre les caractéristiques spatiales et temporelles des incursions de vent froid à l'est des Andes provenant du sud du continent. Ces événements connus comme « friajes » ou « surazos » provoquent des diminutions abruptes de température en Amazonie péruvienne et bolivienne où une diminution de 10°C peut être observée en quelques heures lors d'un événement d'incursion de vent du sud (Espinoza et al., 2013b, Annexe 13). Nous documentons que 52% des friajes observés en Argentine pendant l'hiver austral se sont propagés jusqu'à l'Amazonie péruvienne avec une vitesse de vent moyenne de 20 m/s. A la différence des événements qui ne se propagent pas vers l'Amazonie péruvienne, ces incursions de vent froid sont caractérisées par l'occurrence de certains types de circulation atmosphérique associés à des anomalies positives de géopotential à 850 hPa au sud du continent, une progression des vents du sud de bas niveau vers la région tropicale, ainsi qu'une subsidence des vents dans l'atmosphère et des conditions sèches dans la moyenne et basse troposphère qui renforcent les conditions froides via des effets radiatifs (Figure 4.5).

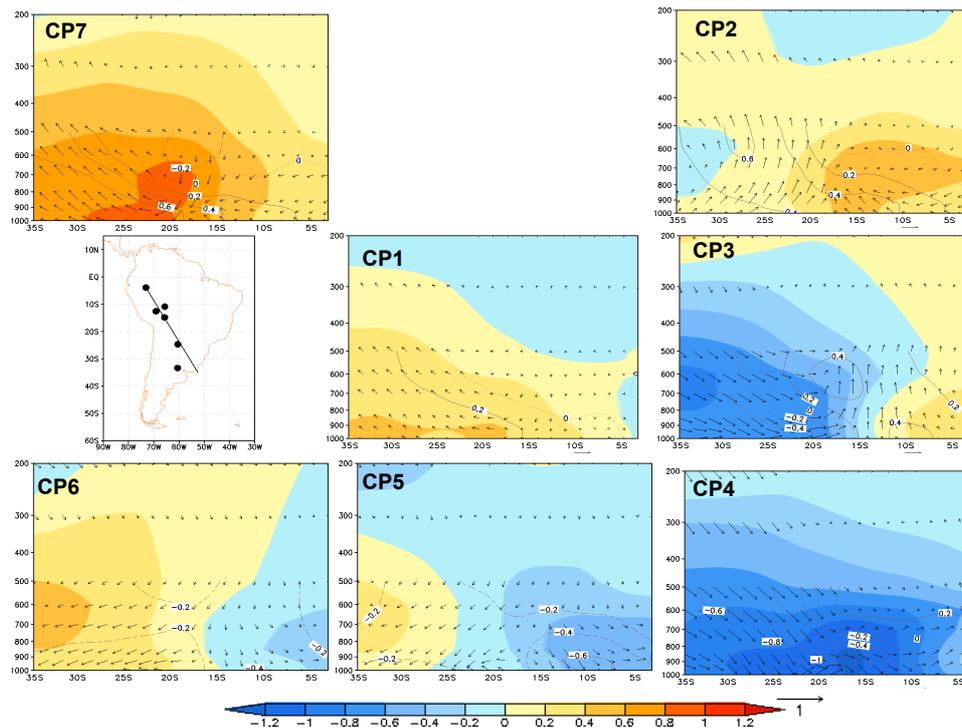


Figure 4.5. Structure verticale de l'atmosphère entre 1000 hPa et 200 hPa dans une section entre 73.25°O–3.71°S et 52.5°O–35°S (ligne noire sur la carte d'Amérique du Sud). Dans la figure on indique les anomalies de vents résultants (vecteur), les anomalies de température de l'air (couleur) et d'humidité spécifique (lignes) associées à chaque type de circulation (CP). Source : Espinoza et al (2013b).

Comme observé dans la Figure 4.5, les incursions de vents froids du sud du continent peuvent perturber l'atmosphère même à des niveaux élevés (500-400 hP), et donc modifier les conditions météorologiques dans la région andine (e.g CP2 - CP4). Dans l'article de Sicart et al. (2016 ; Annexe 14) nous avons analysé les propriétés radiatives des nuages sur le glacier du Zongo en Bolivie (16°S et 5060 masl) et leur variabilité en relation avec la circulation atmosphérique de grande échelle. Pendant la saison sèche et au début de la saison humide (JJA et SON) nous identifions que 87% et 80%, respectivement, des jours couverts par des nuages sont caractérisés par des incursions des vents de sud de bas niveau (Figure 4.6). Par contre, pendant la saison humide, uniquement 46% des jours couverts par des nuages sont associés à des incursions de vents de sud. En effet, pendant cette saison les flux de nord, associés à la mise en place de la mousson sud-américaine, jouent un rôle plus important pour expliquer la variabilité des nuages sur le glacier du Zongo. Cette étude est une des premières à déterminer les relations entre la circulation atmosphérique régionale et les propriétés radiatives au-dessus d'un glacier tropical qui contrôlent le bilan de masse des glaciers de cette région. En effet, des études précédentes se sont limitées à mettre en relation la dynamique glaciaire (donc des facteurs locaux) avec des phénomènes d'échelle globale, comme le réchauffement global ou l'ENSO, sans mettre en évidence nécessairement les mécanismes climatiques responsables de ces relations.

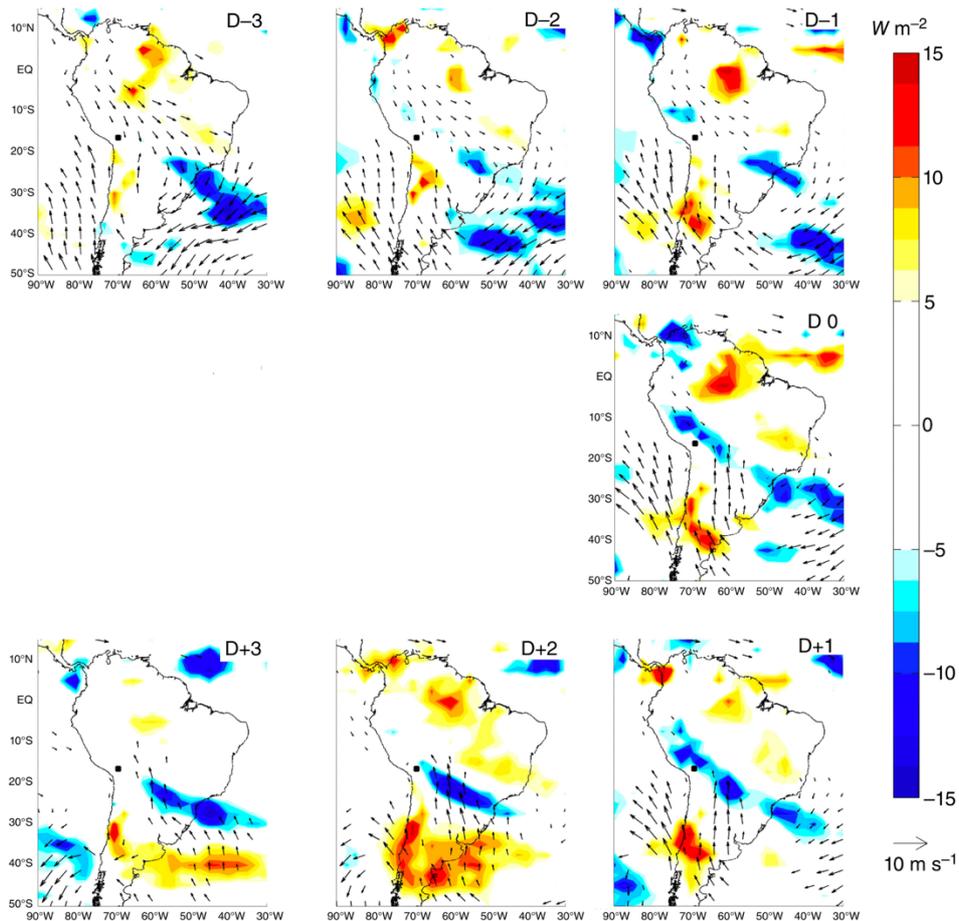


Figure 4.6. Analyse en composites de l'anomalie du vent à 850 hPa (vecteurs m/s) et d'OLR (couleurs, w/m^2) pour trois jours précédant (D-3) et les trois jours suivant (D+3) un jour ayant un fort indice de nuage ($CI > 0.75$) associé aux incursions de vents du sud sur le glacier du Zongo. Seules les anomalies qui dépassent une fois l'écart type sont indiquées. Source : Sicart et al (2016).

Dans une récente étude (Sulca et al., 2018), nous montrons que l'advection de masses d'air froid et sec depuis le sud du continent à l'est des Andes sont aussi responsables des événements froids extrêmes dans la vallée du Mantaro dans les Andes centrales du Pérou (12°S , ± 3000 masl). Les types de circulation associés à ces jours froids sont caractérisés par des anomalies positives d'OLR sur les Andes du Pérou, d'Équateur et de Colombie. Donc, des effets advectifs et radiatifs sont reconnus comme très importants pour expliquer l'occurrence des jours très froids dans cette région andine.

4.3. Rôle de l'oscillation de Madden-Julien sur les précipitations en Amazonie

Ces nouvelles connaissances sur la variabilité de la circulation atmosphérique à l'échelle intrasaisonnière m'ont permis de collaborer à des études innovatrices sur i) la modélisation du cycle journalier des pluies dans la région Andino-Amazonienne (Junquas et al., 2018) ; ii) la caractérisation de l'intensité des pluies journalière dans l'ensemble du bassin amazonien, avec des données in-situ et des estimations satellitaires (Zubieta et al., 2019) et iii) l'analyse de l'influence de l'Oscillation de Madden-Julien (MJO) dans l'ensemble du bassin amazonien (Mayta et al., 2018). Dans cette dernière étude les phases de la MJO ont été identifiées comme des mécanismes qui modulent la variabilité intrasaisonnière des précipitations dans le bassin de l'Amazone. En particulier, un déplacement des anomalies de précipitation du nord-ouest vers le sud-

est du bassin est observé en relation avec le passage des phases des indices de la MJO (Figure 4.7).

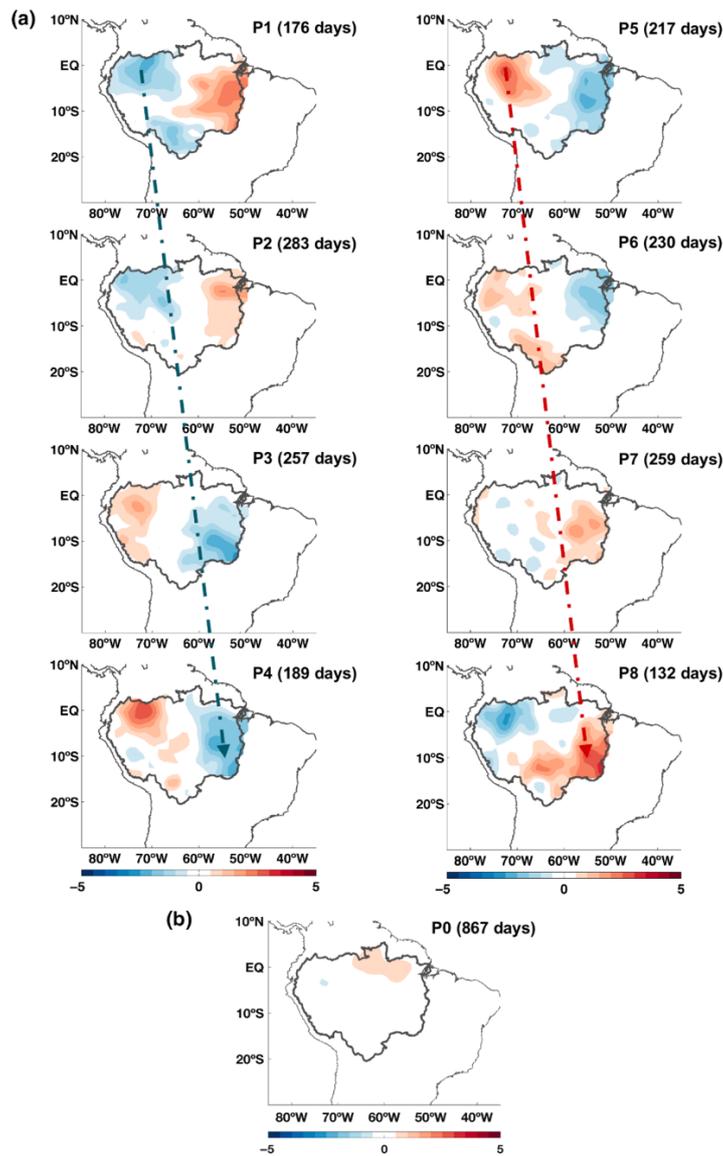


Figure 4.7. Analyse en composites des anomalies de précipitations filtrées entre 30-70 jours pendant décembre-février associées aux a) huit phases actifs et b) à la phase inactive de l'indice de MJO de Jones and Carvalho (2002). Les couleurs indiquent des anomalies positives (rouge) et négatives (bleu) de précipitation. Le nombre de jours associées à chaque phase est indiqué. Source : Mayta et al (2018).

4.4. Conclusions et commentaires finaux du chapitre

Des types de circulation atmosphériques (ou CPs) ont été identifiés pour la première fois sur le bassin amazonien. Les CPs sont définis grâce à des techniques neuronales et multivariées de classifications statistiques des vents dans la basse troposphère (850 hPa). Ils permettent d'identifier le passage de perturbations extra tropicales dont la pénétration vers les basses latitudes est favorisée par les Andes. Ces interactions de circulation entre les régions extratropicale et tropicale génèrent des anomalies méridiennes du vent et du géopotentiel qui est la cause principale de la mise en place des CPs dans le bassin de l'Amazonie et de la définition de leurs trajectoires temporelles.

La définition des CPs nous a permis de mieux comprendre la variabilité synoptique et intrasaisonnière (<30 jours) de la circulation atmosphérique régionale et sa relation avec des variables hydro-météorologiques de terrain (précipitation, température et indices de nuages), principalement à l'ouest du bassin amazonien, dans les zones de hotspot des précipitations (dans la région Andino-Amazonienne) et sur le glacier du Zongo en Bolivie. De même, la capacité des CPs à déterminer la probabilité de précipitation extrême à l'échelle du bassin de l'Amazonas au Pérou a été évaluée. Cette dernière approche a permis d'établir les premières relations entre l'occurrence de certains CPs et des anomalies de niveaux d'eau observées en Amazonie péruvienne (« repiquetes ») pendant la période de décrue.

Enfin, j'ai également collaboré à différentes études sur la variabilité atmosphérique de haute fréquence et sa relation avec la précipitation (modélisation du cycle journalier, caractérisation de l'intensité des pluies journalière et de l'influence de la MJO dans l'ensemble du bassin amazonien).

Ces études ouvrent plusieurs perspectives pour la prévision des variables hydro-météorologiques à haute fréquence. En effet, la définition des CPs et leur relation avec la pluie régionale et les niveaux d'eau, permettent d'envisager une étude de la prévision hydrologique à partir de la circulation atmosphérique à grande échelle (voir Partie II).

5.- Impacts de la variabilité climatique sur la précipitation dans les Andes tropicales

Mieux comprendre les précipitations dans les Andes tropicales est essentiel pour une meilleure gestion des ressources hydriques dans les pays andins. En effet, l'agriculture est la principale activité économique de cette région et dépend directement des précipitations et de sa variabilité. Compte tenu de la forte connexion géographique et climatique qui existe entre la cordillère des Andes et l'Amazonie, j'ai effectué ces dernières années plusieurs collaborations scientifiques avec l'objectif d'avoir une compréhension plus complète de la variabilité climatique dans le continuum Andes-Amazonie. En particulier, mes activités de ce sujet ont eu pour objectif de mieux comprendre la variabilité spatio-temporelle des précipitations à différentes échelles de temps dans la région andine, faire des diagnostics des événements de précipitation extrême dans cette région, et notamment mieux comprendre l'influence du phénomène El Niño Oscillation Austral (ENSO) sur les précipitations.

5.1. Cycle saisonnier et événements de précipitation extrême

Nous avons contribué à construire une vision générale du cycle saisonnier des précipitations dans les Andes tropicales, principalement en Bolivie, au Pérou et en Équateur (e.g. Espinoza et al., 2009a ; Segura et al., 2019). En termes de cycle annuel des précipitations, la région andine de la Bolivie et du Pérou (au sud de 8°S) est caractérisée par une saison humide entre novembre et mars, en relation avec l'établissement de la mousson sud-américaine et de la « *Bolivian High* », un centre de haute pression dans la haute troposphère (200-300 hPa), qui permet l'arrivée de flux humides d'Amazonie (e.g. Junquas et al., 2018 ; Segura et al., 2019 ; Espinoza et al., 2020). Pendant le reste de l'année les flux d'ouest sont dominants et des conditions sèches sont observées sur cette région (Figure 5.1a-d). Dans la région équatoriale des Andes (nord de 8°S) le cycle annuel de précipitation est plus complexe et différents régimes de précipitation, voire des régimes opposés, peuvent être observés à relativement courtes distances (Figure 5.1 g, h, i). Sur le flanc est des Andes équatoriales un régime de précipitation unimodal est observé, avec un pic de précipitation pendant juin-août (Figure 5.1 e-g) associé à une intensification du transport d'humidité du nord de l'Amazonie (e.g Segura et al., 2019). Par contre, dans les hautes altitudes un régime bimodal est observé avec un pic de précipitation en février-avril et un deuxième pic en octobre-novembre (Figure 5.1 g), associé à une radiation solaire plus importante pendant les deux équinoxes et aux deux passages de la zone de convergence intertropicale du Pacifique dans cette région (Espinoza et al., 2009a).

L'étude de Segura et al (2019 ; Annexe 15) propose une classification de trois zones des Andes tropicales (>3000 masl) en fonction des cycles annuels de précipitation en utilisant des données CHIRPS et de stations météorologiques et une analyse spectrale du cycle annuel de précipitation (voir équations 3 et 6 dans Segura et al., 2019). Trois régions ont été identifiées (Figure 5.1 h, i) : la région équatoriale des Andes (5°S-1°N), une région de transition (8°S-5°S) et la région des Andes tropicales du sud (20°S-8°S). Dans cette étude, l'influence de la circulation atmosphérique régionale est aussi discutée en fonction de ces trois régions caractérisées par différents cycles annuels de précipitation. Ces trois régions montrent des différences remarquables en termes de variabilité interannuelle de précipitation. Les mécanismes atmosphériques associés à des événements secs et humides sur chacune de ces trois régions sont aussi mis en

évidence dans Segura et al (2019) (Figure 5.2). En effet, les événements très humides (secs) dans les Andes équatoriales sont associées à une activité convective plus importante (plus faible) sur l'Amazonie équatoriale et une intensification (affaiblissement) des vents du Pacifique équatorial pendant février-avril (Figure 5.2 a, b). Sur la région de transition, les événements humides (secs) sont associés à un déplacement vers le sud (nord) de la zone de convergence intertropicale du Pacifique et à une intensification (affaiblissement) de la cellule de Walker, particulièrement à l'est du Pacifique pendant la saison de février-avril (Figure 5.2 c, d). Ces résultats ont fourni de nouvelles informations sur les précipitations extrêmes dans les Andes équatoriales, et notamment, ont permis de compléter les études précédentes qui ont abordé principalement la région sud des Andes tropicales, où les événements humides (secs) ont été associés à une intensification des vents de l'est (Figure 5.2 e, f) en relation à un renforcement du « Bolivian High ».

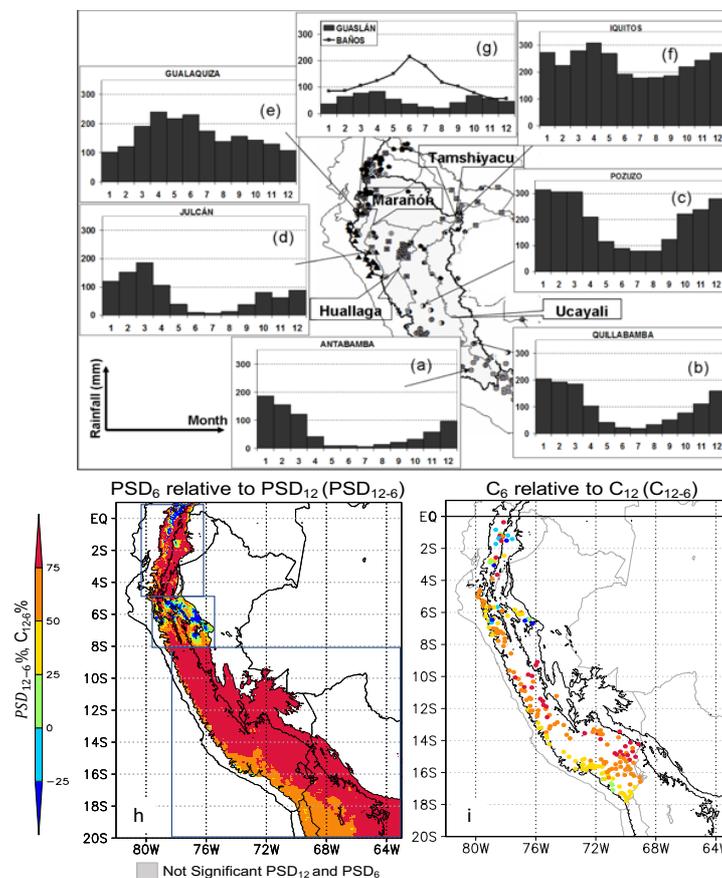


Figure 5.1. a-g) Cycle annuel des précipitations de huit stations météorologiques du Pérou et d'Équateur en considérant l'année calendaire de janvier (1) à décembre (12). Source : Espinoza et al (2009a). h) Différence relative entre PSD₁₂ (cycle annuel) et PSD₆ (cycle semi-annuel ; couleurs) issues d'une analyse spectrale du cycle annuel de précipitation pour mesurer l'influence relative de chaque cycle. i) différence relative entre l'harmonique de 12 mois et l'harmonique de 6 mois (C₁₂-C₆) de 206 stations météorologiques du Pérou et d'Équateur. Source de h) et i) : Segura et al. (2019).

Cependant dans une étude récente (Segura et al 2020. Annexe 16), nous avons mis en évidence que l'influence des vents de la haute troposphère associés à la position du « Bolivian high » sont plus faiblement reliés aux pluies sur l'Altiplano depuis le début des années 2000. Un nouveau mécanisme explicatif est proposé dans cette étude. En effet, l'augmentation de l'activité convective depuis la fin des années 1990s dans le nord-ouest de l'Amazonie (Figure 2.4 ; Espinoza et al., 2019a), qui se propage plus vers le sud

pendant l'été austral (en relation aux flux de Mousson) permet l'advection d'humidité depuis les bas niveaux vers la moyenne et haute troposphère (Figure 5.3). Ce mécanisme est significativement relié à la variabilité des précipitations dans les Andes centrales. Par conséquent, deux mécanismes atmosphériques sont aujourd'hui associés à la variabilité interannuelle des précipitations dans cette région, d'une part l'intensité des vents d'est dans la haute troposphère et, d'autre part la convection à l'ouest de l'Amazonie (Figure 5.3). Néanmoins, du fait de l'intensification de la convection en Amazonie le deuxième mécanisme joue un rôle explicatif plus important au XXI^{ème} Siècle (Segura et al, 2020).

