Analyse des tendances des débits dans le bassin du río Amazonas à Tamshiyacu, Pérou.

Marine Guyomard

Rapport de stage de M1

Mars-juillet 2007

Sous la direction de Jean-Loup Guyot, IRD, programme HyBAm - Pérou

Résumé

L'Amazone est le plus grand fleuve du monde en termes de débit (209 000 m^3/s à son embouchure) et de surface drainée (plus de 6 millions de km^2), affecté à la fois par les changements climatiques et la déforestation. Cependant, peu d'études hydrologiques ont été effectuées sur la partie péruvienne de ce bassin, qui représente 16 % de sa superficie. Cette étude s'intéresse ici aux variations temporelles des débits dans le bassin du río Amazonas à Tamshiyacu, situé en grande partie au Pérou mais aussi en Equateur. Lors de l'examen des crues annuelles en fonction de leur période de retour sur la période 1990-2006 et de l'étude des tendances des débits annuels minimaux, moyens et maximaux entre 1990 et 2005, une faible baisse des crues et des débits annuels est observée sur l'ensemble de ce bassin. Ces deux mêmes études révèlent une hausse des crues et des débits au nord du bassin et une baisse au sud. Cette opposition des tendances concorde avec les observations d'Espinoza (Espinoza *et al.*, 2007a) sur l'ensemble du bassin amazonien. La corrélation des débits avec les données de pluie considérée sur la période 1990-2004 n'est pas bonne, sans doute à cause de la mauvaise répartition des postes pluviométriques qui induit un biais dans l'estimation des précipitations moyennes sur le bassin. Enfin, le lien entre les tendances des débits et l'évolution de la déforestation s'avère difficile à faire, en raison du manque de données sur celle-ci.

Mots-clefs : hydrologie – Amazonie – Pérou – débits– tendances.

Abstract

The Amazon River, the greatest river on Earth according to its discharge (209 000 m^3/s at the mouth) and its catchment area (more than 6 millions km^2), is touched by both climatic changes and deforestation. Yet few hydrological studies have been realized on the Peruvian part of its basin, which represents 16 % of its surface. This study considers the temporal variations of the discharges in the Amazon Basin at Tamshiyacu, which spreads on the major part of Peru and on a part of Ecuador. During the study of the annual floods of different periods of return between 1990 and 2006 and the study of the tendencies of the annual maximum, average and minimum discharges between 1990 and 2005, a slight decrease of the floods and