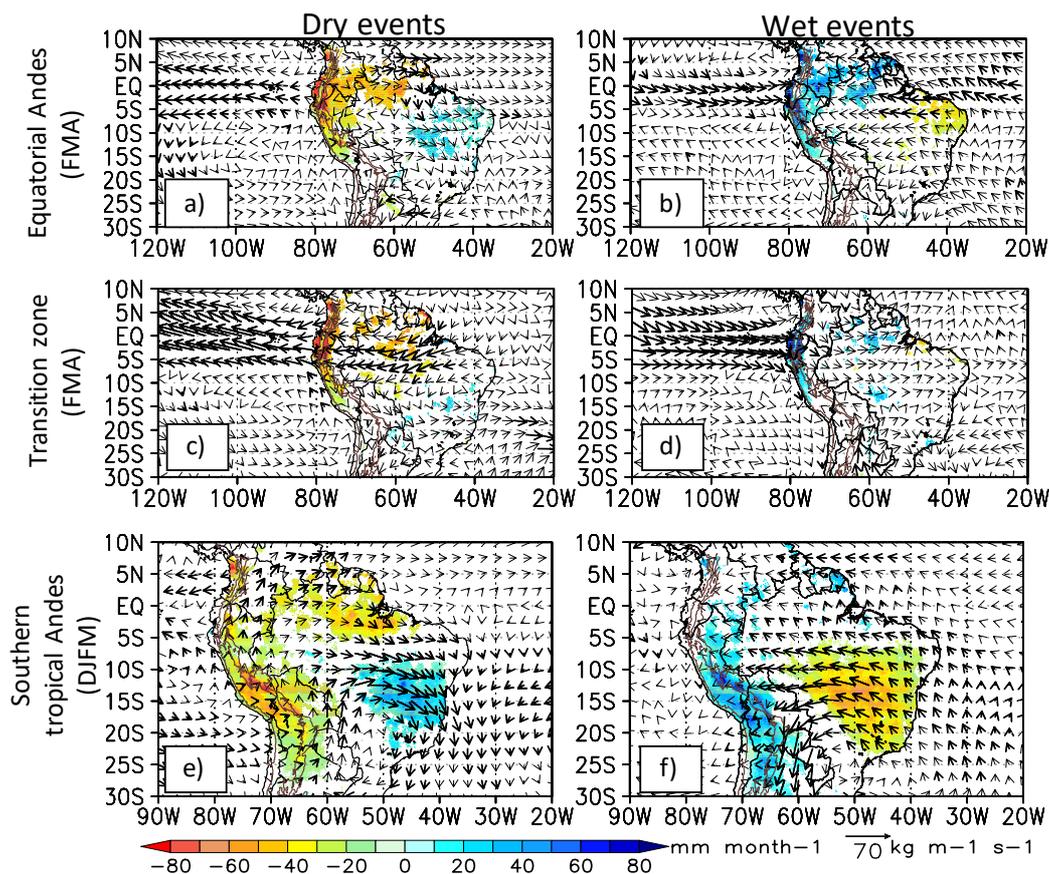


Figure 5.2. Analyse en composites des précipitation (CHIRPS) et flux d'humidité intégré verticalement (ERA-Interim) des événements secs (a) et humides (b) dans la région équatoriale des Andes pendant la période février-avril. c-d) et e)-f) comme a) et b) mais pour la région de transition et le sud des Andes tropicales, respectivement. Pour e) et f) la saison analysée correspond à décembre-mai. Seules les valeurs significatives ($p < 0.05$) sont montrées en couleur et les vecteurs significatifs sont indiqués en gras. Source : Segura et al. (2019).

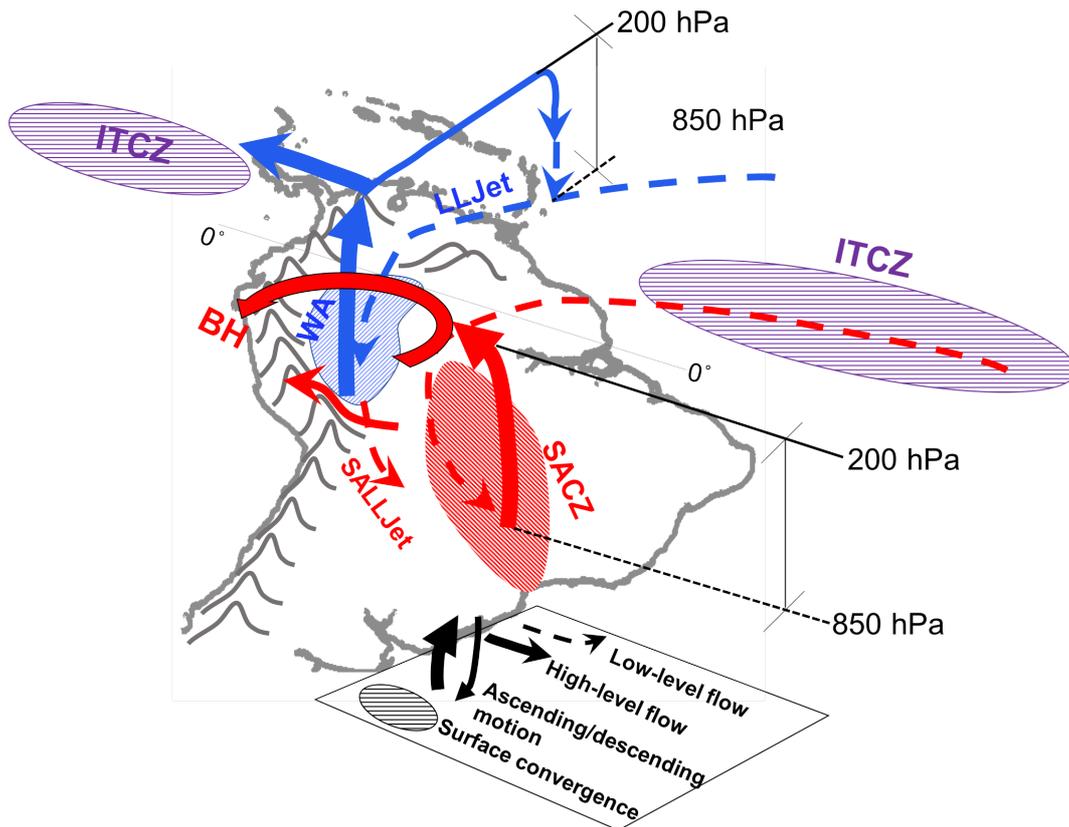


Figure 5.3. Schéma de l'influence des vents de la haute troposphère associés à la position de la « Bolivian High » (rouge) et de la convection dans l'ouest d'Amazonie (bleu) sur la variabilité interannuelle des précipitations dans les Andes centrales. BH : Bolivian High, SACZ : South Atlantic Convergence Zone, ITCZ : Zone de Convergence Inter-tropicale, WA : Convection dans le nord-ouest du bassin amazonien, SALLJet : South American Low-Level Jet, LLJet : Llanos Low-Level Jet. (Adapté de Segura et al 2020).

5.2. Influence de différents types d'El Niño/La Niña sur la précipitation dans les Andes

Dans cette région certains événements extrêmes à l'échelle interannuelle sont observés lors des événements El Niño ou La Niña. Ces événements ont été à l'origine de fortes inondations sur la côte Pacifique du Pérou et d'Équateur (eg. El Niño de 1983 et 1998) et en Amazonie (e.g. La Niña en 1999 et 2012), mais aussi de fortes sécheresses ont été observées dans les Andes et l'Altiplano, par exemple lors des événements El Niño de 1983 et 1992. Certains de ces événements ont produit des pertes économiques et humaines considérables. Par exemple, pendant El Niño de 1998, au Pérou les pertes économiques ont été estimées à 1 000 millions de dollars américains, suite à des inondations au nord du pays (800 millions de dollars) et à des sécheresses dans les Andes du sud du pays (200 millions de dollars). Pendant les dernières années, et notamment après la définition des différents « types » d'El Niño (e.g. El Niño Modoki ou type central, El Niño canonique ou type est, El Niño côtier), les études sur les impacts d'El Niño sur l'ouest de l'Amérique du Sud ont été particulièrement demandées à la communauté scientifique par les décideurs. Dans ce contexte, nous avons conduit les premières études qui ont permis de mieux distinguer les impacts des anomalies de TSO du Pacifique équatorial central (El Niño central ou Modoki) de ceux du Pacifique équatoriale est (El Niño canonique).

Dans un premier temps, dans Lavado-Casimiro and Espinoza (2014) nous avons mis en évidence le rôle des indices d'El Niño Central (C) et El Niño est (E), qui synthétisent la

variabilité de la TSO du centre et de l'est du Pacifique équatorial, respectivement, sur les précipitations au Pérou, pour la période 1965-2017. Nous avons montré que la région andine et l'Amazonie péruvienne sont caractérisées par des anomalies négatives (positives) de précipitation pendant les événements El Niño (La Niña) Central ; cependant la région côtière du nord du Pérou est caractérisée par des pluies exceptionnelles pendant les événements El Niño est (Figure 5.4). Ces résultats montrent que certains bassins versants de la côte nord du Pérou peuvent présenter des conditions d'inondations extrêmes lors d'événements El Niño du type est (à cause de fortes pluies dans la région côtière), mais aussi pendant des événements La Niña du type Central (à cause de fortes pluies sur les têtes de bassins dans la région andine). Ces résultats ont été fortement repris par la communauté scientifique péruvienne (e.g. dans le cadre de l'ENFEN - <http://enfen.gob.pe>) lors des événements El Niño Central de 2016 et El Niño côtier de 2017.

Suite à ces résultats, dans l'article Sulca et al (2017) nous avons mis en évidence les mécanismes de la circulation atmosphériques qui permettent d'expliquer les anomalies de précipitation associée aux différents types de El Niño ; en particulier à ceux associées à El Niño Central, qui permet de compléter les études précédentes centrées sur les mécanismes climatiques associés à El Niño sur la côte nord du Pérou. En effet, pendant El Niño (La Niña) Central la diminution (augmentation) de la précipitation sur la région andine est associée à un affaiblissement (renforcement) des vents de l'est à 200 hPa sur le territoire péruvien, particulièrement sur la partie centrale et sud, mécanisme qui empêche (favorise) l'arrivée des vents humides depuis l'Amazonie.

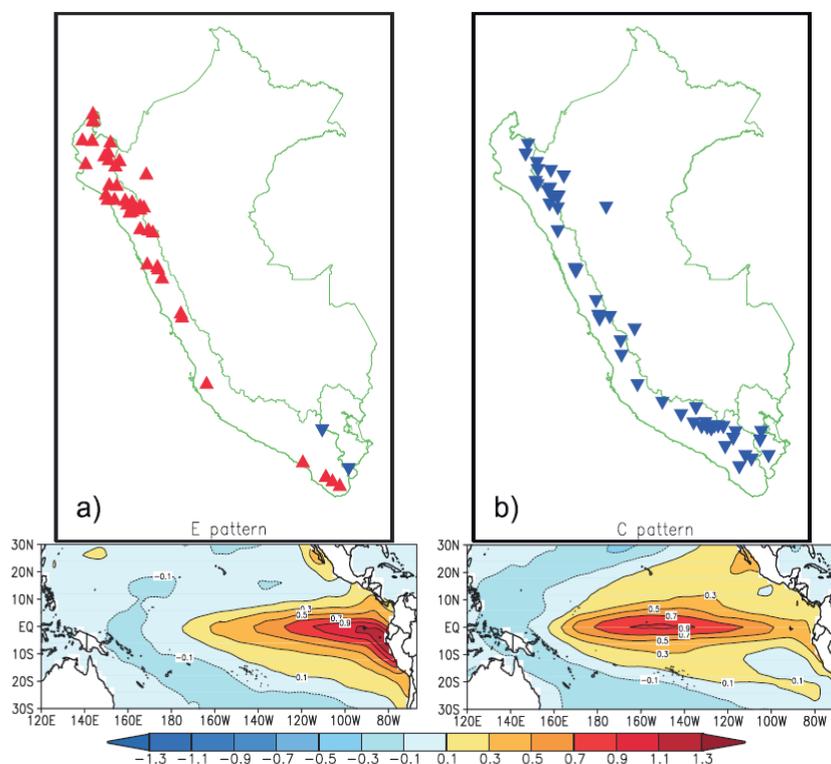


Figure 5.4. Corrélation de Pearson entre les pluies annuelles et les valeurs annuelles de : a) Indice Niño E et b) Indice Niño C. Les triangles rouges (bleus) représentent des corrélations positives (négatives). Les patterns d'anomalies de température de surface de l'Océan Pacifique associés à une valeur unitaire de

l'Indice E et C (cf. Takahashi et al., 2011) sont montrés en bas à gauche et à droite, respectivement. Adapté de Lavado-Casimiro et Espinoza (2014).

Traditionnellement, l'occurrence des événements El Niño a été considérée au Pérou comme l'un des principaux responsables des processus d'origine hydro-géomorphologiques (POHG), comme des glissements de terrain, 'huaycos', inondations, etc. Les POHG ont produit d'énormes pertes socio-économiques au Pérou. Entre 1970 et 2006 ils ont produit la mort de 5146 personnes, d'après les estimations de la « Comunidad Andina des Nations - CAN ». Dans l'étude de Rodriguez-Morata et al (2018) nous avons analysé le rôle des différents types d'El Niño sur les POHG à l'échelle du Pérou. Les résultats ont montré que lors des événements El Niño est, les POHG sont particulièrement observés dans la région côtière nord du Pérou, néanmoins, 36% de l'ensemble des POHG observés au niveau national ne sont pas attribués à des événements El Niño, et 25% sont observés pendant les événements La Niña (principalement sur la région andine et amazonienne). Ces résultats ont été très importants pour mettre en évidence le rôle des différents impacts de l'ENSO sur l'ensemble du territoire péruvien, qui ne se limitent pas aux fortes inondations dans la côte nord du pays pendant El Niño.

5.3. Variabilité hydro-climatique décennale et à long-terme

Les résultats de Lavado-Casimiro et Espinoza (2014) et Sulca et al (2017) ont montré que les précipitations des Andes du sud du Pérou diminuent pendant les événements El Niño Central. Cependant, tous les événements El Niño Central n'ont pas pour conséquences des sécheresses extrêmes, ce qui suggère le rôle d'autres processus pouvant influencer la variabilité du climat dans cette région. Alors que la majorité des études ont analysé principalement la variabilité des précipitations à une échelle interannuelle, peu d'efforts ont été dédiés à la compréhension de la variabilité à des échelles de temps décennale à inter-décennale dans la région andine, entre autres, à cause du manque de séries météorologiques longues dans cette région.

Dans l'étude de Segura et al. (2016 ; Annexe 17), nous avons mis en évidence pour la première fois une variabilité hydroclimatique décennale dominante dans les Andes centrales (y compris l'Altiplano du Pérou et de Bolivie) pendant la période 1956-2013 (Figure 5.5). Dans cette étude, nous avons analysé la variabilité des précipitations dans les Andes centrales en utilisant des données hydrologiques comme proxys des précipitations. Les données utilisées sont issues de stations in-situ de la côte du sud du Pérou, de l'Altiplano et de l'Amazonie (stations situées entre 50 m et 3800 m d'altitude ; Figure 5.5). Des périodes humides et sèches ont été identifiées pour des périodes allant de 8 à 20 ans. Cette variabilité est associée aux changements de température de la mer dans la zone centre-ouest de l'Océan Pacifique et du vent zonal d'altitude à 200hPa au-dessus des Andes centrales. Ces résultats suggèrent que l'intensité des impacts hydrologiques dans les Andes centrales durant les événements El Niño est influencée par la variabilité basse fréquence documentée pour la première fois dans cette étude. Par exemple, l'évènement El Niño de 1983 a coïncidé avec des valeurs négatives de la variabilité décennale des précipitations, produisant ainsi une sécheresse extraordinaire dans la région de l'Altiplano. En revanche, pendant l'évènement El Niño extraordinaire de 1998, la sécheresse dans l'Altiplano n'a pas eu d'impacts comparables à ceux de 1983 ; cela s'explique par des valeurs positives de la variabilité hydroclimatique décennale (Figure 5.5). Au contraire, en 1992, durant des conditions très négatives de la

variabilité décennale, un évènement El Niño modéré a causé une sécheresse très marquée dans les Andes centrales.

Ces résultats sont particulièrement importants pour la compréhension de la variabilité des précipitations dans les Andes centrales et la prévisibilité d'évènements extrêmes. En effet, alors qu'El Niño joue un rôle clé dans la modulation de la variabilité des précipitations à échelle interannuelle, les précipitations dans les Andes centrales présentent une variabilité décennale dominante, qui ne répond pas nécessairement à El Niño.

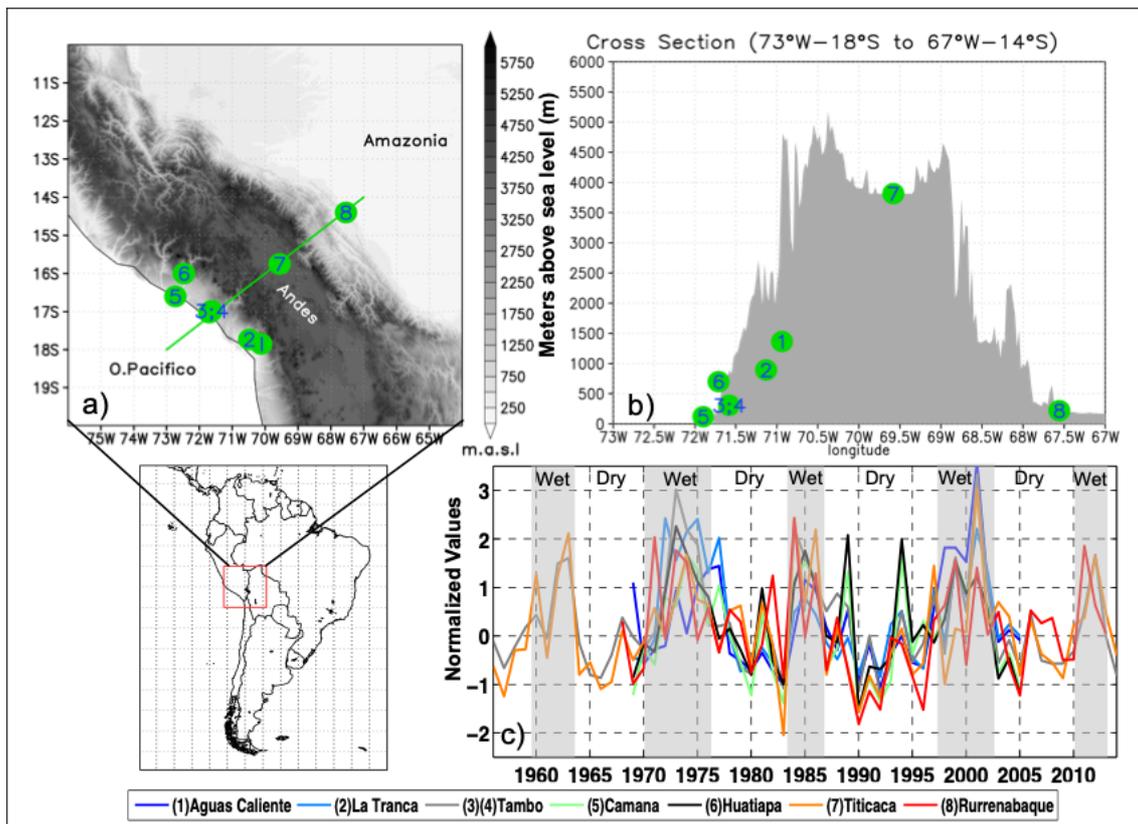


Figure 5.5. a) et b) Andes centrales et stations hydrologiques analysées : 1) Aguas Calientes, 2) La Tranca, 3) La Pascana, 4) Santa Rosa, 5) Camaná, 6) Huatiapa, 7) Titicaca, 8) Rurrenabaque. c) Séries temporelles centrées et réduites des stations montrées en a) et b) pendant la période 1953-2013 avec l'alternance de périodes humides (wet) et sèches (dry). Adapté de Segura et al. (2016).

Au-delà de la forte variabilité interannuelle des précipitations décrites dans les études précédentes, la région andine montre aussi un réchauffement progressif depuis les dernières décennies. J'ai participé à des études qui ont permis de mieux comprendre l'évolution de la température au Pérou en utilisant des données météorologiques historiques pour mesurer la température de l'air, mais aussi en utilisant des données de satellites pour estimer la température de la surface du sol. Dans l'étude Lavado-Casimiro et al. (2013) nous estimons que les régions andine et amazonienne du Pérou sont caractérisées par un réchauffement de 0.09°C par décennie pendant la période 1965-2007, particulièrement clair dans les stations météorologiques de la région andine. Plus récemment, dans l'article Aguilar-Lome et al. (2019), grâce à l'utilisation des données MODIS, nous avons montré une tendance positive de la température de surface du sol pendant la journée dans la région andine (entre 7°S et 20°S) et pendant la période 2000-2017 (Figure 5.6a). Ce réchauffement est plus important pendant les mois d'hiver austral

et augmente directement avec l'altitude (Figure 5.6b). En effet, pendant les mois d'hiver la région andine du Pérou en-dessous de 1500 m d'altitude se réchauffe de 0.5°C par décennie, mais à des altitudes plus élevées (> 5000 m) la température de la surface augmente de 1.7°C par décennie (Figure 5.6b).

Le réchauffement observé dans les Andes est un risque additionnel pour les activités économiques de la région, fortement liées à l'agriculture et au tourisme de haute montagne. En effet ces deux activités sont fortement liées aux ressources associées aux glaciers et aux écosystèmes de haute montagne.

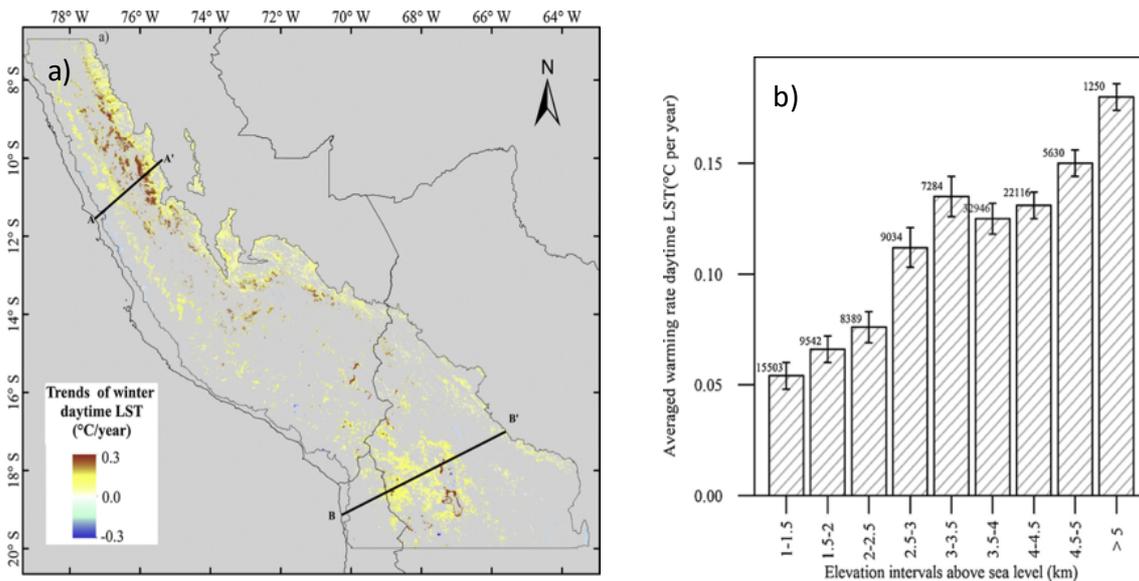


Figure 5.6. a) distribution spatiale de la tendance de température de surface pendant la journée ($^{\circ}\text{C}/\text{année}$) pendant l'hiver austral (juin-août) et pour la période 2000-2017 (données MODIS). Seules les valeurs significatives à 95% sont indiquées. b) Tendance moyenne de la température de surface des journées d'hiver par intervalles altitudinaux de 500 m dans les Andes tropicales (7°S - 20°S). Les chiffres surmontant chaque barre correspondent au nombre de pixels MODIS présents dans chaque intervalle d'altitude. Source : Aguilar-Lome et al. (2019).

5.4. Conclusions et commentaires finaux du chapitre

Ces résultats nous ont permis de mieux comprendre la variabilité spatio-temporelle des précipitations à différentes échelles de temps dans la région andine tropicale, et notamment, d'avoir une compréhension plus complète de la variabilité climatique dans le continuum Andes-Amazone. L'article « review » Espinoza et al (2020) fait une synthèse de principaux caractéristiques climatiques des Andes y compris la connectivité entre les Andes et l'Amazonie.

Dans un premier temps, nos résultats ont contribué à construire un aperçu intégral du cycle saisonnier des précipitations dans les Andes tropicales et l'ouest du bassin amazonien. Dans la région sud des Andes tropicales, nous avons proposé un nouveau mécanisme explicatif de la variabilité interannuelle des précipitations lié à l'intensification de la convection à l'ouest de l'Amazonie (discuté dans le Chapitre 2). Ce mécanisme soulève des questions importantes, notamment sur l'influence des changements d'occupation du sol en Amazonie sur le régime des précipitations dans les Andes (voir Partie III).

Différentes études nous ont permis de mettre en évidence, pour la première fois, le rôle des indices d'El Niño central (C) et El Niño Est (E), qui synthétisent la variabilité de la TSO

au centre et à l'est du Pacifique équatorial, respectivement, sur les précipitations au Pérou. Ces résultats ont été fortement repris par la communauté scientifique péruvienne. À une plus basse fréquence, nous avons mis en évidence pour la première fois une variabilité hydroclimatique décennale dominante sur l'Altiplano pendant la période 1956-2013, liée aux changements de TSO dans la zone centre-ouest de l'Océan Pacifique. Ces résultats suggèrent que l'intensité des impacts hydrologiques sur l'Altiplano durant les événements El Niño est influencée par d'autres mécanismes, pas forcements liés à l'ENSO, comme la variabilité de basse fréquence et l'influence de la convection à l'ouest de l'Amazonie.

Enfin, la région andine montre aussi un réchauffement progressif depuis les dernières décennies (0.09°C par décennie). De plus, pendant les mois d'hiver la surface de la région andine du Pérou en-dessous de 1500 m d'altitude se réchauffe de 0.5°C par décennie, mais à des altitudes plus élevées (> 5000 m) la température de la surface augmente de 1.7°C par décennie. Même si le réchauffement global expliquerait partiellement ces tendances, le rôle des facteurs plus locaux sur ces tendances, et notamment les changements d'occupation du sol, sont encore mal connus et méritent d'être explorés.

6.- Collaborations en paléoclimatologie et en hydrosédimentologie

Depuis le début de mes études de master en 2004 j'ai eu l'opportunité de travailler auprès de chercheurs spécialistes du transport de sédiment et du transfert de matières des Andes vers l'Atlantique, notamment dans le cadre de l'observatoire HYBAM, et aussi auprès de chercheurs en paléoclimatologie, notamment dans le cadre du LMI-PALEOTRACES. Ces implications, me permettent à la fois d'y apporter mon expertise sur la variabilité climatique et hydrologique de la région andine et amazonienne mais aussi de dépasser le cadre de mon propre champs disciplinaire, d'élargir ma culture scientifique et de mesurer les implications de mes recherches en climatologie sur d'autres problématiques des géosciences. Lors de mon retour au Pérou en 2011 j'ai pu contribuer à ces deux thématiques, particulièrement en apportant ma connaissance sur la variabilité climatique et hydrologique de la région andine et amazonienne. Comme résultats de ces collaborations différentes études ont été publiées et d'autres sont en cours d'achèvement. De plus, une édition spéciale suite à la réunion de l'Observatoire HYBAM en 2015, a été publiée (Moreira-Turcq et al., 2018) dans le journal CRAS-Géoscience qui nous a permis de faire un bilan sur les études des impacts du changement global sur la zone critique dans la région Ando-Amazonienne. J'ai participé en tant qu'éditeur de cette édition spéciale.

6.1.- Contributions en paléoclimatologie

Grâce à des enregistrements de $\delta^{18}\text{O}$ obtenues dans des spéléothèmes prélevés au Pérou et en Bolivie (dans le cadre des activités conduites par mon collègue James Apaéstegui à l'IGP), nous avons décrit l'évolution de certains éléments de la circulation atmosphérique lors des 1600 dernières années. Dans une première étude (Apaéstegui et al., 2014) nous interprétons les variations du $\delta^{18}\text{O}$ dans un spéléothème prélevés dans le nord de la région de transition Andino-Amazonienne du Pérou (grotte de Palestina), comme un indicateur de l'intensité de la Mousson Sud-américaine. Deux périodes de changement de l'état climatique moyen sont mises en évidence en relation avec l'Anomalie Climatique Médiévale (MCA) et le Petit Âge de Glace (LIA). Une augmentation et une diminution de l'intensité de la mousson sont respectivement observées pendant ces événements. De plus, dans cette étude nous montrons que des fluctuations multidécennales (± 65 ans), correspondant à des périodes sèches de la MCA, pourraient être modulées par des variations de l'Oscillation Multidécennale de l'Atlantique (AMO). Au contraire, pendant le LIA l'influence de l'AMO n'est pas identifiée. Dans une deuxième étude (Apaéstegui et al., 2018) les variations du $\delta^{18}\text{O}$ dans un spéléothème obtenu dans les Andes de Bolivie montrent deux périodes avec une intensification de l'activité convective qui correspond à la MCA et au LIA. Dans cette étude nous développons l'hypothèse de l'influence d'un déplacement vers le sud de l'ITCZ pendant le LIA, qui permet plus d'advection d'humidité depuis l'océan Atlantique vers le continent. Ce mécanisme est aussi identifié dans le climat actuel pendant certains événements d'inondation dans l'Amazonie bolivienne, comme ceux liés à La Niña (e.g. Molina-Carpio et al., 2017). D'autre part, pendant la MCA, l'augmentation de l'activité convective serait associée à une plus importante advection d'humidité depuis l'Atlantique tropical sud, comme on l'a observé pendant certains événements très humides en Amazonie bolivienne, par exemple pendant l'inondation historique de 2014 (Espinoza et al 2014 ; Annexe 10).

Dans la région andine et amazonienne, où les enregistrements instrumentaux sont limités dans le temps et l'espace, les études de paléoclimatologie m'ont permis situer les résultats concernant le climat récent dans un contexte de variabilité à plus long terme. Néanmoins, les outils employés dans ces études sont aussi très différents et l'analyse des incertitudes est très importante. C'est bien pour cela que la collaboration entre climatologues et paléoclimatologues est particulièrement nécessaire et pertinente.

6.2.- Contributions aux études de transport de sédiment

Le climat a un rôle fondamental dans le contrôle des flux d'érosion (particulaires) et d'altération (dissous) des continents. Comprendre la relation entre les variables climatiques, notamment la précipitation, et les processus d'érosion, d'altération et de transport de matière reste un défi important à résoudre dans la région andine et amazonienne. Dans le cadre de l'observatoire HYBAM, beaucoup d'efforts ont été déployés sur ce sujet et j'ai pu contribuer à certaines études. Dans Espinoza et al (2012) (Annexe 11), nous étudions l'année hydrologique 2010-2011 dans la rivière Amazonas-Solimões au Pérou, caractérisée par une transition exceptionnelle d'un étiage sans précédent (septembre 2010) à un niveau de fleuve très élevé (avril 2011), lié à de fortes précipitations pendant l'été austral. Ces fortes précipitations, qui arrivent après la sécheresse la plus marquée en Amazonie péruvienne, produisent des valeurs de concentration de sédiment en suspension exceptionnelles en février 2011. Ces résultats suggèrent que la concentration des sédiments en suspension dans le bassin du Solimões (qui contribue à hauteur de 50% à la charge sédimentaire de l'Amazone), pourrait être influencée non seulement par la quantité de précipitation, mais aussi par les conditions initiales d'humidité du sol. Dans cette région, un récent article (Espinoza-Villar et al., 2018) a montré la capacité de l'information des images satellitaires (MODIS) à évaluer la variabilité spatio-temporelle du transport de sédiments sur 2500 km de fleuve, entre Tamshiyacu (Pérou) et Manacapuru (Brésil). Dans ces stations, cette technique estime à 521 et 825 Mt/an le flux de sédiments, respectivement, avec une erreur moyenne de 27% par rapport aux mesures in-situ. Grâce à ces informations provenant des satellites, plus denses spatialement, l'étude permet de montrer le rôle des précipitations de la région nord du bassin, importantes pendant l'hiver austral (voir Chapitre 2), qui font apparaître un deuxième pic de charge sédimentaire de juin à septembre dans les stations de plaine du Solimões.

Le deuxième tributaire le plus important en termes d'apport sédimentaire à l'Amazone est la rivière Madeira, au sud du bassin amazonien. Dans ce bassin Vauchel et al (2017) ont estimé un flux de sédiments en suspension de 430 Mt/an, près de la confluence avec l'Amazone. Néanmoins dans la région Andino-Amazonienne du bassin du Madeira (en Bolivie), caractérisée par des zones de précipitations extrêmes (voir Chapitre 2), les taux de sédiments en suspension atteignent 640 Mt/an. Dans la station de Porto Velho sur le Madeira, une diminution de 30% des sédiments en suspension a été identifiée durant la période de décembre à mars entre 2003-2017 et cette diminution est estimée à 36% en amont, sur la rivière Beni en Amazonie bolivienne (Ayes-Rivera et al., 2019a, 2019b). Néanmoins les facteurs qui sont à l'origine de cette diminution des sédiments ne sont pas encore identifiés.

À l'échelle de l'ensemble du bassin amazonien nous avons montré dans Armijos et al. (2020) le rôle différencié des précipitations sur la dynamique du transport de sédiments

en suspension fins (argile et limon) et grossiers (sable). En effet, les sédiments fins sont érodés au début de la saison des pluies dans la région Andino-Amazonienne et un maximum de concentration est observé dans la plaine amazonienne pendant le cœur de la saison des pluies (été austral). Par contre, les maximums des sédiments grossiers dans la plaine amazonienne sont directement liés aux pics des débits des fleuves, quelque mois après le cœur de la saison des pluies.

Par ailleurs, dans l'article Bouchez et al (2017) nous avons mis en évidence que les relations entre la concentration du matériel dissous et les débits liquides (C-Q) sont hétérogènes dans le bassin de l'Amazone. Selon un axe Ouest – Est, les apports en eaux des sous-bassins de plaine ont tendance à diluer les eaux concentrées d'origine andine. Par ailleurs, selon un axe nord-sud, le déphasage saisonnier des apports de pluies des différents sous-bassins, et par conséquent de leurs débits liquides (cf. Chapitre 2), induisent une relation C-Q non-univoque (hystérésis) (i.e. ou perturbent les relations C-Q) à l'exutoire du fleuve. Cette étude montre que l'effet de la saisonnalité, du déphasage et de la quantité de précipitation que subit le bassin est essentielle à prendre en compte pour quantifier et comprendre les bilans d'altération chimique des grands fleuves et leurs apports aux océans. Enfin, dans Moquet et al (2019) nous avons analysé la relation entre la géochimie des sédiments exportés par le Río Tumbes (nord du Pérou et sud de l'Équateur – versant andin Pacifique) et la variabilité hydrologique. Dans cette étude nous montrons que la signature isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et du néodyme (ϵNd) des sédiments dépend de la distribution spatiale des précipitations à la fois saisonnièrement et pendant des années de pluviométrie contrastées associées à l'ENSO. Appliqués aux enregistrements sédimentaires marins et continentaux, ces résultats constituent un outil prometteur pour les reconstructions paléohydroclimatiques en relation aux impacts des différents types de El Niño/La Niña (Chapitre 5).

II. Perspectives

Dans ce chapitre, des perspectives de recherche sont exposées pour les années à venir. Je souhaite mettre en place ces initiatives en lien avec les perspectives de la nouvelle équipe scientifique « Climat-Cryosphère-Hydrologie » (C2H) de l'IGE. Au-delà de la continuité des recherches que j'ai menées jusqu'à présent (cf. Partie I), je souhaite enrichir mon activité scientifique sur deux aspects majeurs :

- i) Anticiper les impacts des changements climatiques et de l'occupation du sol en Amazonie sur les ressources hydriques dans la région andine tropicale et à l'ouest du bassin amazonien et
- ii) Contribuer à la prévision des événements hydro-climatiques extrêmes à différentes échelles de temps dans le continuum Andes-Amazone.

En ce qui concerne le premier point je propose d'établir un nouvel axe de recherche où l'interaction climatique entre l'Amazonie et les Andes est le thème central.

Ces perspectives de recherche s'insèrent notamment dans le cadre du projet AMANECER, du programme « *Make Our Planet Great Again* » (MOPGA) lancé par le gouvernement français, et financé par l'ANR (Investissement d'Avenir) et l'IRD (ref. ANR-18-MPGA-0008), dont je suis le coordinateur. De même, mes perspectives de recherche s'inscrivent dans le programme hydro-climatique régionale ANDEX (GEWEX), à travers ma participation à son comité de pilotage. Enfin, ces perspectives s'intègrent dans les réflexions scientifiques du « Groupe de Travail Régional sur l'Hydro-géomorphologie du bassin Andino-Amazone », du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO dont je suis membre depuis 2019. En particulier, ce groupe de travail cherche à appuyer scientifiquement la Thématique N°1 de la phase VIII du PHI « catastrophes hydriques et changements hydrologiques » en Amérique Latine et Caraïbes.

1.- Impacts des changements climatiques et de la végétation dans l'hydrologie du continuum Andes-Amazone : Le projet AMANECER

La région de transition Andino-Amazone présente aujourd'hui des défis scientifiques particuliers en relation avec le fragile équilibre entre l'utilisation des ressources par une population en pleine croissance et toujours colonisée dans les faits, donc à l'économie exportatrice et prédatrice, et la conservation de cet environnement unique (e.g. Myers et al., 2000 ; Vuille et al., 2018). Comme il a été discuté dans la Partie I, des changements dans la circulation atmosphérique régionale, liés en partie aux variations de température des océans tropicaux, ont produit des modifications significatives dans le cycle hydrologique du bassin amazonien. Des publications récentes ont montré que pendant les années de sécheresse exceptionnelle la forêt amazonienne a connu des pertes significatives en biomasse (Lewis et al., 2011). A son tour, du fait de rétroactions positives, la perte de forêt amplifie la sévérité des sécheresses au moyen d'une diminution de l'évapotranspiration et d'un affaiblissement du recyclage d'humidité dans l'atmosphère (Bagley et al., 2014). Ce processus a un impact plus significatif à l'ouest du bassin amazonien où on estime qu'environ 50% de l'humidité atmosphérique pendant la saison sèche est recyclée par la forêt amazonienne (Zemp et al., 2014, 2017 ; Figure II.1). En effet, l'Amazonie bolivienne et le sud de l'Amazonie péruvienne présentent un fragile équilibre hydro-écologique où des changements persistants de la structure de la forêt ont été observés en relation avec des changements hydro-climatiques (Maeda et al., 2015 ; Espinoza et al., 2016 -Annexe 18). Dans cette

région d'intenses incendies forestiers ont été observés lors des années de sécheresse extrême, phénomène qui amplifie les rétroactions initiales entre l'atmosphère, le sol et la mortalité des arbres (Fernandes et al., 2011 ; Brando et al., 2014 ; De Faria et al., 2017).

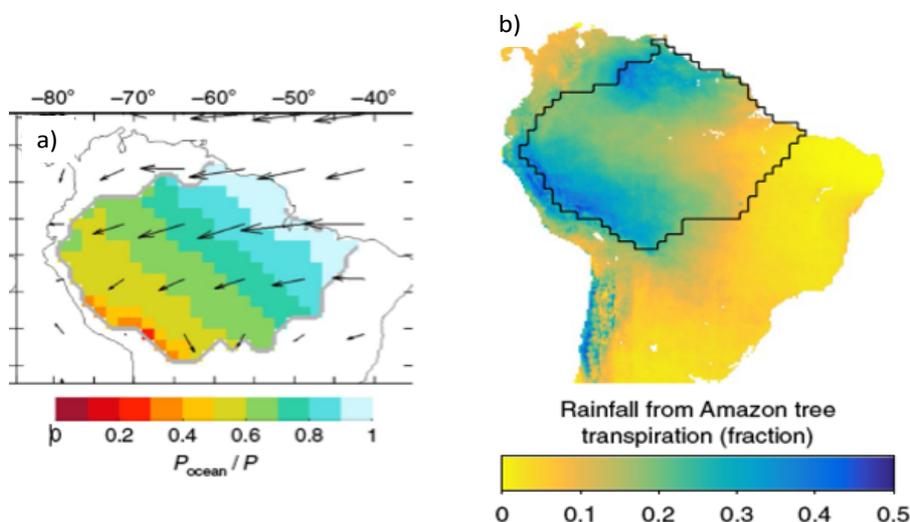


Figure II.1. a) Fraction des précipitations totales par rapport à la pluie provenant directement de l'Océan Atlantique pendant la saison sèche en Amazonie (juin-novembre ; 1989-2005). Les flèches représentent le flux d'humidité verticalement intégré. Adapté de Zemp et al. (2017). b) Fraction des précipitations totales annuelles qui a été transpirée par la forêt amazonienne. Adapté de Staal et al. (2018).

Évidemment, les impacts de la perte de forêt amazonienne ne seront pas limités aux régions où des changements de couverture végétale se sont produits, mais ils auront une influence à plus grande échelle (par exemple sur les Andes) via la circulation atmosphérique régionale. En effet, Staal et al (2018), suggèrent qu'entre 40% et 50% des précipitations observées dans les Andes ont été précédemment évapotranspirées par la forêt amazonienne (Figure II.1b). Dans Ampuero et al. (2020) nous montrons que la composition isotopique des précipitations (excès de deutérium) dans les Andes péruviennes est liée aux interactions de la forêt amazonienne avec la circulation atmosphérique régionale. De plus, les différents mécanismes d'interaction entre la végétation et l'atmosphère peuvent, à leur tour, modifier la circulation atmosphérique régionale. Dans ce contexte, l'évolution des interactions entre la végétation en Amazonie et la circulation atmosphérique pourrait jouer un rôle décisif dans les scénarios futurs du régime des précipitations dans la région andine.

Depuis le début des années 1980s, une augmentation de la mortalité de la biomasse a été détectée en Amazonie, se traduisant par une réduction de la capacité du bassin amazonien à agir comme puits de carbone (Gatti et al., 2014 ; Brienen et al., 2015). Comme résultat de ces changements, l'écosystème amazonien a expérimenté pendant les années de sécheresse extrême une transition de l'état de puits de carbone vers l'état de source de carbone (Davidson et al., 2012). Les projections futures provenant des modèles climatiques globaux du WCRP/CMIP5 suggèrent des conditions plus chaudes en Amazonie, très remarquables pour les deux dernières décennies du XXI^{ème} siècle (Blázquez et al., 2013), ainsi qu'une saison sèche plus longue (Fu et al., 2013 ; Guimberteau et al., 2013 ; Boisier et al., 2015), avec une diminution des précipitations principalement marquée pendant le début de l'année hydrologique (Figure II.2), c'est à

dire en continuité des tendances observées depuis les années 1980s (Espinoza et al., 2019a). Ces changements peuvent modifier le climat amazonien vers des conditions plus appropriées au développement d'un écosystème de type savane en remplacement d'une forêt tropicale, comme le montre la Figure II.3 (e.g. Cox et al., 2004 ; De Faria et al., 2017 ; Oyama and Nobre, 2003 ; Malhi et al., 2008). Le sud de l'Amazonie brésilienne et l'Amazonie bolivienne pourraient devenir les régions les plus impactées, tandis que de fortes incertitudes sont observées en Amazonie péruvienne (Figure II.3). L'impact de certaines activités humaines en Amazonie, comme la déforestation, l'agriculture, l'activité minière, la construction de barrages dans la partie haute des bassins, etc, sont aussi susceptibles d'augmenter dans le futur (e.g. Nobre et al., 2016 ; Forsberg et al., 2017). Pour toutes ces raisons, le bassin amazonien est considéré aujourd'hui comme un système biophysique en transition (Davidson et al., 2012). Ce contexte fait peser un risque très important sur les Andes, car de premières publications sur ce sujet ont montré une diminution significative de l'apport d'humidité de l'Amazonie vers les Andes via un scénario de déforestation en Amazonie (Lejeune et al., 2015 ; Ruiz-Vasquez, 2020). Par conséquent, le futur du cycle hydrologique en Amazonie et dans les Andes dépend d'une étroite interaction entre changements du climat global/régional et facteurs locaux. Dans ce contexte il est particulièrement important de mieux identifier les processus atmosphériques associés à ces changements qui pourraient avoir un impact local sur des précipitations dans les Andes.

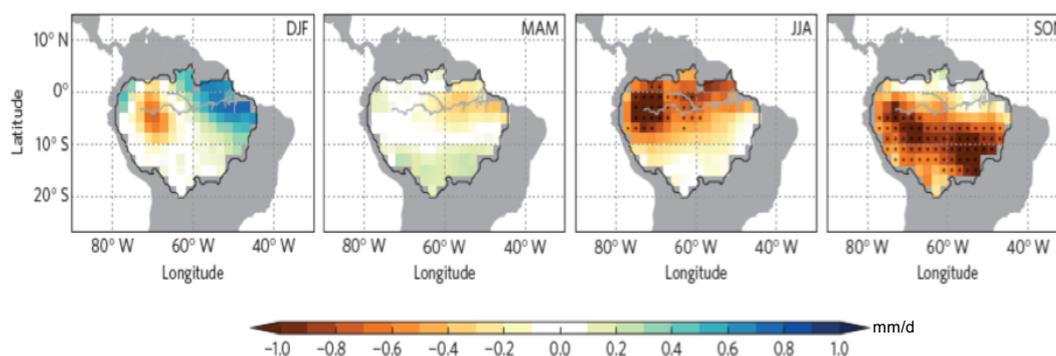


Figure II.2. Différence saisonnière des précipitations entre la fin du XX^{ème} (1960–1999) et la fin du XXI^{ème} (2060–2099) siècle, sur la base des modèles climatiques d'après Boisier et al. (2015). Les points noirs indiquent les points de grille où plus de 90% des modèles sont en accord sur le signe du changement.

Dans la région andine, le recul des glaciers, accéléré depuis le début des années 1970s met en péril la sécurité hydrique des villes et des campagnes de haute montagne, très peuplées (Rabatel et al., 2013 ; Buytaert et al., 2017). En effet, des températures de l'air et de surface plus élevées en-dessous de 5000 m favorisent une intensification des processus de fusion des glaciers (Vuille et al., 2015 ; Aguilar-Lome et al., 2019). De plus, les projections climatiques suggèrent une augmentation de la température de l'air jusqu'à +5°C pour la fin du XXI^{ème} siècle par rapport à la fin du XX^{ème} siècle (Bradley et al., 2006), ce qui peut entraîner la disparition de nombreux glaciers dans cette région (Rabatel et al., 2013). Minvielle et Garreaud (2011) ont analysé les projections de la circulation atmosphérique dans la région de l'Altiplano pour la fin du XXI^{ème} siècle. Ils ont mis en évidence une diminution des précipitations sur cette région d'environ 10%-30%, liés aux changements de la circulation atmosphérique régionale. Par ailleurs, cette étude ne prend pas en compte de possibles changements dans la disponibilité d'humidité provenant d'Amazonie, qui pourraient encore accentuer cette baisse.

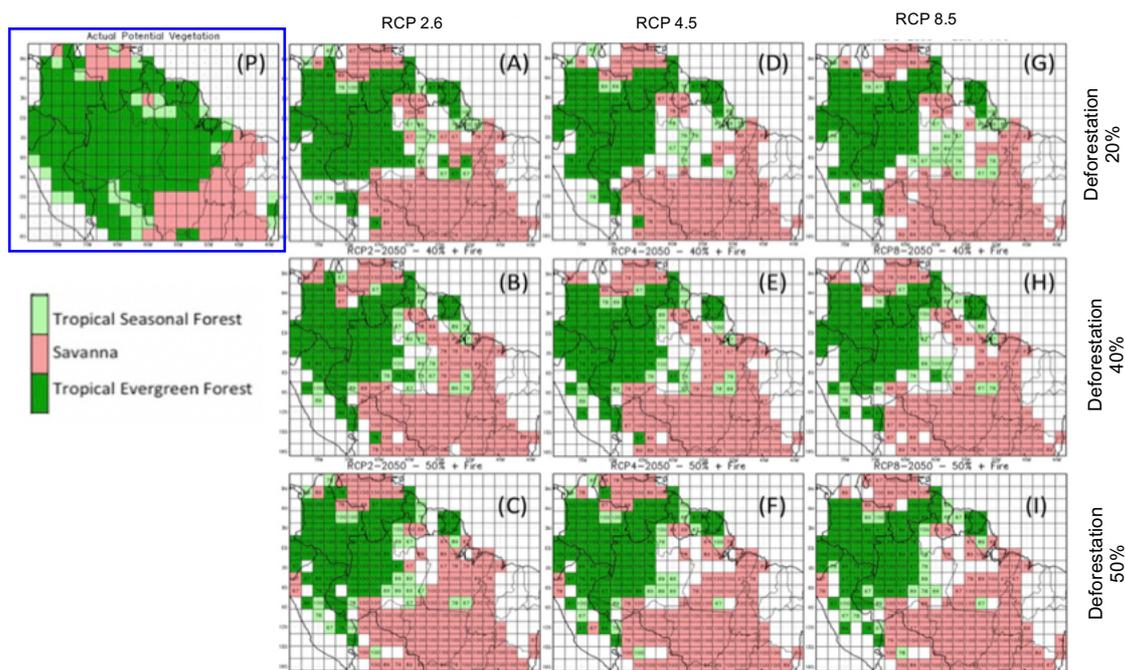


Figure II.3. Projection en 2050 de la distribution des biomes naturels en Amérique du Sud avec, en couleur, les points de grille où 66.7% des modèles coïncident. Les projections sont estimées en utilisant 9 modèles du système Terre pour les scénarios d'émission RCP 2.6, 4.5 et 8.5 et en considérant une déforestation de 20%, 40% et 50% de la forêt amazonienne. Le carré bleu correspond aux conditions actuelles. D'après Nobre et al. (2016).

En conclusion, d'après la littérature scientifique, la région andine pourrait être exposée à un fort stress hydrique en réponse à trois principaux facteurs : i) un changement dans la circulation régionale (Minvielle et Garreaud, 2011), ii) l'impact des changements de la couverture végétale en Amazonie sur l'humidité de l'air (Ruiz-Vasquez, 2020) et iii) le recul des glaciers. La communauté scientifique internationale, et notamment celle de l'équipe CYME de l'IGE a contribué considérablement à mieux comprendre les processus de recul des glaciers et son impact sur la disponibilité hydrique dans les Andes (e.g. Baraer et al., 2012 ; Condom et al., 2012 ; Moure et al., 2015 ; Rabatel et al., 2013 ; Kronenberg et al., 2016). Néanmoins, les mécanismes et les implications associés aux deux premiers points sont encore très peu connus. Pour ces raisons, dans les prochaines années mes activités de recherche auront comme objectif général de mieux comprendre comment le changement climatique et les modifications du couvert végétal en Amazonie pourraient affecter le cycle de l'eau dans le continuum Andes-Amazone. Dans ce contexte, je m'intéresserai davantage à estimer les impacts futurs du changement climatique en combinant des études de diagnostic et de modélisation climatique. Pour cela, trois axes de recherche seront conduits et sont décrits dans les trois prochaines sections.

1.1) Identifier les impacts des événements extrêmes de sécheresse sur la végétation en Amazonie bolivienne et péruvienne

Les conditions climatiques de grande échelle associées aux événements de sécheresse extrême en Amazonie sont relativement bien connues (eg. Yoon and Zeng., 2009 ; Marengo and Espinoza, 2016). Par contre, les impacts de ces événements sur la végétation en Amazonie péruvienne et bolivienne reste un sujet peu documenté jusqu'à présent. Dans cette première partie, nous nous intéressons à la question générale :

Comment la forêt au sud du bassin amazonien (Bolivie et Pérou) répond aux événement de sécheresse extrême ?

Grâce à l'utilisation des données d'indices de végétation obtenues par télédétection, comme l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice de végétation amélioré (EVI), etc, nous pourrions évaluer, dans un premier temps, la réponse de la végétation aux épisodes secs en Amazonie, particulièrement dans le sud du bassin pendant les deux dernières décennies. En effet, nos premiers résultats ont montré que la végétation en Amazonie péruvienne et bolivienne est principalement dépendante de l'eau (et non de la radiation) pendant la saison sèche, entre juillet et octobre. Ainsi, Espinoza et al (2016, Annexe 18) ont montré en Amazonie péruvienne une relation significative et inverse entre l'indice NDVI et la fréquence de jours secs (DDF, Figure II.4a). Dans cette région, le NDVI a une relation plus importante avec la DDF qu'avec la pluie totale. Par contre, en Amazonie bolivienne, où existe une large région saisonnièrement inondée (Llanos de Mojos) et une région de savane (El Chaco), le NDVI serait plutôt lié à la variation des précipitations totales pendant la saison sèche (Figure II.4 ; Gutierrez-Cori et al. (en prép.). Ces différences pourraient s'expliquer par le comportement physiologique de chaque type de forêt, et la dynamique des plaines inondées. Ce sujet méritera plus d'analyses dans le futur. Dans Gutierrez-Cori et al. (en prép.) nous nous intéressons d'avantage au rôle de l'eau stocké dans le sol (TWS) en utilisant des données gravimétriques de la mission spatiale GRACE. En effet, cette variable est très importante pour expliquer les variations interannuelles de NDVI dans les régions non caractérisées par forêt tropicale ($r=0.90$ entre TWS et NDVI de la saison sèche) et c'est moins le cas dans les régions de forêt tropicale ($r=0.65$). De nouvelles approches, basées sur des données GRACE, ont permis de mieux différencier l'apport des eaux souterraines de celui des eaux de surface dans le bassin amazonien (Frappart et al., 2019). Ces nouvelles données nous permettront d'avoir une première vision du rôle de l'eau souterraine sur les différents types de végétation dans le sud-ouest du bassin.

Ces approches de diagnostics, basées sur des relations statistiques entre indices hydro-climatiques à l'échelle régionale et locale et variables de végétation seront abordées en collaboration avec des chercheurs du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD, Paris), notamment dans le cadre de la thèse d'Omar Gutierrez-Cori (ex-étudiant de master à l'UNALM-Pérou que j'ai encadré) financée par le programme « *Make our Planet Great Again - MOPGA* », avec nos collègues du Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS, Toulouse) et avec nos collègues de l'école de géographie de l'université de Leeds (UK).

En complément de ces approches, une analyse de la réponse de la végétation à différentes conditions climatiques sera conduite pendant les prochaines années dans le cadre du post-doctorat de Sly Wongchuig-Correa (sous ma direction dans le cadre du projet AMANECER). Pour cela, nous envisageons d'utiliser la composante hydrologique SECHIBA du modèle ORCHIDEE (déjà validée dans le bassin amazonien dans Guimberteau et al., 2012 et 2013) et le module de végétation dynamique intégré dans ORCHIDEE (Krinner et al., 2005). Cette approche a pour objectif de mieux comprendre la réponse de la végétation dans le sud-ouest du bassin amazonien, notamment à trois scénarios climatiques pour la fin du XXI^{ème} siècle, qui serviront de données d'entrée à nos simulations : i) Une augmentation de la température de l'air, dans la continuité des

tendances observées dans les dernières décennies dans les Andes et l'ouest du bassin amazonien (i.e. $0.1^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$; Lavado-Caimiro et al., 2013) ; ii) Une augmentation de la durée de la période sèche dans le sud du bassin amazonien, dans la continuité des tendances observées (e.g. Fu et al., 2013 ; Boisier et al., 2015) et iii) une diminution des précipitations pendant la période sèche dans le sud du bassin amazonien, dans la continuité des tendances observées (Espinoza et al., 2019a) et en accord avec les projections des modèles de circulation générale (i.e. Figure II.2 ; Boisier et al., 2015). La réponse de la végétation dans le sud du bassin amazonien (e.g. au sud de 8°S) à chacun de ces scénarios et à la combinaison des trois scénarios sera donc évaluée grâce à ces simulations numériques d'ORCHIDEE. Les simulations seront coordonnées avec nos collègues de l'Université de Buenos Aires, Argentine et du LMD, Paris (Unité Mixte Internationale IFAECI), avec qui des collaborations sont en cours depuis 2018.

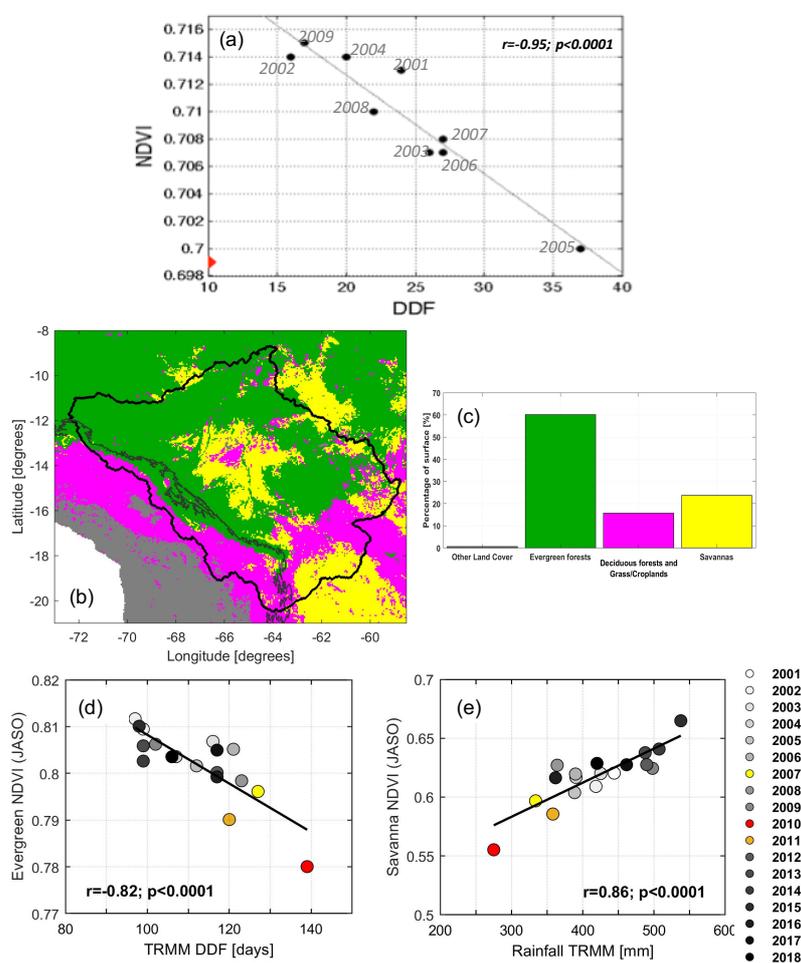


Figure II.4. a) Nuage de points entre la fréquence annuelle de jours secs (DDF, calculé avec les données HOP) et les anomalies de NDVI entre Août et Octobre dans le bassin versant de Tamshiyacu en Amazonie péruvienne. La valeur de NDVI de l'année 2010 est indiquée en rouge. Source : Espinoza et al., 2016. b) Distribution spatiale des types de couverture végétale dans le bassin de Porto Velho (haut Madeira, délimité en ligne noire) en 2017 (données MODIS). Les types de couverture associés à chaque couleur sont indiqués en c. c) Pourcentage de couverture de chaque type par rapport à la surface totale du bassin versant de Porto Velho. d) Diagramme de dispersion entre la DDF de la période sèche (calculé avec TRMM) et les anomalies de NDVI entre Juillet et Octobre dans les régions de forêt tropicale dans le bassin versant de Porto Velho. e) Comme d, mais en utilisant le NDVI des régions de savane et la pluie totale pendant la période sèche à la place des DDF.

1.2) Le continuum Andes-Amazone en termes d'évapotranspiration, transport d'humidité et pluies dans les Andes

Les deux questions scientifiques générales qui sont sous-jacentes à cette partie de mes perspectives sont les suivantes : i) comment les cycles hydrologiques dans le sud-ouest du bassin amazonien et dans les Andes tropicales sont-ils liés ? ii) quel rôle joue la forêt amazonienne dans cette connexion ?

Initialement le bilan hydrique de surface sera réalisé dans le sud-ouest du bassin amazonien. Une première approche a été proposée dans Espinoza et al (2019b, Annexe 5) en utilisant différentes bases des données observées et des données satellites (e.g. précipitation de CHIRPS, évapotranspiration de GLEAM et eau stockée dans le sol de GRACE). Ces estimations de bilan hydrique seront comparées avec les résultats du modèle ORCHIDEE (décrites dans la section précédente) et du modèle hydrologique des grands bassins MGB-IPH, que Sly Wongchuig-Correa a utilisé pendant son doctorat pour simuler l'hydrologie de cette région amazonienne (Wongchuig-Correa et al., 2017). Grâce à ces résultats nous aurons une idée plus précise des incertitudes relatives aux différentes variables qui permettent le calcul du bilan hydrique, principalement pour ce qui concerne la quantification et la spatialisation de l'évapotranspiration.

Dans une deuxième étape, nous nous intéresserons à mieux comprendre la relation (si elle existe) entre les mécanismes climatiques responsables de la durée de la saison humide dans le sud du bassin amazonien (e.g. Fu et al., 2013 ; Arias et al., 2015) et celle des Andes tropicales. Cette analyse nous permettra de mettre en relation des mécanismes de grande échelle (comme la mise en place de la mousson sud-américaine) avec des processus plus locaux dans les Andes, qui sont très importants pour expliquer la fusion des glaciers. En effet, dans Sicart et al. (2003) la variation de débit de fonte au cours de l'année a été reliée à la date d'arrivée de la saison des pluies sur le glacier du Zongo. Une première partie de ces travaux se feront dans le cadre de la thèse de Philemon Autin (IGE).

La modélisation climatique à haute résolution sera une composante très importante de cette partie de mes perspectives. Je profiterai des compétences acquises à l'IGE récemment sur ce sujet (e.g. Clémentine Junquas, Martin Ménégoz, Jennie Thomas). En effet, les modèles de circulation générale (GCMs) et la plupart des modèles régionaux développés dans le cadre de CORDEX ne sont pas capables de reproduire les spécificités de haute résolution nécessaires pour simuler adéquatement le climat des Andes. Pour atteindre cet objectif nous allons utiliser le modèle WRF (Weather Research and Forecasting), le seul modèle de haute résolution qui a déjà été testé et validé dans la région de transition Andino-Amazone (Junquas et al., 2018) et dans la plaine amazonienne (Bagley et al, 2014). Nous envisageons de conduire une étude de sensibilité à différentes couvertures de surface et utilisations du sol en Amazonie et d'analyser les réponses en termes de processus de transport d'humidité et précipitation dans les Andes. Ces approches seront abordées avec une configuration en « emboîtement » de domaines qui permet d'augmenter la résolution spatiale progressivement. Le domaine le plus large sera forcé par des données de Réanalyses (e.g. ERA-Interim ou ERA-5) et inclura les Andes tropicales et le bassin de l'Amazone, tandis que les domaines les plus petits seront centrés sur des vallées spécifiques de la région de transition Andino-Amazone avec un apport glaciaire, comme la vallée du Zongo en Bolivie et la vallée de Vilcanota au Pérou (Figure II.5). Dans ces vallées, des

simulations à 3 et 1km de résolution seront conduites, car une haute résolution permet d'analyser les processus de brise de vallée et de montagne, caractéristiques clés pour comprendre le transport d'humidité et la variabilité spatio-temporelle des précipitations en zones à forte orographie (Figure II.6). Le modèle WRF accepte des possibilités de multi-paramétrisation qui nous permet d'utiliser des modèles de surface (e.g. the Noah land surface model ; Bagley et al, 2014). De plus, nous avons constaté dans Aguilar-Lome et al. (2019) une augmentation de la température de surface dans la région andine du Pérou depuis les années 2000, qui est plus accentuée à haute altitude. Dans ce contexte, nous chercherons aussi à mieux comprendre comment cette augmentation de la température de surface pourrait influencer les processus atmosphériques locaux, en particulier le cycle diurne et les circulations de vallées/montagne décrites dans Junquas et al (2018) (Figure II.6).

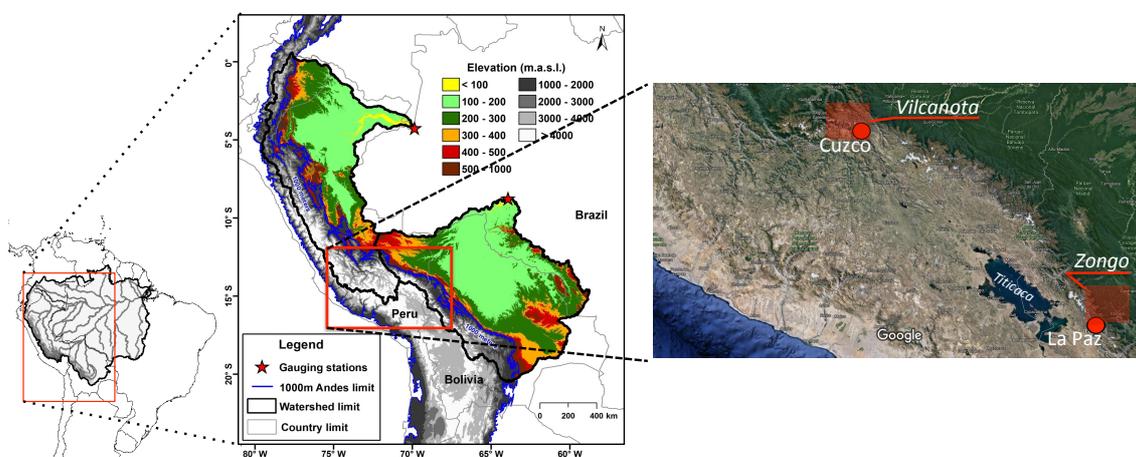


Figure II.5. Schéma des différents domaines spatiaux envisagés pour les simulations avec WRF. À droite on observe les deux vallées (Zongo et Vilcanota) où des simulations à haute résolution seront conduites (3 et 1km).

Ces travaux seront coordonnés par Clémentine Junquas (à 50% sur le projet AMANECER) et feront partie de la thèse de Juan Pablo Sierra (IGE) qui a démarré en Octobre 2019 dans le cadre du projet AMANECER – MOPGA et sous la co-direction de Clémentine Junquas, Thierry Lebel et moi-même. Cette thèse se servira des résultats obtenus dans Junquas et al. (2018) et Saavedra et al. (2019), sur la mise en forme du modèle WRF, mais aussi des résultats de la thèse de Hans Segura sur le rôle de la convection amazonienne et de la circulation méridionale à l'est des Andes (Section 5 de la Partie I) et les premiers résultats du post-doctorat de Sly Wongchuig-Correa. Finalement, nous collaborons avec nos collègues de l'UMI IFAECI (Argentine-France), qui développent actuellement un modèle couplé ORCHIDEE-WRF (couplage atmosphère – végétation dynamique) pour l'ensemble de l'Amérique du Sud (à 20 km de résolution). Les sorties de ce modèle couplé nous serviront d'entrée pour nos simulations WRF à plus haute résolution dans les Andes.

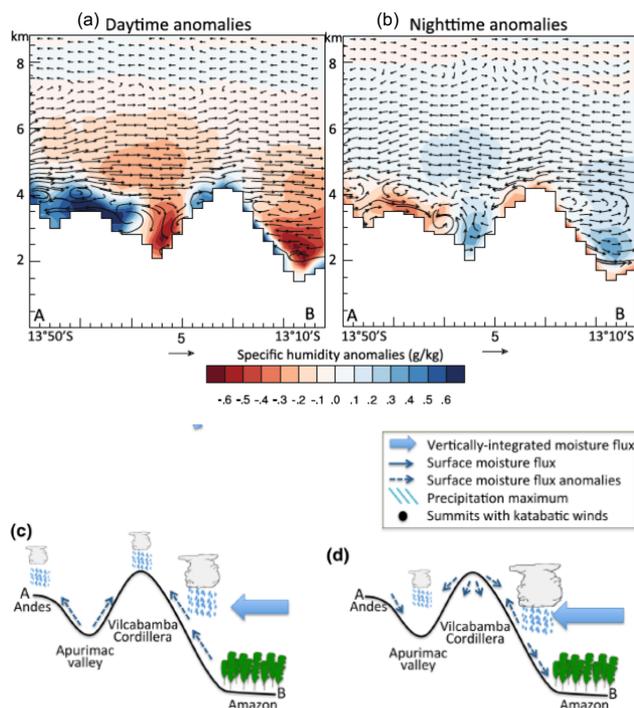


Figure II.6. (a) et (b) section transversale nord (point B) - sud (point A) dans la région de Cuzco, Pérou (boîte rouge de la Figure II.5) avec des anomalies de transport d'humidité méridional-verticale (vecteurs) et l'humidité spécifique (couleur) pendant (a) le jour et (b) la nuit par rapport aux valeurs journalières moyennes d'été austral calculées avec des sorties du modèle WRF à 3 km de résolution (Junquas et al., 2018). (c) et (d) schémas de simulation du cycle journalier de la circulation du vent, de l'humidité et de la précipitation identifié dans Junquas et al. (2018) pendant (c) le jour et (d) la nuit. Source : Junquas et al. (2018).

1.3) Fournir des scénarios futurs sur les changements de végétation amazonienne liés au climat, et leurs implications pour les pluies/l'hydrologie des Andes

Grâce aux analyses conduites dans la section 1.2, les processus physiques locaux, comme le transport d'humidité, la convection, et des précipitations seront mieux identifiés dans les vallées du Zongo et de Vilcanota. Dans une prochaine étape, nous essaierons de proposer des réponses à la question scientifique suivante : Quelle sont les projections futures des conditions hydrologiques, et les incertitudes associées, dans la région de transition Andes-Amazonie, et en particulier dans les deux vallées mentionnées ?

Pour cela, nous envisageons de développer une méthodologie en prenant en compte les sorties des GCMs du GIECC (WRCP/CMIP5 et CMIP6) des dernières 30 années. Les GCMs qui représentent le mieux les variables climatiques les plus importantes pour la végétation, précédemment identifié dans la section 1.1 (e.g. durée de la saison sèche, quantité de pluie pendant la saison sèche, nombre de jours secs, etc), seront sélectionnés. Différents scénarios de changement climatique (RCPs) seront évalués. Chaque sortie de GCM sélectionné sera utilisée pour forcer la configuration du modèle ORCHIDEE-WRF. Grâce à cette méthodologie nous pourrions identifier des changements de précipitations à une échelle locale dans la région de transition Andino-Amazonienne. Ces résultats seront particulièrement utiles pour identifier des changements dans le régime des précipitations dans cette région, associées à : i) des changements dans la circulation atmosphériques et ii) des changements dans la couverture de surface. Par

ailleurs, cette approche permettra d'identifier les incertitudes associées aux projections des précipitations liées aux : i) différents RCPs et à ii) différentes projections des GCMs. Enfin, grâce à la collaboration avec mes collègues T. Condom, J.E Sicart, A. Rabatel, hydro-glaciologues du LMI-GREATICE, les impacts de ces projections des précipitations dans les processus hydrologiques des vallées de Vilcanota et du Zongo seront quantifiés en utilisant un modèle hydro-glaciologique (e.g. DHSVM-GDM ; Frans et al., 2015) qui est déjà testé dans la région andine (e.g. thèse de Jean Carlos Ruíz à l'IGE).

D'autre part, les changements d'occupation du sol en Amazonie ne dépendent pas que des conditions climatiques, mais aussi des différentes activités anthropiques et des politiques publiques mises en place par les gouvernements des pays amazoniens (Nobre et al., 2016). Dans ce contexte des analyses seront faites pour comprendre les impacts des différents scénarios de déforestation, comme ceux proposés par Alvez et al., (2015), sur les processus de circulation atmosphérique et des précipitations dans la région de transition Andino-Amazonnienne et en particulier sur les deux vallées décrites dans la Figure II.5. Actuellement, et grâce à la collaboration avec des chercheurs de l'Université d'Antioquia (Medellín, Colombie), nous travaillons sur de premiers résultats qui nous ont permis de mieux caractériser l'impact des scénarios de déforestation en Amazonie sur les sources d'humidité (océanique et continentale) sur la région andine (Ruiz-Vasquez., 2020). Dans cette première étude nous avons quantifié une diminution significative de l'apport d'humidité provenant du sud du bassin amazonien (région la plus affectée dans les scénarios de déforestation) sur la région de transition Andino-Amazonnienne pendant l'été austral et sur l'ensemble des Andes tropicales pendant l'hiver austral (Figure II.7).

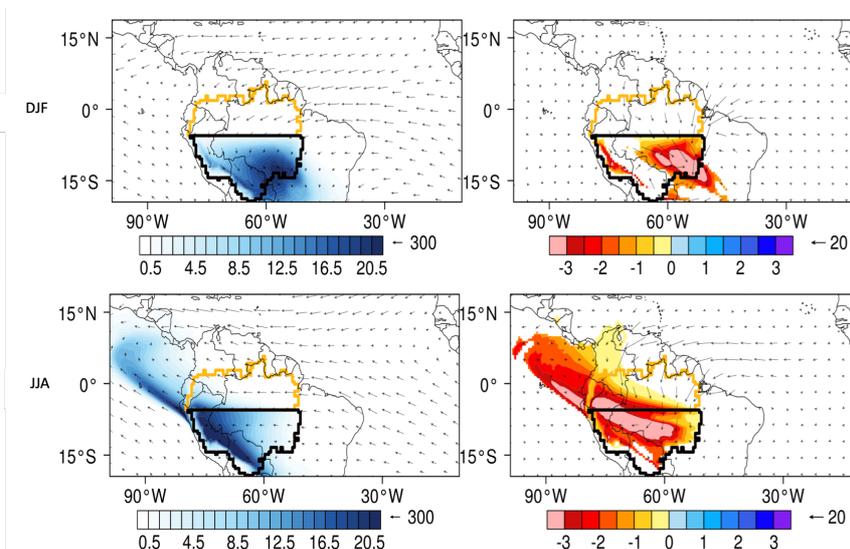


Figure II.7. (a) et (b) Contribution moyenne de l'eau précipitable (couleurs, en mm) provenant du sud du bassin amazonien (en ligne noire) vers l'Amérique du Sud tropicale en DJF (a) et JJA (b) calculée à partir des réanalyses ERA-Interim pour la période 1980-2017. Les vecteurs représentent le flux d'humidité verticalement intégré (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$). (c) et (d) Changements d'eau précipitable et flux d'humidité verticalement intégré en considérant le scénario de déforestation en Amazonie « cen-2050 » d'après Alves et al (2015) par rapport aux conditions moyennes (montrées en a et b), en DJF (c) et JJA (d). Source : Ruiz-Vasquez et al (2020).

Les scénarios présentés dans la Figure II.7 pourraient servir d'entrée au modèle WRF décrit dans la section précédente pour évaluer les impacts de la déforestation sur les deux vallées représentatives de la région de transition Andino-Amazonnienne (Figure

II.5). De plus, grâce à la collaboration avec nos collègues de l'IGP nous travaillons à valider WRF dans la vallée du Mantaro dans les Andes centrales du Pérou, une région clé pour la sécurité alimentaire de Lima (10M d'habitants). Dans Saavedra et al. (2019) nous avons produit des simulations à haute résolution dans cette vallée et nous chercherons à comprendre comment les processus de circulation de vent, température et précipitation peuvent être modifiés suite à des changements de couverture du sol. Les résultats préliminaires montrent une forte sensibilité de ces variables aux modifications de la végétation en Amazonie péruvienne, principalement sur le flanc est de la vallée de Huancayo (Figure II.8).

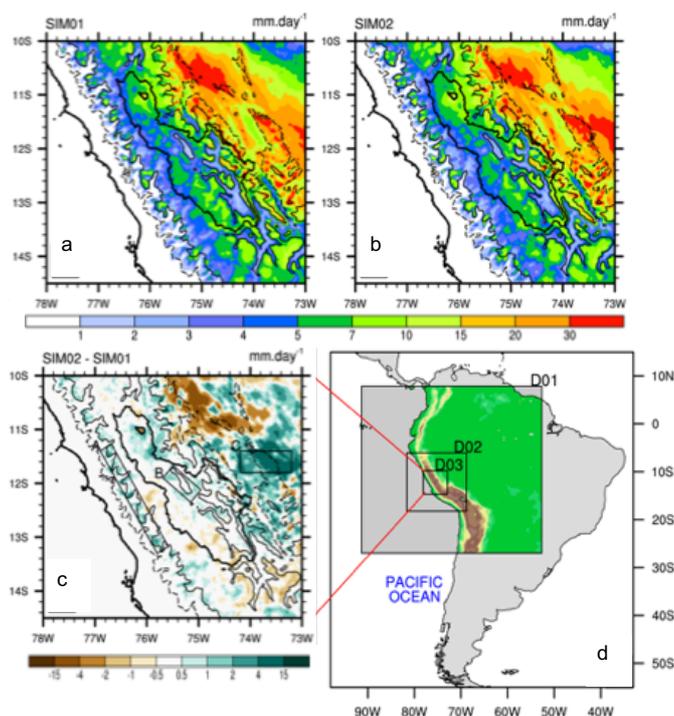


Figure II.8. Pluie journalière moyenne (couleur, en mm/jour) dans les Andes centrales du Pérou en considérant les simulations a) SIM01 (WRF avec topographie de SRTM et conditions de couverture du sol propres au modèle), b) SIM02 (WRF avec topographie de SRTM et conditions de couverture du sol adaptés de Eva et al (2004)), et c) différence entre SIM02-SIM01. Les lignes de niveau à 1500 et 3000 m sont indiqués en ligne intermittente et ligne continue, respectivement. D'après Saavedra et al. (2019).

Dans les prochaines années je souhaite consacrer la plupart de mes efforts à cette première partie de mes perspectives de recherche car le rôle de la forêt amazonienne sur l'équilibre écosystémique au niveau régionale et globale mérite d'être encore mieux connu et mieux exposé aux politiques et aux décideurs. En particulier, ces résultats permettront de fournir plusieurs bases scientifiques pour : i) informer les décideurs sur le rôle fondamental de la forêt amazonienne pour maintenir l'équilibre écosystémique des régions en dehors du bassin amazonien (comme les Andes, le bassin de La Plata, etc), et ii) renforcer les arguments utilisés pour interpeler les décideurs et gouvernants, comme nous l'avons fait en août 2019 dans le *eLettre* publié dans *Sciences* « *While denying science, Mr. Bolsonaro's policies are threatening ecosystem services in Amazonia and the sustainable development of South America* » (Poveda et al., 2019 ; Annexe 19).

2.- Événement hydro-climatiques extrêmes : Outils pour la prévision et projections futures

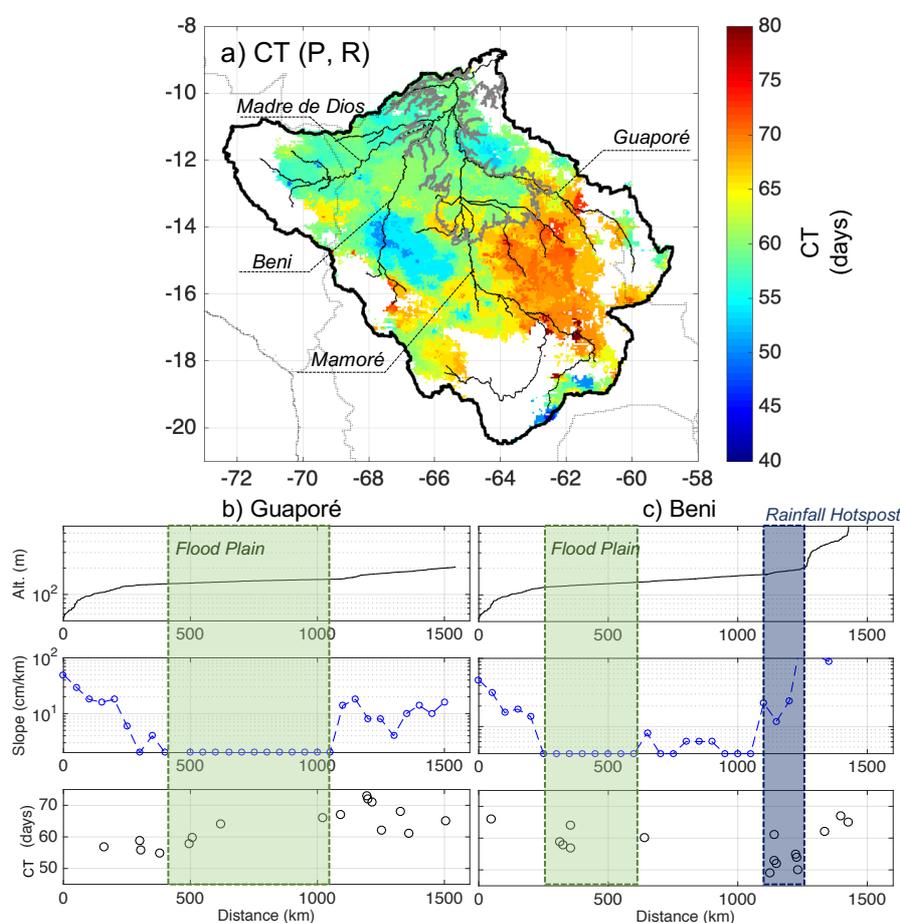
Trois questions scientifiques guident cette deuxième partie de mes perspectives : i) Quelle est notre capacité de prévision des événements de sécheresse et inondations extrêmes dans l'Amazonie péruvienne et bolivienne en utilisant les anomalies de température de surface océanique ? ii) Les types de circulation atmosphériques intrasaisonniers identifiés en Amazonie peuvent-ils contribuer à améliorer notre capacité de prévision des événements hydro-climatiques de courte durée ? et iii) Quelle sera l'évolution à long-terme du régime hydrologique à l'ouest du bassin amazonien dans le contexte de changement d'occupation du sol et de réchauffement climatique ?

2.1. Prévision opérationnelle des événements extrêmes saisonniers

Comme il a été décrit dans la Partie I de ce document, une bonne partie de mes activités de recherche des dernières années a été consacrée à une meilleure compréhension de l'origine des événements hydro-climatiques extrêmes en Amazonie. Plus récemment, et grâce à la coopération avec mes collègues péruviens de l'IGP, l'ANA et du SENAMHI, nous avons mis en place un système de suivi et de prévision des événements d'inondations et de sécheresses saisonnières dans les principaux sous-bassins de l'Amazonas au Pérou. Pour cela nous utilisons des anomalies de températures de surfaces océaniques du Pacifique et de l'Atlantique tropical qui ont été précédemment identifiés comme précurseurs des événements hydrologiques extrêmes (Marengo and Espinoza, 2016 ; Annexe 6) et des anomalies de précipitations. Même si ce système existe déjà au Pérou, je souhaite réaliser un outil fonctionnant à échelle régionale, principalement en Amazonie bolivienne (avec mes collègues de l'IHH de l'UMSA). Néanmoins, comme nous l'avons montré dans Espinoza et al (2014 ; Annexe 10) et Molina-Carpio et al (2017) certains événements hydrologiques extrêmes en Amazonie bolivienne ont eu des origines différentes de celles identifiées en Amazonie occidentale et centrale. Dans un premier temps, je propose de mettre en place un projet qui nous permettra d'évaluer notre capacité de prévision de ces événements extrêmes en analysant les anomalies des températures océaniques du Pacifique équatorial et de l'Atlantique tropical Nord et Sud, mais aussi les anomalies dans la région Indopacifique et dans l'Atlantique subtropical sud, qui sont associés aux événements de fortes pluies à l'est des Andes boliviennes. Pour évaluer notre capacité de prévision, un modèle de régression multiple, qui considère les anomalies de surface océanique comme prédicteurs des anomalies des précipitations, sera testé. Ces anomalies des précipitations seront ensuite utilisées comme données d'entrée au modèle hydrologique MGB-IPH déjà validé en Amazonie péruvienne et bolivienne (Zubieta et al., 2017 ; Wongchuig-Correa et al., 2017).

Ces méthodes simples pour le suivi des événements hydrologiques extrêmes dépendent aussi du temps de concentration de l'eau, ou temps de réponse entre la pluie et le débit dans un bassin versant. Néanmoins, nous avons montré dans Espinoza et al. (2019b, Annexe 5) que le temps caractéristique de décalage entre les précipitations et le débit (CT) varie considérablement en fonction des facteurs climatiques (par exemple, il est plus court dans les régions de « hotspots » de précipitation) et des conditions géomorphologiques comme dans les plaines inondées (Figure II.9). Grâce aux nouvelles données des précipitations spatialement homogènes (HOP, CHIRPS, TRMM...) et des données gravimétriques (GRACE), nous pourrions aujourd'hui améliorer notre

connaissance sur le CT des principaux sous-bassins de l'Amazone, et par conséquent, mieux estimer la relation pluie-débit associée aux événements d'inondation. Pour cela, nous pourrions utiliser une approche empirique en fonction des corrélations spatiales avec un retard du débit (provenant du SNO-HYBAM ou des services hydrologiques) par rapport à la pluie dans chaque point de grille, de façon à trouver la meilleure corrélation possible entre la pluie et le débit, comme proposé dans Espinoza et al (2019b) (Figure II.9). De façon complémentaire, le CT pourrait être calculé à l'aide des modèles comme MGB-IPH et ORCHIDEE, déjà validés en Amazonie (Wongchuig-Correa et al., 2017 ; Guimberteau et al., 2012). Ces analyses nous permettront de mieux comprendre le rôle des zones à forte précipitation (hotspots) et des plaines inondées sur les différents CT simulés. Cette thématique est aussi prioritaire pour mes collègues de l'UBA (Argentine) et le LMD, qui s'intéressent à des processus d'inondation dans la région du Pantanal et dans le bassin de La Plata. Des collaborations avec eux sont déjà en cours.



2.2. Types de circulation pour la prévision des événements extrêmes de courte durée

À une échelle temporelle plus courte, mes études sur la circulation atmosphérique à l'échelle intrasaisonnière ouvrent des perspectives intéressantes pour la prévision des événements extrêmes de courte durée. En effet, La définition des types de circulation dans le bassin amazonien, leur caractérisation en termes d'évolution et d'organisation dans le temps et l'espace (trajectoires et persistances), ainsi que leur relation avec la pluie régionale et les événements hydrologiques extrêmes, permettent d'envisager une étude de la prévision hydrologique à partir de la circulation atmosphérique à grande échelle. Nous avons déjà identifié des types de circulation responsables de la pluie extrême dans le bassin de Tamshiyacu en Amazonie péruvienne (Paccini et al., 2017) et en Amazonie bolivienne (Espinoza et al., 2012b) ainsi que des types de circulation associés aux « repiquetes », c'est-à-dire aux remontées impromptues du niveau de l'eau durant l'étiage (Figuroa-Culqui et al., en préparation). Même si les études de types de circulation ont déjà contribué à améliorer notre connaissance en termes de variabilité intrasaisonnière de l'atmosphère en Amazonie, la mise en place de ces connaissances en termes d'outil opérationnel n'est pas encore développée. Pour cela, des données atmosphériques auxquelles on aurait soustrait la moyenne saisonnière à long terme, conserveraient leur variabilité synoptique et leur variabilité interannuelle. Ainsi, le problème de la variabilité interannuelle des caractéristiques des types de circulation ne se poserait plus, ou moins. Cette méthodologie donnerait la possibilité de faire de la prévision opérationnelle puisque la moyenne à long terme est connue (ce qui n'est pas le cas de la variabilité au cours d'une saison). Après avoir analysé ces résultats on pourrait, à partir des prévisions des services météorologiques et de la désagrégation statistique, prévoir les types de circulation et des précipitations associée. Et bien sûr comparer les qualités des prévisions obtenues par prévision classique et celles obtenues au moyen des types de circulation. Le SENAMHI Pérou a développé ces dernières années une plateforme de services climatiques avec des données hydro-climatiques qui seront utilisées dans cette perspective.

L'Amazonie bolivienne est aussi une région très sensible aux « repiquetes » et surtout aux incendies, ce type d'études qui permettrait d'identifier les caractéristiques de la circulation atmosphérique intrasaisonnière qui précèdent ces phénomènes (repiquetes et incendies) n'ont pas encore été réalisés. En conséquence, je souhaiterais développer ce type d'étude avec des étudiants et mes partenaires boliviens.

Enfin, et dans un contexte plutôt théorique nous pourrions chercher à comprendre si les systèmes ondulatoires qui sous-tendent la caractérisation des types de circulation sont prévisibles au pas de temps intra-saisonnier, si en particulier ils sont liés à l'oscillation de Madden-Julian (MJO), que nous avons caractérisé sur l'Amazonie dans Mayta et al (2019). De plus, à la suite de Mayta et al (2019) qui mettent en évidence des phases pluriannuelle de plus forte et plus basse activité de la MJO, notamment en relation avec l'ENSO, nous pourrions vérifier si la variabilité pluriannuelle des pluies associées aux types de circulation est liée à celle de la MJO.

2.3.- Projections des événements hydrologiques extrêmes dans le contexte du changement climatique et des changements d'occupation du sol

Différentes études ont été faites pour comprendre l'évolution future du régime hydrologique dans le bassin amazonien en considérant des projections futures simulées

par des GCMs (eg. Guimberteau et al., 2013) et des conditions de déforestation en Amazonie (e.g. Guimberteau et al., 2017). Dans cette perspective nous utiliserons les sorties de quelques GCMs sélectionnés (voir Section 1.3) pour la fin du XXI^{ème} siècle pour forcer le modèle couplé ORCHIDEE-WRF et analyser leurs sorties en termes de débit et de bilan hydrique futur. Bien que cette méthodologie présente des incertitudes liées en majorité aux biais des modèles et à leur couplage, nous espérons fournir des projections futures qui prendront en compte, de la manière la plus réaliste possible avec les outils dont nous disposons, l'évolution de la saison sèche en Amazonie. Ainsi, les résultats conjoints décrits dans la section 1 et dans cette section contribueront à l'analyse des projections futures du régime hydrologique en Amazonie en fournissant une approche plus régionale qui permettra d'identifier le rôle de la région de transition Andes-Amazonie sur l'évolution des débits.

3.- Chronologie et collaborations internationales

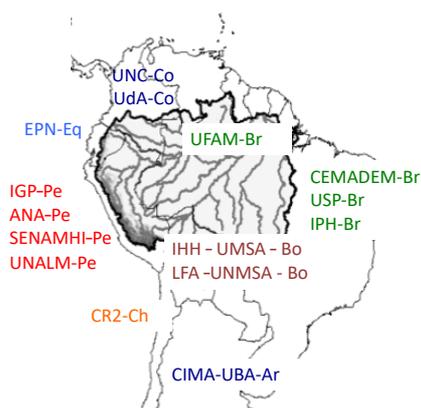
Les activités décrites auparavant seront conduites dans les prochains années selon le schéma de la Figure II.10. De plus, mes activités de recherche feront partie de la phase centrale (*core activities*) du programme ANDEX, prévue pour la période 2021-2025. En effet, les perspectives de recherche issues du projet AMANECER sur le continuum Andes-Amazonie correspondent à des questions scientifiques clés de cette étape d'ANDEX.



Figure II.10. Schéma représentant la chronologie des principales activités décrites dans mes perspectives de recherche pour la période 2019-2025.

Mes perspectives de recherche des prochaines années s'inscrivent dans un contexte de coopération internationale unique entre l'IGE et différentes universités et laboratoires. Au-delà des collaborations avec des laboratoires français déjà mentionnés, j'ai mis en place un réseau de chercheurs de sept pays d'Amérique du Sud tout au long de ma carrière (Figure II.11). Plusieurs co-publications d'articles scientifiques, co-encadrements d'étudiants et co-constructions de projets dans le cadre de ce réseau attestent de l'efficacité de cette collaboration. Dans les prochaines années, différents

initiatives scientifiques (e.g. ANDEX, PHI-UNESCO, MOPGA, etc) me permettront de renforcer ces collaborations. Enfin, la formation de jeunes chercheurs, principalement du sud, est un point fondamental pour le développement de la science en hydro-climatologie de la région Andino-Amazonienne. Je souhaite donc m'investir davantage dans les années à venir dans l'encadrement d'étudiants.



Chercheur	Institution	Pays
Anna Sörensson	Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)	Argentine (Ar.)
Maria Laura Bettolli	Universidad de Buenos Aires (UBA)	Argentine (Ar.)
René Garreaud	Center for Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2)	Chili (Ch.)
Naziano Filizola	Universidade Federal do Amazonas (UFAM)	Brésil (Br.)
Jose A. Marengo	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEM)	Brésil (Br.)
Tercio Ambrizzi	Universidade de São Paulo (USP)	Brésil (Br.)
Pedro Silva-Diaz	Universidade de São Paulo (USP)	Brésil (Br.)
Walter Collischonn	Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)	Brésil (Br.)
Rodrigo CD Paiva	Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)	Brésil (Br.)
Jorge Molina-Carpio	Instituto de Hidrología e Hidráulica (IHH)	Bolívie (Bo.)
Marcos Andrade	Laboratorio de Física Atmosférica (LFA)	Bolívie (Bo.)
Elisa Armijos	Instituto Geofísico del Perú (IGP)	Pérou (Pe.)
Ricardo Zubieta	Instituto Geofísico del Perú (IGP)	Pérou (Pe.)
Miguel Saavedra	Instituto Geofísico del Perú (IGP)	Pérou (Pe.)
James Apaéstegui	Instituto Geofísico del Perú (IGP)	Pérou (Pe.)
Ken Takahashi	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)	Pérou (Pe.)
Waldo Lavado	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)	Pérou (Pe.)
Raul Espinoza	Universidad Agraria La Molina (UNALM)	Pérou (Pe.)
Lucio Vergara	Autoridad Nacional de Aguas (ANA)	Pérou (Pe.)
Marcos Villacís	Universidad Politecnica Nacional (EPN)	Equateur (Eq.)
Paola Arias	Universidad de Antioquia (Uda)	Colombie (Co.)
Alejandro Martinez	Universidad de Antioquia (Uda)	Colombie (Co.)
Germán Poveda	Universidad Nacional de Colombia (UNC)	Colombie (Co.)

Figure II.11. Distribution géographique du réseau des institutions et chercheurs collaborateurs en Amérique du Sud.

**III. Animation et organisation de la recherche et de
l'enseignement**

1.- Animation de la recherche

1.1. Direction et participation à des projets nationaux et internationaux

- Chercheur principal (PI) du projet AMANECER « AMazon-ANdEs ConnEctivity: impacts of climate-vegetation changes on the hydrology of the Amazon-Andes transition Region » financé par le programme Investissements d'Avenir (ANR) et l'IRD dans le cadre du programme « *Make our Planet Great Again* » du gouvernement français (2018-2022).
- Co-PI du projet « Origine, fréquence et magnitude des "repiquetes", ses impacts sur agriculture amazonienne et sur le transport de sédiments ». Financé par FONDECYT-CONCYTEC Pérou, l'IGP et l'IRD (2020-2022).
- Chercheur principal du projet « Système de prévision des événements hydrologiques extrêmes en Amazonie Péruvienne » Projet N° PIAP-2-P-192-14, financé par PNICP-Perú (INNOVATE-Pérou) et l'IRD (2014-2017).
- Chercheur principal du projet EXPRES-AMAS: Extrêmes hydrométéorologiques en Amazonie: vers un système de PRÉvision Saisonniers dans le bassin AMAzonas-Solimões. Financé par le PPR-Amaz de l'IRD (2013-2014).
- Chercheur principal du projet EXGEA: Expédition multidisciplinaire pour les contrastes géo-climatiques à l'Est des Andes et en Amazonie occidentale. Financé par le PPR-RIVIA de l'IRD (2013-2014).
- Participant au Laboratoire mixte internationale LMI-GREATICE (2012-2019).

1.2. Responsabilités administratives dans des équipes scientifiques

- A partir de 2019 : Co-responsable scientifique (en tant qu'IRD) de l'Annexe Scientifique « Extrêmes hydrométéorologiques, processus géodynamiques superficiels et leurs impacts au Pérou » dans le cadre la convention interinstitutionnelle de coopération scientifique entre IGP et IRD.
- Entre 2011 et 2018 : Co-responsable scientifique (en tant qu'IGP) de l'annexe scientifique « Extrêmes hydrométéorologiques, processus géodynamiques superficiels et leurs impacts au Pérou » dans le cadre de la convention interinstitutionnelle de coopération scientifique entre l'IGP et l'IRD.
- 2017 : Directeur de l'Unité de Recherche en Sciences de l'Atmosphère et l'Hydrosphère de l'IGP (composée de plus de 60 personnes dont 12 chercheurs, avec un budget annuel d'environ 1M euros).
- Entre 2011 et 2018 : Création et direction de l'équipe de recherche Hydrologie et Sols de l'Unité de Recherche en Sciences de l'Atmosphère et l'Hydrosphère de l'IGP. Cette équipe est aujourd'hui composée de cinq chercheurs (dont 2 ont réalisé leurs thèses au Pérou sous mon encadrement). Cette équipe est devenue une référence nationale et régionale en hydrologie.

1.3. Représentation dans des comités scientifiques à caractère scientifique

- Depuis 2020 : Membre du Panel Scientifique pour l'Amazonie ("*The Science Panel for the Amazon – SPA*") sous le support de "*Sustainable Development Solutions Net- work (SDSN) – Nations Unies*".
- Depuis 2016 : Membre nommé de la commission scientifique sectorielle n°1 (CSS1) intitulée "Sciences physiques et chimiques de l'environnement planétaire » de l'IRD pour la période 2016-2020.

- 2019-2020 : Nommé en tant qu'Expert Académique pour le Hcéres (Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur) – France, pour l'évaluation de l'UMR G-EAU Gestion de l'eau, Acteurs et usages.
- Depuis 2018 : Membre du programme hydro-climatique régional « *ANDEX : A Hydroclimate Research Program for the Andes (Argentina, Chile, Peru, Bolivia, Ecuador, Colombia and Venezuela)* ». Avec le support de GEWEX.
- Depuis 2019 : Membre nommé pour l'UNESCO du groupe de travail régional « Hydrogéomorphologie du bassin Andino-Amazonienne », du Programme Hydrologique Regional (PHI) pour l'Amérique Latine et le Caraïbe de l'UNESCO.
- 2017-2019 : Nommé Éditeur-reviseur du rapport spécial du GIEC « Climate Change and Land (SRCCL) ».
- Entre 2012 et 2015 : Membre du comité d'orientation scientifique du Programme Pilote Régional Dynamique environnemental, ressources et société en Amazonie (PPR-Amaz) de l'IRD.
- Entre 2013 et 2018 : Membre de l'Observatoire National des Sécheresses du Pérou. Ministère de l'Agriculture du Pérou.
- Entre 2013 et 2018 : Membre du Comité National du Changement Climatique du Pérou. Ministère de l'Environnement du Pérou.
- Entre 2013 et 2018 : Membre du comité National de la Lutte Contre la Désertification et Sècheresses – CONALDES. Ministère de l'Environnement du Pérou.

1.4 Expertise de manuscrits et de projets scientifiques

- Évaluateur de manuscrits : je suis fréquemment sollicité pour la relecture d'articles dans les plus importants journaux scientifiques de science de la terre et l'environnement. En moyenne je suis *reviewer* de 8 articles par année. J'ai déjà exercé comme reviewer dans :
 - i) Journaux multidisciplinaires : *Nature, Nature of Geosciences, Nature Climate Change, Nature Communications, Nature Sustainability; Environmental Research Letters (ERL), Geophysical Research Letters (GRL).*
 - ii) Journaux en Hydrologie : *Journal of Hydrology, Hydrological Sciences Journal, Water Resources Research, HESS, Hydrological Processes.*
 - iii) Journaux en Climatologie : *Journal of Climate, Climate Dynamics, International Journal of Climatology, Climatic Change, Atmosphere, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Atmospheric Science Letters.*
- Évaluateur expert invité des rapports du GIEC : *Assessment Report AR5 (2014); Assessment Report AR6 (2019).*
- Éditeur de l'édition spéciale « *Rivers of the Andes and the Amazon Basin: Deciphering global change from the hydroclimatic variability in the critical zone* » Publié dans les *Comptes rendus Geoscience* en 2018 (doi:10.1016/j.crte.2018.01.001).
- Évaluateur des projets : Depuis 2018 je suis reviseur des projets proposés par le CONCYTEC-Pérou (Conseil National de science et technologie du Pérou). Dans ce cadre je suis fréquemment sollicité (~10 fois/an) pour évaluer différents projets :

Sciences Basiques, Sciences Appliquées, Mobilités internationales, Bourses de thèse de doctorats, etc.

- Évaluateur de projets : de l'Agence Nationale de la promotion de la science et technologie (ANPCyT) d'Argentine. Évaluateur expert des projets de recherche scientifique (PICTs – 2013).
- En 2019 j'ai été nommé évaluateur des résumés du « *XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* » organisé par l'Association Brésilienne de Ressources Hydriques du Brésil, ABRH.

1.5 Organisation de conférences scientifiques

- Lead-convenir de la session « Recent progress in understanding the hydro-climate system of the Andes: Physical processes and resources for Andean populations ». Présentée dans le cadre du programme hydroclimatique régional ANDEX. EGU General Assembly 2020. Vienna, Autriche.
- Membre du comité scientifique de la conférence « *XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* ». Session « *Sensoriamento remoto da água: perspectivas para a nova era de disponibilidade de informação* », Foz do Iguaçu, Brésil 2019.
- Membre du comité scientifique organisateur de la conférence « *World's Large Rivers Conference* ». Manaus, Brésil 2014.
- Membre du comité scientifique organisateur de la conférence « River coastal and estuarine morphodynamics » Iquitos, Pérou 2015.
- Membre du comité scientifique de la conférence « *Rivers of the Andes and the Amazon Basin : Deciphering global change from the hydroclimatic variability in the critical zone* » organisé par l'Observatoire HYBAM. Cuzco Pérou, 2015.
- Membre du comité scientifique organisateur de la session spéciale « *Seasonal Hydroclimatological Extremes in the Amazon Basin* » dans le « *2013 Meeting of the Americas* », organisé par l'AGU. Cancún, Mexique.

1.6 Distinctions et prix

- Nommé par l'état péruvien pour le prix « ASPIRE-APEC » au titre de la problématique « Disaster Risk Reduction ». 2015.
- Major de la promotion 2002-I de l'Universidad Agraria La Molina (UNALM). Facultad de ingeniería Agrícola. Lima Pérou.
- Prix de la « Publication efficace d'articles scientifiques » en 2015, pour l'article « The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: The role of tropical-subtropical south Atlantic SST gradient. Environm. Res. Lett. 9 124007 doi:10.1088/1748-9326/9/12/124007 ». CONCYTEC-Pérou.
- Prix de la « Publication efficace d'articles scientifiques » en 2017, pour l'article « Evolution of wet- and dry-day frequency in the western Amazon basin: Relationship with atmospheric circulation and impacts on vegetation. *Water Resources Research*. doi: 10.1002/2016WR019305 ». CONCYTEC-Pérou.

2.- Formation et enseignement

2.1. Responsabilité de cours dans des écoles doctorales

- Impacts de la variabilité climatique sur les ressources hydriques (45 h par semestre). Master en Ressources Hydriques – Université Agraria La Molina (UNALM), Pérou. 2011-2018.
- Changement climatique et ressources hydriques (45 h par semestre). Master en Ressources Hydriques – UNALM, Pérou. 2011-2018.
- Séminaire pour la recherche scientifique (introduction à la recherche scientifique) (15 h par semestre). École doctorale en Ressources Hydriques – UNALM, Pérou. 2014-2016.
- Science du changement climatique (45 h par semestre). Master en changement climatique et développement durable – Université Nationale San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). Pérou. 2014-2017.

2.2 Directions de mémoires universitaires (licence et master)

- Jacob Anz. « *Precipitation Time Series and Rainfall-Runoff Coefficients in the Peruvian Amazon Basins* ». Bachelor thesis. Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich. Août 2013. Accepté avec la plus haute qualification. Co-encadrants : JC Espinoza (IGP) et G. Furrer (ETH).
- Ricardo Zubieta Barragán. « Modélisation hydrologique distribuée dans l'Amazonie péruvienne en utilisant des estimations de précipitation des satellites ». Mémoire pour obtenir le diplôme de Master en Ressources Hydriques. Octobre 2013. UNALM, Pérou. Encadrant : JC Espinoza (IGP).
- Hans Segura. « Bilan hydrique dans le bassin de l'Amazone : étude de l'Évapotranspiration ». Mémoire pour obtenir le diplôme d'Ingénieur Agricole. Accepté avec la plus haute qualification. Octobre 2014. UNALM, Pérou. Encadrant : JC Espinoza (IGP).
- Karen León. « Analyse spatio-temporelle des précipitations et débits sur la côte nord du Pérou pendant les événements El Niño extrêmes ». Mémoire pour obtenir le diplôme d'Ingénieur Agricole. Accepté avec la plus haute qualification. Novembre 2014. UNALM, Pérou. Co-encadrants : JC Espinoza (IGP) et E Chavarri (UNALM).
- Laura Giuliana Paccini. « Types de circulation atmosphériques intrasaisonniers de grande échelle, associées à la précipitation dans le bassin de l'Amazone ». Mémoire pour obtenir le diplôme d'Ingénieur en Météorologie. Accepté avec la plus haute qualification. Août 2016. UNALM, Pérou. Co-encadrants : JC Espinoza (IGP) et E Menacho (UNALM).
- Ángela Ampuero. « Évaluation des indicateurs isotopiques des précipitations du bassin de l'Alto Mayo pour son application en hydrologie ». Mémoire pour obtenir le diplôme d'Ingénieur Agricole. Accepté avec la plus haute qualification. Août 2016. UNALM, Pérou. Co-encadrants : JC Espinoza (IGP) et J Apaéstegui (IGP).
- Omar Gutierrez-Cori. « Étude de la variabilité spatio-temporelle des sécheresses en l'Amazonie péruvienne en utilisant des indices dérivés des satellites ». Mémoire pour obtenir le diplôme de Master en Ressources Hydriques. Accepté avec la plus haute qualification. Septembre 2017. UNALM, Pérou. Encadrant : JC Espinoza (IGP).

2.3 Directions et codirection de thèses de 3ème cycle

Au Pérou l'habilitation pour diriger des recherches n'existe pas dans le système universitaire. J'ai donc pu encadrer deux thèses, en ma qualité de professeur visiteur à l'école doctorale de l'Université La Molina (UNALM). Ces thèses ont été valorisées par la publication d'au moins un article scientifique dans des journaux Q1 (d'après SCOPUS). Cela montre le caractère novateur des résultats. Par ailleurs je co-encadre actuellement la thèse de H. Segura à l'ED Terre Univers Environnement de l'UGA.

- Sergio Morera Julca. « Magnitude, fréquence et facteurs qui contrôlent les flux de sédiments des Andes centrales occidentales vers l'océan Pacifique du Pérou. Thèse pour obtenir le diplôme de Docteur en Ressources Hydriques. Accepté avec la plus haute qualification. Avril 2014. UNALM, Pérou. 1 article Q1 publié pendant la thèse. Directeur de thèse : JC Espinoza (IGP), co-encadrant T Condom (IGE).
- Ricardo Zubieta Barragán. « Estimation de la concentration des précipitations journalières et événements hydrologiques extrêmes dans le bassin Andino-Amazonien en utilisant des données de précipitation de satellites ». Thèse pour obtenir le diplôme Docteur en Ressources Hydriques. Accepté avec la plus haute qualification. Avril 2014. UNALM, Pérou. 3 articles Q1 publiés pendant la thèse. Directeur de thèse : JC Espinoza (IGP).
- Hans Segura. « Influence de la circulation atmosphérique régionale et globale sur les précipitations des hauts bassins versants des Andes tropicales ». 2^{em} Année de thèse. 1 article Q1 publié et 1 article Q1 soumis. École doctorale Terre Univers Environnement, UGA, France. Codirection de thèse : T Lebel (IGE), C Junquas (IGE), JC Espinoza (IGE).
- Juan Pablo Sierra Perez. « High-resolution climatic modelling in the Amazon-Andes transition region : Understanding the climate-forest interaction and its implications for rainfall patterns ». 1^{em} Année de thèse. École doctorale Terre Univers Environnement, UGA, France. Codirection de thèse : T Lebel (IGE), C Junquas (IGE), JC Espinoza (IGE).

2.4 Encadrement de post-doctorants

- Sly Wongchuig Correa. « *Climate-forest interaction in the south-western Amazon and its implications for rainfall patterns in the Amazon-Andes transition region* ». Post-doctorat de 36 mois dans le cadre du projet AMANECER. 2019-2022.

2.5 Participations à des jurys de thèse de 3^{ème} cycle

- Sly Wongchuig Correa. « *Hydrological reanalysis for a retrospective analysis through hydrological and hydrodynamic modeling on large scale : A case study of the Amazon Basin* ». Juin 2019. Université Federal do Rio Grande do Sul (URGS), Brésil. Codirection de thèse : RC Dias de Paiva (URGS), W Collischonn (URGS) et Sylvain Biancamaria (LEGOS).
- Victor Chavez Mayta. « *Tropical and Extratropical Wave Disturbances Impact on the Amazon Basin Precipitation : Subseasonal to Intraseasonal Timescales* ». Juin 2019. Université de São Paulo (USP), Brésil. Codirection de thèse : T Ambrizzi (USP) et P Silva Diaz (USP).
- Lise Mourre. « Précipitations dans les Andes tropicales : analyse spatio-temporelle, intercomparaison de forçages et impacts dans un modèle glacio-

hydrologique. Cas du Rio Santa au Pérou ». Décembre 2014. *Université Grenoble-Alpes, France*. Direction de thèse : T Condom (IGE).

- Cinthya Ramallo. « Caractérisation du régime pluviométrique et relation avec la fonte du glacier du Zongo (Cordillère Royale) ». Décembre 2013. *Université Joseph Fourier, Grenoble France*. Codirection de thèse : T Lebel (IGE) y JE Sicart (IGE).
- María Alejandra Carmona Duque. « *Impacts of climate change and climate variability on the spatio-temporal hydrological dynamics of Amazonia* ». Mars 2015. *Universidad Nacional de Colombia-Medellín*. Direction de thèse: G Poveda (UNC).

IV. Titres et travaux

1.- Publications dans des revues internationales à comité de lecture

Total des articles publiés dans des journaux internationaux sous *peer-review* : 64



Figure IV.1. Indices bibliométriques d'après SCOPUS, le 02 juin 2020.

Journals published in

(8) Climate Dynamics WOS	(8) International Journal of Climatology WOS
(7) Bulletin of the American Meteorological Society WOS	(5) Journal of Hydrology WOS
(4) Environmental Research Letters WOS	(3) Hydrological Sciences Journal WOS
(3) Water WOS	(3) Water Resources Research WOS
(2) Comptes Rendus - Geoscience WOS	(2) Frontiers in Earth Science WOS
(2) Geophysical Research Letters WOS	(2) Hydrological Processes WOS
(2) Hydrology and Earth System Sciences WOS	(2) IAHS-AISH Publication
(1) Atmospheric Research WOS	(1) Climate of the Past WOS
(1) Earth and Planetary Science Letters WOS	(1) Environmental Research Communications
(1) Global and Planetary Change WOS	(1) Iahs Publication
(1) International Journal of Applied Earth Observatio... WOS	(1) Journal of Geophysical Research: Atmospheres WOS
(1) Journal of Hydrology-regional Studies	(1) Journal of Hydrology: Regional Studies WOS
(1) Journal of Hydrometeorology WOS	(1) Quarterly Journal of the Royal Meteorological So... WOS
(1) Revista Brasileira de Meteorologia	(1) Science Advances WOS

Figure IV.2. Nombre de mes publications par journaux scientifiques, d'après Web of Science, le 02 juin 2020.

* Articles d'étudiants (co)encadrés par JC Espinoza.

◉ Articles cités plus de 100 fois (Google Scholar).

Articles soumis et en révision

- R-4 Arias PA., Garreaud R., Poveda G., **Espinoza JC.**, Molina-Carpio J., Masiokas M., Viale M., Scaff L. Review Paper. Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate variability and sub-continental patterns. Submitted to *Frontiers in Earth Science*.
- R-3 Arias PA., Martinez JA., Mejía JD., Pazos MJ., **Espinoza JC.** Linking tropical Atlantic surface temperatures to changes in Normalized Difference Vegetation Index in the Orinoco and Amazon River basins. In revision. *Journal of Climate*.
- R-2*** Segura H., Espinoza JC., Junquas C., Lebel T., Vuille M., Condom T. Extreme austral winter precipitation events over the South-American Altiplano: Regional Atmospheric Features. Submitted to *Climate Dynamics*.
- R-1*** Mayta VC., Silva NP., Ambrizzi T., Silva-Dias PL., **Espinoza JC.** Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin and its relationship with low and high frequency phenomena: A focus on the Intraseasonal variability. In revision. *Climate Dynamics*.

Articles publiés

- 2020-8 **Espinoza JC.**, Garreaud R., Poveda G., Arias PA., Molina-Carpio J., Masiokas M., Viale M. Scaff L. 2020. Review Article. Hydroclimate of the Andes Part I: Main Climatic Features. *Front. Earth Sci.* 8:64. doi: [10.3389/feart.2020.00064](https://doi.org/10.3389/feart.2020.00064).
- 2020-7*** Segura H., **Espinoza JC.**, Junquas C., Lebel T., Vuille M., Garreau R. 2020. Recent changes in the precipitation-driving processes over the southern tropical Andes/western Amazon. *Climate Dynamics*. doi: [10.1007/s00382-020-05132-6](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05132-6)
- 2020-6 Poveda G., **Espinoza JC.**, Zuluaga M., Solman S., Garreaud R. *van Oevelen PJ.* 2020. Review Paper. High Impact Weather Events in the Andes. *Front. Earth Sci.* 8:162. doi: [10.3389/feart.2020.00162](https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162)
- 2020-5 Armijos E., Crave A., **Espinoza JC.**, Filizola N., Espinoza-Villar R., Ayes I., Fonseca P., Fraizy P., Gutierrez-Cori O., Vauchel P., Camenen B., Martinez JM., dos Santos A., Santini W., Cochonneau G., Guyot JL. 2020. Rainfall control on Amazon sediment flux: synthesis from 20 years of monitoring. *Environ. Res. Commun.* 2 051008. doi: [10.1088/2515-7620/ab9003](https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab9003)
- 2020-4 Pabón-Caicedo JD, Arias PA, Carril AF, **Espinoza JC**, Borrel LF, Goubanova K, Lavado-Casimiro W, Masiokas M, Solman S and Villalba R. 2020. Review Article. Observed and Projected Hydroclimate Changes in the Andes. *Front. Earth Sci.* 8:61. doi: [10.3389/feart.2020.00061](https://doi.org/10.3389/feart.2020.00061)
- 2020-3*** Mayta VC., Silva NP., Ambrizzi T., Silva-Dias P., **Espinoza JC.** 2020. Assessing the skill of all-season diverse Madden-Julian oscillation indices for the intraseasonal Amazon precipitation. *Climate Dynamics*. doi: [10.1007/s00382-020-05202-9](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05202-9).
- 2020-2 Ruiz-Vasquez M. Arias PA., Martinez JA., **Espinoza JC.** 2020. Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*. doi: [10.1007/s00382-020-05223-4](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4)
- 2020-1*** Ampuero A., Strikis N., Apaéstegui J., Vuille M., Novello VF., **Espinoza JC.**, Cruz FW., Vonhoff H., Mayta VC., Martins VTS., Campello RC., Alves V., Siffedine A. 2020. The forest effects on the isotopic composition of rainfall in the northwestern Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD031445. <https://doi.org/10.1029/2019JD031445>
- 2019-10 **Espinoza JC.**, Sörensson A., Ronchail J., Molina-Carpio J., Segura H., Gutierrez-Cori O., Ruscica R., Condom T., Wongchuig-Correa S. 2019b. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982-2017 period. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. doi: [10.1016/j.ejrh.2019.100637](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100637).

- 2019-9 Ayes Rivera I., Poduje ACC., Molina-Carpio J., Ayala JM., Armijos E., Espinoza-Villar R., **Espinoza JC.**, Gutierrez-Cori O., Filizola N. 2019. On the Relationship between Suspended Sediment Concentration, Rainfall Variability and Groundwater: An Empirical and Probabilistic Analysis for the Andean Beni River, Bolivia (2003–2016). *Water*, 11, 2497. doi:10.3390/w11122497.
- 2019-8 Moquet JS., Morera SB., Turcq B., Poitrasson F., Roddaz M. Moreira-Turcq P., **Espinoza JC.**, Guyot JL., Takahashi K., Orrillo JD., Petrick S., Mounic S, Sondag F. Control of seasonal and inter-annual rainfall distribution on the Strontium-Neodymium isotopic compositions of suspended particulate matter and implications for tracing ENSO events in the Pacific coast (Tumbes basin, Peru). *Global and Planetary Change*. doi : [10.1016/j.gloplacha.2019.103080](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103080).
- 2019-7 **Espinoza JC.**, Ronchail J., Marengo JA., Segura H. 2019a. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-018-4462-2.
- 2019-6 Saavedra M., Junquas C., **Espinoza JC.**, Silva Y. Impacts of topography and land use change on the air surface temperature and precipitation over the central Peruvian Andes. In press. *Atmospheric Research*. doi: [10.1016/j.atmosres.2019.104711](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104711).
- 2019-5 Marengo JA., **Espinoza JC.**, Alves LM., Ronchail J., Lavado-Casimiro W, Ramos I., Dávila C., Ramos AM., Dizin FA. 2019 [Regional Climates] Central South America [in “State of the Climate in 2018”]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 100(9), Si–S305, doi:10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1.
- 2019-4*** Segura H., Junquas C., **Espinoza JC.**, Vuille M., Jauregui YR., Rabatel A., Condom T., Lebel T. 2019. New insights into the rainfall variability in the tropical Andes on seasonal and interannual time scales. *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-018-4590-8.
- 2019-3 Aguilar-Lome J., Espinoza-Villar R., **Espinoza JC.**, Rojas-Acuña J., Willems BL., Leyva-Molina WM. 2019. Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000–2017). *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 77, 119-128. doi: 10.1016/j.jag.2018.12.013.
- 2019-2*** Zubieta R., Saavedra M., **Espinoza JC.**, Ronchail J., Sulca J., Drapeau G., Martin-Vides J. 2019. Assessing precipitation concentration in the Amazon basin from different satellite-based datasets. *Int. Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.6009.
- 2019-1 Ayes Rivera I., Armijos Cardenas E., Espinoza-Villar R, **Espinoza JC.**, Molina-Carpio J., Ayala JM., Gutierrez-Cori O., Martinez JM., Filizola N. 2019. Decline of Fine Suspended Sediments in the Madeira River Basin (2003–2017). *Water*, 11, 514. doi: 10.3390/w11030514.
- 2018-9 Junquas C., Takahashi K., Condom T., **Espinoza JC.**, Chavez S. Sicart JE., Lebel T. 2018. Understanding the influence of orography over the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-017-3858-8.
- 2018-8 Barichivich J., Gloor E., Peylin P., Brienen RJW., Schönegart J., **Espinoza JC.**, Pattnayak KC. 2018. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation, *Science Advances*, 4, doi:10.1126/sciadv.aat8785.
- 2018-7*** Mayta VC., Ambrizzi T., **Espinoza JC.**, Silva Dias PL. 2018. The role of the Madden–Julian oscillation on the Amazon Basin intraseasonal rainfall variability. *Int J Clim.* <https://doi.org/10.1002/joc.5810>.
- 2018-6 Marengo JA., **Espinoza JC.**, Ronchail J., Alves LM., Baez J., Takahashi K., Lavado-Casimiro W. 2018 [Regional Climates] Central South America [in “State of the Climate in 2017”]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99(8), S205-S207. doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1.
- 2018-5 Ronchail J., **Espinoza JC.**, Guimberteau M., Manon S., Cochonneau G., Schor T. 2018. The flood recession period in Western Amazonia and its variability during the 1985–2015 period. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15. 16-30. doi: 10.1016/j.ejrh.2017.11.008.
- 2018-4 Moreira-Turcq P., **Espinoza JC.**, Filizola N., Martinez JM. 2018. Rivers of the Andes and the Amazon Basin: Deciphering global change from the hydroclimatic variability in the critical zone. *CR Geoscience*. 350, Issues 1–2 (1-3). doi:10.1016/j.crte.2018.01.001.

- 2018-3 Sulca J., Vuille M., Roundy P., Takahashi K., **Espinoza JC.**, Silva Y., Zubieta R. 2018. Climatology of Extreme Cold Events in the central Peruvian Andes during Austral Summer: Origin, Types, and Teleconnections. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. doi: 10.1002/qj.3398.
- 2018-2 Rodriguez-Morata C., Ballesteros-Canovas JA., Rohrer M., **Espinoza JC.**, Beniston M., Stoffel M. 2018. Linking atmospheric circulation patterns with hydro-geomorphic disasters in Peru. *Int. Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.5507.
- 2018-1 Apaéstegui J., Cruz FW., Vuille M., Fohlmeister J., **Espinoza JC.**, Sifeddine A., Strikis N., Guyot JL., Ventura R., Cheng H., Edwards RL. 2018. Precipitation changes over the eastern Bolivian Andes inferred from speleothem ($\delta^{18}O$) records for the last 1400 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 494, 124–134. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.048>.
- 2017-9 Molina-Carpio J., **Espinoza JC.**, Vauchel P., Ronchail J., Gutierrez B., Guyot JL., Noriega L. 2017. The hydroclimatology of the upper Madeira River basin: spatio-temporal variability and trends (1967-2013). *Hydrological Sciences Journal*. doi: 10.1080/02626667.2016.126786.
- 2017-8*** Paccini L., **Espinoza JC.**, Ronchail J., Segura H. 2017. Intraseasonal rainfall variability in the Amazon basin related to large-scale circulation patterns: A focus on western Amazon-Andes transition region. *Int. Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.5341.
- 2017-7 Wongchuig-Correa S., de Paiva RCD., **Espinoza JC.**, Collischonn W. 2017. Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts, *Journal of Hydrology*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.04.019.
- 2017-6 Espinoza-Villar R., Martinez JM., Armijos E., **Espinoza JC.**, Filizola N., Dos Santos A., Willems B., Fraizy P., Santini W., Vauchel, P. 2017. Spatio-temporal monitoring of suspended sediment in Solimões River (2000 - 2014). *Comptes Rendus Geoscience*. doi: 10.1016/j.crte.2017.05.001.
- 2017-5 Sulca J., Takahashi K., **Espinoza JC.**, Vuille M., Lavado-Casimiro W. 2017. Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. *Int. Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.5185.
- 2017-4*** Zubieta R., Getirana A., **Espinoza JC.**, Lavado-Casimiro W., Aragon L. 2017. Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3543-3555, <https://doi.org/10.5194/hess-21-3543-2017>.
- 2017-3 Vauchel P., Santini W., Guyot JL., Moquet JS., Martinez JM., **Espinoza JC.**, Baby P., Fuertes O., Noriega L., Puita O., Sondag F., Fraizy P., Armijos E., Cochonneau G., Timouk F., de Oliveira E., Filizola N., Molina J., Ronchail J. 2017. A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River Basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme. *Journal of Hydrology*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.018>.
- 2017-2 Marengo JA., **Espinoza JC.**, Ronchail J., Alves LM., Baez J. 2017. [Regional Climates] Central South America [in "State of the Climate in 2016"]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 98(8), S187-S190.
- 2017-1 Bouchez J., Moquet JS., **Espinoza JC.**, Martinez JM., Guyot JL., Lagane C., Filizola N., Noriega L., Hidalgo Sanchez L., Pombosa R. 2017. River mixing in the Amazon as a driver of concentration discharge relationships. *Water Resource Research*. doi: 10.1002/2017WR020591.
- 2016-6^o** Marengo JA. and **Espinoza JC.** 2016. Review Article. Extreme Seasonal Droughts and Floods in Amazonia: Causes, Trends and Impacts. *International Journal of Climatology*. doi:10.1002/joc.4420.
- 2016-5 **Espinoza JC.**, Segura H., Ronchail J., Drapeau G., Gutierrez-Cori O. 2016. Evolution of wet- and dry-day frequency in the western Amazon basin: Relationship with atmospheric circulation and impacts on vegetation. *Water Resources Research*. doi: 10.1002/2016WR019305.
- 2016-4 Sicart JE., **Espinoza JC.**, Queno L., Medina M. 2016. Radiative properties of clouds over a tropical Bolivian glacier: seasonal variations and relationship with regional atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.4540.

- 2016-3*** Segura H., **Espinoza JC.**, Junquas C., Takahashi K. 2016. Evidencing Decadal and Interdecadal Hydroclimatic Variability over the Central Andes. *Environmental Research Letters*. 11 094016. doi:10.1088/1748-9326/11/9/094016.
- 2016-2 Marengo JA., **Espinoza JC.**, Ronchail J., Alves LM. 2016. [Regional Climates] Tropical South America east of the Andes [in "State of the Climate in 2015"]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 97(8), S184-S185.
- 2016-1 Ronchail J., Schor T., **Espinoza JC.**, Sabot M., Pinheiro H., Gomez P., Drapeau G., Michot V., Filizola N., Guyot JL., Sultan B., Martinez JM. 2016. Hydrologie et production agricole dans le nord-ouest de l'Amazonie. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 3, 270-286.
- 2015-3º** **Espinoza JC.**, Chavez S., Ronchail J., Junquas C., Takahashi K., Lavado W. 2015. Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resources Res.* 51, doi:10.1002/2014WR016273.
- 2015-2*** Zubieta R., Getirana ACV., **Espinoza JC.**, Lavado W. 2015. Impacts of satellite-based precipitation datasets on rainfall–runoff modeling of the Western Amazon basin of Peru and Ecuador. *Journal of Hydrology*, 528, 599-612. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.06.064.
- 2015-1 Marengo JA., **Espinoza JC.**, Ronchail J., Alves LM. 2015. [Regional Climates] Tropical South America east of the Andes [in "State of the Climate in 2014"]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 96 (7), S179-S181.
- 2014-4º** **Espinoza JC.**, Marengo JA., Ronchail J., Molina-Carpio J., Noriega L., Guyot JL. 2014. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: The role of tropical-subtropical south Atlantic SST gradient. *Environm. Res. Lett.* 9 124007 doi:10.1088/1748-9326/9/12/124007.
- 2014-3 Apaéstegui J., Cruz FW., Sifeddine A., Vuille M., **Espinoza JC.**, Guyot JL., Khodri M., Strikis N., Santos RV., Cheng H., Edwards L., Carvalho E., Santini W. 2014. Hydroclimate variability of the north-western Amazon basin near the Andean foothills of Peru during the last 1600 years. *Climate of the Past*, 10, 1967-1981. doi:10.5194/cp-10-1967-2014.
- 2014-2 Marengo JA., Alves LM., **Espinoza JC.**, Ronchail J. 2014. [Regional Climates] Tropical South America east of the Andes [in "State of the Climate in 2013"]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95 (7), S170–S171.
- 2014-1 Lavado W. and **Espinoza JC.** 2014. Impact of El Niño and La Niña events on Rainfall in Peru. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.29, 171 – 182. DIO: 10.1590/S0102-77862014000200003.
- 2013-5º** **Espinoza JC.**, Ronchail J., Frappart F., Lavado W., Santini W., Guyot JL. 2013a. The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970 – 2012 period: A focus on the 2012 flood. *Journal of Hydrometeorology*, 14, 1000-1008. doi: 10.1175/JHM-D-12-0100.1.
- 2013-4 **Espinoza JC.**, Ronchail J., Lengaigne M., Quispe N., Silva Y., Bettolli ML., Avalos G., Llacza A. 2013b. Revisiting wintertime cold air intrusions at the East of the Andes: Propagating features from subtropical Argentina to Peruvian Amazon and relationship with large-scale circulation patterns. *Climate Dynamics* 41, 1983-2002. doi: 10.1007/s00382-012-1639-y.
- 2013-3 Guimberteau M., Ronchail J., **Espinoza JC.**, Lengaigne M., Sultan B., Polcher J., Drapeau G., Guyot JL., Ducharne A., Cialis P. 2013. Future changes in precipitation and impacts on extreme streamflow over Amazonian sub-basins. *Environmental Research Letters* 8 01403. doi:10.1088/1748-9326/8/1/014035.
- 2013-2º** Gloor M., Brienens RJW., Galbraith D., Feldpausch TR., Schöngart J., Guyot JL., **Espinoza JC.**, Lloyd J., Phillips OL. 2013. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*. 40, 1-5. doi: 10.1002/grl.50377.
- 2013-1º** Lavado-Casimiro W., Labat D., Ronchail J., **Espinoza JC.**, Guyot JL. 2013. Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965-2007). *Hydrological Processes*. 41, 2944-2957. doi: 10.1002/hyp.9418.
- 2012-5 **Espinoza JC.**, Ronchail J., Guyot JL., Junquas C., Drapeau G., Martinez JM., Santini W., Vauchel P., Lavado W., Ordoñez J., Espinoza R. 2012a. From drought to flooding: understanding the abrupt 2010-2011 hydrological annual cycle in the Amazonas River and tributaries. *Environmental Research Letters* 7 024008. doi:10.1088/1748-9326/7/2/024008.

- 2012-4 **Espinoza JC.**, Lengaigne M., Ronchail J., Janicot S. 2012b. Large-Scale circulation Patterns and related rainfall in the Amazon basin: a Neuronal Networks approach. *Climate Dynamics*. 38. 121-140. doi. 10.1007/s00382-011-1010-8.
- 2012-3^o** Lavado-Casimiro W., Ronchail J., Labat D., **Espinoza JC.**, Guyot JL. 2012. A basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969-2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*. 57(4) 1-18. doi:10.1080/02626667.2012.672985.
- 2012-2 Guimberteau M., Drapeau G., Ronchail J., Sultan B., Polcher J., Martinez JM., Prigent C., Guyot JL., Cochonneau G., **Espinoza JC.**, Filizola N., Fraizy P., Lavado W., De Oliveira E., Pombosa R., Noriega L., Vauchel P. 2012. Discharge simulation in the sub-basins of the Amazon using ORCHIDEE forced by new datasets, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 911-935, doi:10.5194/hess-16-911-2012.
- 2012-1 Labat D., **Espinoza JC.**, Ronchail J., Cochonneau G., de Oliveira E., Doudou JC., Guyot JL., 2012. Fluctuations in the monthly discharge of Guyana shield rivers, related to Pacific and Atlantic climate variability. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (6), 1–11.
- 2011-3^o** **Espinoza JC.**, Ronchail J., Guyot JL., Junquas C., Vauchel P., Lavado W., Drapeau G., Pombosa R. 2011. Climate variability and extremes drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13406, doi:10.1029/2011GL047862.
- 2011-2^o** Condom T., Rau P., **Espinoza JC.** 2011. Correction of the TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998–2007. *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.7949.
- 2011-1 Getirana ACV., **Espinoza JC.**, Ronchail J., Rotunno Filho OC. 2011. Assessment of different precipitation datasets and their impacts on the water balance of the Negro River basin. *Journal of Hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.04.037.
- 2009-2^o** **Espinoza JC.**, Ronchail J., Guyot JL., Cocheneau G., Filizola N, Lavado W., de Oliveira E., Pombosa R., Vauchel P. 2009a. Spatio – Temporal rainfall variability in the Amazon Basin Countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29, 1574-1594.
- 2009-1^o** **Espinoza JC.**, Guyot JL, Ronchail J., Cocheneau G., Filizola N., Fraizy P., Labat D., de Oliveira E., Ordoñez, JJ. and Vauchel P. 2009b. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon Basin. *Journal of Hydrology*, 375, 297-311.

2.- Rapports internationaux

- IPCC. 2019. An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (SRCCL). *Review Editor of Chapter 2* (Land-Climate interactions).

3.- Chapitres de livres

- Ronchail J., **Espinoza JC.**, Drapeau G., Michot V. Filizola N. 2016. Hidroclimatologia no entorno da tríplice fronteira Brasil-Colombia-Peru. Dinâmica urbana na Amazônia brasileira. Ed. Tatiana Schor 265pp.
- Salas-Gismondi R., Baby P., Roncal J, Junquas C., **Espinoza JC.**, et al. 2014. Control geológico y climático del sistema Andino-Amazónico y de su biodiversidad. *El Perú Frente al cambio climático: Resultados de investigaciones franco-peruanas*. Ed. A Grégoire.158pp.
- Espinoza JC., Ronchail J., Guimberteau., Guyot JL., Lavado W., Santini W. 2014. Eventos hidrológicos extremos en la cuenca amazónica peruana: presente y futuro *El Perú Frente al cambio climático: Resultados de investigaciones franco-peruanas*. Ed. A Grégoire. 158pp.
- Santini W., Guyot JL., Lavado W., **Espinoza JC.**, et al. 2014. HYBAM: un observatorio para medir el impacto del Cambio Climático sobre la erosión y los flujos de sedimentos en la zona Andino-Amazónica. *El*

- Perú Frente al cambio climático: Resultados de investigaciones franco-peruanas. Ed. A Grégoire. 158pp.
- Dewitte B., Takahashi K., Goubanova K., Montecinos A., Mosquera K., Illig S., Montes I., Paulmier A., Garçon V., Purca S., Flores R., Bourrel L., Rau P., Labat D., Lavado W., **Espinoza JC.**, 2014. Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú. El Perú Frente al cambio climático: Resultados de investigaciones franco-peruanas. Ed. A Grégoire. 158pp.
- Ronchail J., **Espinoza JC.**, Labat D., Callède J., Lavado W. 2014. Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el siglo XX. En [Línea base de conocimientos sobre los recursos hídricos e hidrobiológicos en el sistema TDPS con enfoque en la Cuenca del lago Titicaca]. Eds. Pouilly, Lazzaro, Point and Aguirre. IRD-UICN. 310p.
- Getirana ACV, **Espinoza JC.**, Ronchail J., Rotunno-Filho OC., Mansur WJ. 2013. Assessment of different precipitation datasets and their implications for the water balance of the Negro River basin. In: WATER AND CLIMATE modeling in large basins. Vieira da Silva RC, Tucci CEM and Scott CA (Ed). ABRH. São Paulo, Brazil.
- Filizola N, Cândido L, Manzi A, **Espinoza JC**, Ronchail J, Guyot JL. En : Amazonía y Agua. Desarrollo sostenible en el siglo XXI. Etxea editorial service – UNESCO. Bernal H., Sierra C., Angulo M. (Ed).
- Espinoza JC., Yerren Suarez, J., & Ronchail, J. 2004. Estudio de la precipitación en la cuenca del río Marañón y el amazonas peruano. En: 30 Años del IRD en Ecuador. P.Gondard (Ed). 345pp.

4.- Articles dans des actes de congrès

- Espinoza JC, Ronchail J., Lavado W., Carranza J., Cochonneau G., De Oliveira E., Pombosa R. Vauchel P., Guyot J.L. 2010. Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional. Un enfoque particular sobre la región andina. Revista Peruana Geo-Atmosférica, 2, 99 – 130
- Espinoza JC, Lavado W., Ordoñez J., Fraizy P., Guyot J.L., Ronchail J., Vauchel P., Cochonneau G., Filizola N., Labat D., De Oliveira E. 2010. Evolución regional de los caudales en el conjunto de la cuenca del Amazonas para el periodo 1974-2004 y su relación con factores climáticos. Revista Peruana Geo-Atmosférica, 1, 66 - 89.
- Espinoza JC., Ronchail J., Lavado W.S., Santini W., Vauchel P., Pombosa R. Villacís M., Carranza J., Junquas C., Drapeau G., Guyot J.L. 2011. Las recientes sequías en la cuenca amazónica peruana: Orígenes climáticos e impactos hidrológicos. REVISTA PERUANA GEO-ATMOSFÉRICA RPGA (3), 63-72 (2011)
- Espinoza JC, Ronchail J. et Lengaigne M. 2009. Types de temps et pluie en Amazonie. 22ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 1-5 septembre 2009, Cluj-Napoca (Roumanie).
- Espinoza JC., Guyot J.L., Ronchail J., Cochonneau G., Filizola N., Fraizy P., Labat D., Noriega L., Ordonez Galves J.J., de Oliveira E., Pombosa R., Vauchel P. (2008). Regional runoff changes in the Amazon Basin and relationships with rainfall (1974-2004). International scientific conference Amazon in perspective. Integrated science for a sustainable future. LBA/GEOMA/PPBio. 17- 20 November 2008. Manaus Brazil.
- Espinoza JC., Guyot J.L., Ronchail J., Cochonneau G., Filizola N., Fraizy P., Labat D., Noriega L., Ordonez Galves J.J., de Oliveira E., Pombosa R., Vauchel P. (2008). Abrupt and contrasting regional runoff changes in the Amazon Basin (1974-2004). 13th World water congress. Montpellier-France. 1-4 september 2008.
- Espinoza JC., Lengaigne M., Ronchail J., Guyot J.L., Janicot S., Vauchel P. (2008). Weather regimes in Andean regions of the Amazon basin and their capability to explain rainfall and discharge (1974-2004). 4th Alexander Von Humboldt International Conference. Santiago Chile. 25 November 2008.
- Espinoza JC., Guyot J.L., Ronchail J., Noriega J., Ordonez Galves J.J., Pombosa R., Vauchel P., Fraizy P. (2007). Hydroclimatic variability in the Andean region of Amazon Basin. 2007. Poster

presentation. session HW 3008 Changes to Hydrological Extremes and Water Quality - IUGG 2007 Perugia. 12 juillet 2007.

- Espinoza JC., Fraizy P., Guyot J.L., Ordoñez J.J., Pombosa R., Ronchail J. (2006). La variabilité des débits du Rio Amazonas au Pérou. *Climate variability and Change – Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006)*, IAHS Publ. 308, 2006, 424-429.
- Espinoza JC., Guyot J.L., Ronchail J., Noriega L., Ordonez Galves J.J., Pombosa R., Romero H. (2006). Structure spatiale et temporelle des pluies dans le bassin amazonien. Les risques liés au temps et au climat (Actes du XIX Colloque International de Climatologie, tenu à Epernay en septembre 2006), AIC Publ., 19, 232-237.
- Ronchail J., Ngo-Duct., Getirana A., **Espinoza JC.**, Guyot JL., Drapeau G. 2010. Fichiers de pluies et modélisation hydrologique: Application en Amazonie. 23ième Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes 2010
- Ronchail J., Guyot JL., **Espinoza JC.**, Callède J., Cochonneau G., De Oliveira E., Ordeñez JJ., Filizola N. 2006. Impact of the Amazon tributaries on flooding in Obidos. *Climate variability and Change – Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006)*, IAHS Publ. 308, 2006, 220-225.
- Ronchail J., Cochonneau G., Guyot JL., **Espinoza JC.**, de Oliveira E., Noriega L., Ordonez Galvez J.J., Romero H. 2006. Variabilité à long terme des pluies en Amérique du sud tropicale. Les risques liés au temps et au climat (Actes du XIX Colloque International de Climatologie, tenu à Epernay en septembre 2006), AIC Publ., 19, 493-497.

5.- Communications invitées lors de conférences et congrès internationaux

- Espinoza JC. Amazon-Andes connectivity in the context of the climate change. Anniversary of l'INAIGEM – Peru. Cusco, December 2019, Peru.
- Espinoza JC. Understanding Amazon-Andes connectivity. In the 1st ANDEX meeting. GEWEX-Events. 22-24 October, 2018. Santiago, Chile.
- Espinoza JC. Hydrological evolution of the Amazon Basin and perspectives in the context of the climate change. 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop, December 3-9, 2016. Quito, Ecuador.
- Espinoza JC. SO-HYBAM Observatory: Monitoring the extreme seasonal hydrological events in the Amazon Basin. In the 10th European Development days (EDD). 15-16 June 2016, Brussels, Belgium.
- Espinoza JC. Mechanisms behind the recent extreme hydrological events (droughts and floods) in Amazonia. International Workshop "Tree rings, isotopes and recent climate change in the Amazon basin". 25-29 January 2016. INPA, Manaus, Brazil.
- Espinoza JC. Hybam observatory. Monitoring the extreme hydrological events in amazonia: from science to policy-makers. In "From science to policy: contributions from science to the management of water resources, biodiversity and climate change" Official Side Event. COP21. 30th November 2015. Paris, France.
- Espinoza JC. Extreme seasonal hydrological events in the Amazon Basin. Parallel Session: Extreme hydrological events: Deciphering changes in hazard and risk at different time-scales. July 07th 2015. In Our Common Future Under Climate Change. International Scientific Conference. 7-10 July 2015 Paris, France.
- Espinoza JC. Extreme events and Climate Change issues for tropical South America. Side event: Observatories, a Key Tool to Tackle Climate Changes in Tropical Regions. December 10th 2014. In COP-20. Lima, Peru.
- Espinoza JC. The recent extreme hydrological events in the upper Amazon basin. PARALLEL THEMATIC SESSIONS I. "Amazonia, Biodiversity and Sustainable Development". World Science Forum. November 2013., Rio de Janeiro, Brazil.

- Espinoza JC., Ronchail J., Lavado W.S., Guyot J.L., Santini W. The recent extreme hydrological events in the Western Amazon Basin: The role of the Pacific and Atlantic Oceans. Meeting of the Americas. American Geophysical Union. 14-17 may 2013. Cancun, Mexico.
- Espinoza JC., Guyot J.L., Ronchail J. Variabilidad hidroclimática en la Cuenca amazónica. III Coloquio Internacional de la Red de Investigación sobre la Ictiofauna Amazónica – RIIA. 8-12 de November de 2011. Leticia, Colombia.
- Espinoza JC., Ronchail J., Guyot J.L., Junquas C., Vauchel P., Lavado W.S., Drapeau G., Pombosa R. Extreme drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin). Fires in Western Amazonia: The Effects of Climatic, Social, Demographic, and Land Use Changes on Fire Incidence and Fire Hazards. 19-22 August 2011. Pucallpa, Peru.
- Espinoza JC, Ronchail J, Lavado W, Cochonneau G, De Oliveira E, Filizola N, Fraizy P, León JG, Molina J, Noriega L, Pombosa R, Vauchel P, Guyot JL. Toward a better comprehension of hydro-climatic variability in the Andean-Amazon basins. The Meeting of the Americas. AGU. 8-12 August 2010. Foz do Iguaçu.

V. Bibliographie

- Aguilar-Lome J., Espinoza-Villar R., Espinoza JC., Rojas-Acuña J., Willems BL., Leyva-Molina WM. 2019. Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000–2017). *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 77, 119-128. doi: 10.1016/j.jag.2018.12.013.
- Alves LM., Marengo JA., Fu R., Bombardi RJ. 2017. Sensitivity of amazon regional climate to deforestation. *American Journal of Climate Change* 6(01):75-98.
- Ampuero A., Strikis N., Apaéstegui J., Vuille M., Novello VF., Espinoza JC., Cruz FW., Vonhoff H., Mayta VC., Martins VTS., Campello RC., Alves V., Siffedine A. 2020. The forest effects on the isotopic composition of rainfall in the northwestern Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD031445. <https://doi.org/10.1029/2019JD031445>
- Apaéstegui J., Cruz FW., Siffedine A., Vuille M., Espinoza JC., Guyot JL., Khodri M., Strikis N., Santos RV., Cheng H., Edwards L., Carvalho E., Santini W. 2014. Hydroclimate variability of the north-western Amazon basin near the Andean foothills of Peru during the last 1600 years. *Climate of the Past*, 10, 1967-1981. doi:10.5194/cp-10-1967-2014.
- Apaéstegui J., Cruz FW., Vuille M., Fohlmeister J., Espinoza JC, Siffedine A., Strikis N., Guyot JL., Ventura R., Cheng H., Edwards RL. 2018. Precipitation changes over the eastern Bolivian Andes inferred from speleothem ($\delta^{18}O$) records for the last 1400 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 494, 124–134. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.048>.
- Arias PA., Fu R., Vera C., Rojas M. 2015. A correlated shortening of the north and south american monsoon seasons in the past few decades. *Climate dynamics* 45(11-12):3183-3203.
- Armijos E., Crave A., **Espinoza JC.**, Filizola N., Espinoza-Villar R., Ayes I., Fonseca P., Fraizy P., Gutierrez-Cori O., Vauchel P., Camenen B., Martinez JM., dos Santos A., Santini W., Cochonneau G., Guyot JL. 2020. Rainfall control on Amazon sediment flux: synthesis from 20 years of monitoring. *Environ. Res. Commun.* 2 051008. doi: 10.1088/2515-7620/ab9003
- Ayes-Rivera I., Armijos Cardenas E., Espinoza-Villar R, Espinoza JC., Molina-Carpio J., Ayala JM., Gutierrez-Cori O., Martinez JM., Filizola N. 2019a. Decline of Fine Suspended Sediments in the Madeira River Basin (2003–2017). *Water*, 11, 514. doi: 10.3390/w11030514.
- Ayes Rivera I., Poduje ACC., Molina-Carpio J., Ayala JM., Armijos E., Espinoza-Villar R., Espinoza JC., Gutierrez-Cori O., Filizola N. 2019b. On the Relationship between Suspended Sediment Concentration, Rainfall Variability and Groundwater: An Empirical and Probabilistic Analysis for the Andean Beni River, Bolivia (2003–2016). *Water*, 11, 2497. doi:10.3390/w11122497.
- Bagley JE., Desai AR., Harding KJ., Snyder PK., Foley JA. 2014. Drought and deforestation: has land cover change in unced recent precipitation extremes in the amazon? *Journal of Climate* 27(1):345-361.
- Baraer, M. Mark BG., McKenzie JM., Condom T., Huht, KI. Portocarrero C., Gomez, RJ., Rathayt S. 2012. Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology* 58(207), 134-150. Doi:10.3189/2012JoG11J186.
- Barichivich J., Gloor E., Peylin P., Brienens RJW., Schönegart J., Espinoza JC., Pattnayak KC. 2018. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation, *Science Advances*, 4, doi:10.1126/sciadv.aat8785.
- Blázquez, J. and Nuñez MN. 2013. Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. *Climate Dynamics*, 41(3-4), 1039-1056.
- Boisier JP., Ciais P., Ducharne A., Guimberteau M. 2015. Projected strengthening of amazonian dry season by constrained climate model simulations. *Nature Climate Change* 5(7):656.
- Bouchez J., Moquet JS., Espinoza JC., Martinez JM., Guyot JL., Lagane C., Filizola N., Noriega L., Hidalgo Sanchez L., Pombosa R. 2017. River mixing in the Amazon as a driver of concentration discharge relationships. *Water Resource Research*. doi: 10.1002/2017WR020591.
- Bradley RS., Vuille M., Diaz HF., Vergara W. 2006. Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312(5781), 1755-1756.
- Brando PM., Balch JK., Nepstad DC., Morton DC., Putz FE., Coe MT., Silvério D., Macedo MN., Davidson E., Nóbrega CC., Alencar A., Soares-Filho BS. 2014. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* doi: 10.1073/pnas.1305499111.
- Brienens RJW, et al. 2015. Long-term decline of the Amazon carbon sink, *Nature*, 519, 344–348, doi:10.1038/nature14283.

- Buytaert W., Moulds S., Acosta L., de Bievre B., Olmos C., Villacis M., Tovar C., Verbist KMJ. 2017. Glacier melt content of water use in the tropical Andes. *Environ. Res. Lett.* doi: 10.1088/1748-9326/aa926c.
- Condom T., Rau P., Espinoza JC. 2011. Correction of the TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998–2007. *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.7949.
- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J.C., Suarez, W., Ramos, C., Apaestegui, J., Tacsí, A., Gomez, J. 2012. Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: a case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water International* 37, 442–459.
- Cox PM., Betts RA., Collins M., Harris PP., Huntingford, Jones CD. 2004. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1-3): 137-156.
- Davidson EA., et al. 2012. The Amazon basin in transition. *Nature* 481(7381):321–328. doi:10.1038/nature10717.
- De Faria B., Brando PM., Macedo MN., Panday PK., Soers-Filho BSCoe MT. 2017. Current and future patterns of fire-induced forest degradation in Amazonia *Environ. Res. Lett.* 12 095005.
- Espinoza JC., Chavez S., Ronchail J., Junquas C., Takahashi K., Lavado W. 2015. Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resources Res.* 51, doi:10.1002/2014WR016273.
- Espinoza JC., Garreaud R., Poveda G., Arias PA., Molina-Carpio J., Masiokas M., Viale M. Scaff L. 2020. Review Article. Hydroclimate of the Andes Part I: Main Climatic Features. *Front. Earth Sci.* 8:64. doi: 10.3389/feart.2020.00064.
- Espinoza JC., Guyot JL, Ronchail J., Cocheneau G., Filizola N., Fraizy P., Labat D., de Oliveira E., Ordoñez, JJ. and Vauchel P. 2009b. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon Basin. *Journal of Hydrology*, 375, 297-311.
- Espinoza JC., Lengaigne M., Ronchail J., Janicot S. 2012b. Large-Scale circulation Patterns and related rainfall in the Amazon basin: a Neuronal Networks approach. *Climate Dynamics*. 38. 121-140. doi. 10.1007/s00382-011-1010-8.
- Espinoza JC., Marengo JA., Ronchail J., Molina-Carpio J., Noriega L., Guyot JL. 2014. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: The role of tropical-subtropical south Atlantic SST gradient. *Environm. Res. Lett.* 9 124007 doi:10.1088/1748-9326/9/12/124007.
- Espinoza JC., Ronchail J., Frappart F., Lavado W., Santini W., Guyot JL. 2013a. The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970 – 2012 period: A focus on the 2012 flood. *Journal of Hydrometeorology*, 14, 1000-1008. doi: 10.1175/JHM-D-12-0100.1.
- Espinoza JC., Ronchail J., Guyot JL., Cocheneau G., Filizola N, Lavado W., de Oliveira E., Pombosa R., Vauchel P. 2009a. Spatio – Temporal rainfall variability in the Amazon Basin Countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29, 1574-1594.
- Espinoza JC., Ronchail J., Guyot JL., Junquas C., Drapeau G., Martinez JM., Santini W., Vauchel P., Lavado W., Ordoñez J., Espinoza R. 2012a. From drought to flooding: understanding the abrupt 2010-2011 hydrological annual cycle in the Amazonas River and tributaries. *Environmental Research Letters* 7 024008. doi:10.1088/1748-9326/7/2/024008.
- Espinoza JC., Ronchail J., Guyot JL., Junquas C., Vauchel P., Lavado W., Drapeau G., Pombosa R. 2011. Climate variability and extremes drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13406, doi:10.1029/2011GL047862.
- Espinoza JC., Ronchail J., Lengaigne M., Quispe N., Silva Y., Bettolli ML., Avalos G., Llacza A. 2013b. Revisiting wintertime cold air intrusions at the East of the Andes: Propagating features from subtropical Argentina to Peruvian Amazon and relationship with large-scale circulation patterns. *Climate Dynamics* 41, 1983-2002. doi: 10.1007/s00382-012-1639-y.
- Espinoza JC., Ronchail J., Marengo JA., Segura H. 2019a. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-018-4462-2
- Espinoza JC., Segura H., Ronchail J., Drapeau G., Gutierrez-Cori O. 2016. Evolution of wet- and dry-day frequency in the western Amazon basin: Relationship with atmospheric circulation and impacts on vegetation. *Water Resources Research*. doi: 10.1002/2016WR019305.
- Espinoza JC., Sörensson A., Ronchail J., Molina-Carpio J., Segura H., Gutierrez-Cori O., Ruscica R., Condom T., Wongchuig-Correa S. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper

- Madeira Basin) during the 1982-2017 period. 2019b. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. doi: 10.1016/j.ejrh.2019.100637.
- Espinoza-Villar R., Martinez JM., Armijos E., Espinoza JC., Filizola N., Dos Santos A., Willems B., Fraizy P., Santini W., Vauchel, P. 2017. Spatio-temporal monitoring of suspended sediment in Solimões River (2000 - 2014). *Comptes Rendus Geoscience*. doi: 10.1016/j.crte.2017.05.001.
- Fernandes, K., et al. 2011. North Tropical Atlantic influence on western Amazon fire season variability, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L12701, doi:10.1029/2011GL047392.
- Figueroa-Culqui M., Espinoza JC., Armijos E. Ronchail J., Espinoza-Villar R. Describing flood stage reversal (*repiquetes*) in Peruvian-Ecuadorian Amazon and related regional atmospheric patterns. In preparation.
- Forsberg BR., Melack JM., Dunne T., Barthem RB., Goulding M., Paiva RCD., et al. 2017. The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. *PLoS ONE*12(8): e0182254.
- Frans C., Istanbuloglu, E, Lettenmaier DP., Naz B., Clarke G., Condom T., Burns P., Nolin A. 2015. Predicting glacio-hydrologic change in the headwaters of the Zongo River, Cordillera Real, Bolivia, *Water Resour. Res.*, 51, doi:10.1002/2014WR016728.
- Frappart F., Papa F., Güntner A., Tomasella J., Pfeffer J., Ramillien G., Emilio T. Schiatti J., Seoane L., da Silva Carvalho L., Medeiros Moreira D., Bonnet, MP., Seyler F. 2019. The spatio-temporal variability of groundwater storage in the Amazon River Basin. *Advances in Water Resources*. doi: [10.1016/j.advwatres.2018.12.005](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.12.005).
- Fu R., Yin L., Li W., Arias PA., Dickinson RE., Huang L., Chakraborty S., Fernandes K., Liebmann B., Fisher R., et al et al. 2013. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection, online at www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1302584110/-/DCSupplemental.
- Garreaud RD., Vuille M., Compagnucci R., Marengo J. 2009. Present-day south american climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3), 180-195.
- Gatti LV. et al. 2014. Drought sensitivity of Amazonian Carbon balance revealed by atmospheric measurements, *Nature*, doi:10.1038/nature12957.
- Getirana ACV., Espinoza JC., Ronchail J., Rotunno Filho OC. 2011. Assessment of different precipitation datasets and their impacts on the water balance of the Negro River basin. *Journal of Hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.04.037.
- Gloor M., Brienen RJW., Galbraith D., Feldpausch TR., Schöngart J., Guyot JL., Espinoza JC., Lloyd J., Phillips OL. 2013. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*. 40, 1-5. doi: 10.1002/grl.50377.
- Guimberteau M., Ciais P., Ducharne A., Boisier JP., Dutra Aguiar AP., Biemans H., De Deurwaerder H., Galbraith D., Kruijt B., Langerwisch F., Poveda G., Rammig A., Rodriguez DA., Tejada G., Thonicke K., Von Randow C., Von Randow RCS., Zhang K., and Verbeeck, H. 2017. Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 1455-1475, <https://doi.org/10.5194/hess-21-1455-2017>.
- Guimberteau M., Drapeau G., Ronchail J., Sultan B., Polcher J., Martinez JM., Prigent C., Guyot JL., Cochonneau G., Espinoza JC., Filizola N., Fraizy P., Lavado W., De Oliveira E., Pombosa R., Noriega L., Vauchel P. 2012. Discharge simulation in the sub-basins of the Amazon using ORCHIDEE forced by new datasets, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 911-935, doi:10.5194/hess-16-911-2012.
- Guimberteau M., Ronchail J., Espinoza JC., Lengaigne M., Sultan B., Polcher J., Drapeau G., Guyot JL., Ducharne A., Ciais P. 2013. Future changes in precipitation and impacts on extreme streamflow over Amazonian sub-basins. *Environmental Research Letters* 8 01403. doi:10.1088/1748-9326/8/1/014035.
- Gutierrez-Cori O., Espinoza JC., Arias PA., Ronchail J., Segura H., Li L. Understanding the relationship between hydroclimate variables and NDVI in the upper Madeira basin (southern Amazon). In preparation.
- Jones, C. and Carvalho, L.M.V. 2002. Active and break phases in the South American monsoon system. *Journal of Climate*, 15, 905–914.
- Junquas C., Takahashi K., Condom T., Espinoza JC., Chavez S. Sicart JE., Lebel T. 2018. Understanding the influence of orography over the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-017-3858-8.

- Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudré N., Ogeé J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Prentice IC. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochem. Cycles*, 19,GB1015, doi:10.1029/2003GB002199.
- Kronenberg M., Schauwecker S., Huggel C., Salzmann N., Drenkhan F., Frey H., Giráldez C., Gurgiser W., Kaser G., Juen I., Suarez W., García J., Fluixá J., Ayros E., Perry B., Rohrer M. 2016. The projected precipitation reduction of the central Andes may severely affect Peruvian glaciers and hydropower production. *Energy Procedia*, 97, 270-277.
- Labat D., Espinoza JC., Ronchail J., Cochonneau G., de Oliveira E., Doudou JC., Guyot JL., 2012. Fluctuations in the monthly discharge of Guyana shield rivers, related to Pacific and Atlantic climate variability. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (6), 1–11.
- Lavado W. and Espinoza JC. 2014. Impact of El Niño and La Niña events on Rainfall in Peru. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.29, 171 – 182. DIO: 10.1590/S0102-77862014000200003.
- Lavado-Casimiro W., Labat D., Ronchail J., Espinoza JC., Guyot JL. 2013. Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965-2007). *Hydrological Processes*. 41, 2944-2957. doi: 10.1002/hyp.9418.
- Lavado-Casimiro W., Ronchail J., Labat D., Espinoza JC., Guyot JL. 2012. A basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969-2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*. 57(4) 1-18. doi:10.1080/02626667.2012.672985.
- Lejeune Q., Davin EL., Guillod BP., Seneviratne SI. 2015. Influence of Amazonian deforestation on the future evolution of regional surface fluxes, circulation, surface temperature and precipitation. *Climate Dynamics*, 44(9-10), 2769-2786.
- Lewis SL., Brando PM., Phillips PL., van der Heijden GMF., Nepstad D. 2011. The 2010 Amazon Drought. *Science*, 331(6017), 554-554.
- Maeda EE., Kim H., Aragão LEOC., Famiglietti JS., Oki T. 2015. Disruption of hydroecological equilibrium in southwest Amazon mediated by drought. *Geophys Res Lett*. <https://doi.org/10.1002/2015GL065252>.
- Malhi Y., Roberts J., Betts R., Killeen T., Li W., Nobre C. 2008. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319(5860), 169-172.
- Marengo JA. and Espinoza JC. 2016. Review Article. Extreme Seasonal Droughts and Floods in Amazonia: Causes, Trends and Impacts. *International Journal of Climatology*. doi:10.1002/joc.4420.
- Marengo JA., Alves LM., Espinoza JC., Ronchail J. 2014. [Regional Climates] Tropical South America east of the Andes [in “State of the Climate in 2013”]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95 (7), S170–S171.
- Marengo JA., **Espinoza JC.**, Alves LM., Ronchail J., Lavado-Casimiro W, Ramos I., Dávila C., Ramos AM., Dizin FA. 2019 [Regional Climates] Central South America [in “State of the Climate in 2018”]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 100(9), Si–S305, doi:10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1.
- Marengo JA., Espinoza JC., Ronchail J., Alves LM. 2015. [Regional Climates] Tropical South America east of the Andes [in “State of the Climate in 2014”]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 96 (7), S179-S181.
- Marengo JA., Espinoza JC., Ronchail J., Alves LM. 2016. [Regional Climates] Tropical South America east of the Andes [in “State of the Climate in 2015”]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 97(8), S184-S185.
- Marengo JA., Espinoza JC., Ronchail J., Alves LM., Baez J. 2017. [Regional Climates] Central South America [in “State of the Climate in 2016”]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 98(8), S187-S190.
- Marengo JA., Espinoza JC., Ronchail J., Alves LM., Baez J., Takahashi K., Lavado-Casimiro W. 2018 [Regional Climates] Central South America [in “State of the Climate in 2017”]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99(8), S205-S207. doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1.
- Mayta VC., Ambrizzi T., Espinoza JC., Silva Dias PL. 2018. The role of the Madden– Julian oscillation on the Amazon Basin intraseasonal rainfall variability. *Int J Clim*. <https://doi.org/10.1002/joc.5810>.
- Minvielle M., Garreaud RD. 2011. Projecting rainfall changes over the South American Altiplano. *J. of Climate*, 24, 4577-4583.
- Molina-Carpio J., Espinoza JC., Vauchel P., Ronchail J., Gutierrez B., Guyot JL., Noriega L. 2017. The hydroclimatology of the upper Madeira River basin: spatio-temporal variability and trends (1967-2013). *Hydrological Sciences Journal*. doi: 10.1080/02626667.2016.126786.
- Moquet JS., Morera SB., Turcq B., Poitrasson F., Roddaz M. Moreira-Turcq P., Espinoza JC., Guyot JL., Takahashi K., Orrillo JD., Petrick S., Sondag F. Control of seasonal and inter-annual rainfall distribution on the Strontium-Neodymium isotopic compositions of suspended particulate matter in a basin submitted to the ENSO events (Tumbes River - Peru and Ecuador). Submitted to *Global and Planetary Change*.

- Moreira-Turcq P., Espinoza JC., Filizola N., Martinez JM. 2018. Rivers of the Andes and the Amazon Basin: Deciphering global change from the hydroclimatic variability in the critical zone. *CR Geoscience*. 350, Issues 1–2 (1-3). doi:10.1016/j.crte.2018.01.001.
- Mourre L., Condom T., Junquas C., Lebel T., Sicart JE., Figueroa R., Cochachin A. 2016. Spatio-temporal assessment of WRF, TRMM and in situ precipitation data in a tropical mountain environment (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrol Earth Syst Sci* 20:125–141
- Myers N., Mittermeier RA., Mittermeier CG., da Fonseca CAB., Kent J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities, *Nature*, 403, 853–858.
- Nobre CA., Sampaio G., Borma LS., Castilla-rubio JC., Silva JS., Cardoso M. 2016. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm, 113(39), 10759–10768. <http://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>.
- Oyama MD., Nobre CA. 2003. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. *Geophys. Res. Lett.* 30, 2199.
- Paccini L., Espinoza JC., Ronchail J., Segura H. 2017. Intraseasonal rainfall variability in the Amazon basin related to large-scale circulation patterns: A focus on western Amazon-Andes transition region. *Int. Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.5341.
- Poveda G., Nobre CA., Espinoza JC. 2019. While denying science, Mr. Bolsonaro’s policies are threatening ecosystem services in Amazonia and the sustainable development of South America. *Science*. eLetter available at : <https://science.sciencemag.org/content/365/6452/419/tab-e-letters>
- Rabatel A., Francou B., Soruco A., Gomez J., Cáceres B., Ceballos JL., Scheel, M. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81.
- Rodriguez-Morata C., Ballesteros-Canovas JA., Rohrer M., Espinoza JC., Beniston M., Stoffel M. 2018. Linking atmospheric circulation patterns with hydro-geomorphic disasters in Peru. *Int. Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.5507.
- Ronchail J., Espinoza JC., Guimberteau M., Manon S., Cochonneau G., Schor T. 2018. The flood recession period in Western Amazonia and its variability during the 1985–2015 period. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15. 16-30. doi: 10.1016/j.ejrh.2017.11.008.
- Ronchail J., Schor T., Espinoza JC., Sabot M., Pinheiro H., Gomez P., Drapeau G., Michot V., Filizola N., Guyot JL., Sultan B., Martinez JM. 2016. Hydrologie et production agricole dans le nord-ouest de l’Amazonie. *Bulletin de l’Association des Géographes Français*, 3, 270-286.
- Ruiz-Vasquez M. Arias PA., Martinez JA., **Espinoza JC.** 2020. Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*. doi: [10.1007/s00382-020-05223-4](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4)
- Saavedra M., Junquas C., Espinoza JC., Silva Y. Impacts of topography and land use change on the air surface temperature and precipitation over the central Peruvian Andes. In press. *Atmospheric Research*. doi: [10.1016/j.atmosres.2019.104711](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104711).
- Segura H., Espinoza JC., Junquas C., Lebel T., Vuille M., Garreau R. 2020. Recent changes in the precipitation-driving processes over the southern tropical Andes/western Amazon. *Climate Dynamics*. doi: [10.1007/s00382-020-05132-6](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05132-6)
- Segura H., Espinoza JC., Junquas C., Takahashi K. 2016. Evidencing Decadal and Interdecadal Hydroclimatic Variability over the Central Andes. *Environmental Research Letters*. 11 094016. doi:10.1088/1748-9326/11/9/094016.
- Segura H., Junquas C., Espinoza JC., Vuille M., Jauregui YR., Rabatel A., Condom T., Lebel T. 2019. New insights into the rainfall variability in the tropical Andes on seasonal and interannual time scales. *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-018-4590-8.
- Sicart JE., Espinoza JC., Queno L., Medina M. 2016. Radiative properties of clouds over a tropical Bolivian glacier: seasonal variations and relationship with regional atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.4540.
- 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.
- Staal A. Tuinenburg OA., Bosmans JHC., Holmgren M., van Nes EH., Scheffer M., Zemp DC. Dekker SC. 2018. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8. 539–543, doi:10.1038/s41558-018-0177-y.
- Sulca J., Takahashi K., Espinoza JC., Vuille M., Lavado-Casimiro W. 2017. Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. *Int. Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.5185.

- Sulca J., Vuille M., Roundy P., Takahashi K., Espinoza JC., Silva Y., Zubieta R. 2018. Climatology of Extreme Cold Events in the central Peruvian Andes during Austral Summer: Origin, Types, and Teleconnections. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. doi: 10.1002/qj.3398.
- Vauchel P., Santini W., Guyot JL., Moquet JS., Martinez JM., Espinoza JC., Baby P., Fuertes O., Noriega L., Puita O., Sondag F., Fraizy P., Armijos E., Cochonneau G., Timouk F., de Oliveira E., Filizola N., Molina J., Ronchail J. 2017. A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River Basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme. *Journal of Hydrology*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.018>.
- Vuille M., Franquist E., Garreaud R., Lavado-Casimiro W., Cáceres B. 2015. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(9), 3745-3757.
- Vuille M., Huggel C., Carey M., Buytaert W., Rabatel A., Jacobsen D., Soruco A, Villacis M., Yarleque C., Condom T., Salzmann N., Sicart JE. 2018. Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213. doi:10.1016/j.earscirev.2017.09.019
- Wongchuig-Correa S., de Paiva RCD., Espinoza JC., Collischonn W. 2017. Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts, *Journal of Hydrology*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.04.019.
- Yoon JH. and Zeng N. 2010. An Atlantic influence on Amazon rainfall. *Climate Dynamics*, 34: 249-264, doi:10.1007/s00382-009-0551-6.
- Zemp DC. et al. 2014. On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 13337–13359.
- Zemp DC., Schleussner CF., Barbosa HM., Hirota M., Montade V., Sampaio G., Staal A., Wang-Erlandsson L., and Rammig A. 2017. Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks, *Nature Communications*, 8, 14 681.
- Zubieta R., Getirana A., Espinoza, JC., Lavado-Casimiro W., Aragon L. 2017. Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3543-3555, <https://doi.org/10.5194/hess-21-3543-2017>.
- Zubieta R., Getirana ACV., Espinoza JC., Lavado W. 2015. Impacts of satellite-based precipitation datasets on rainfall–runoff modeling of the Western Amazon basin of Peru and Ecuador. *Journal of Hydrology*, 528, 599-612. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.06.064.
- Zubieta R., Saavedra M., Espinoza JC., Ronchail J., Sulca J., Drapeau G., Martin-Vides J. 2019. Assessing precipitation concentration in the Amazon basin from different satellite-based datasets. *Int. Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.6009.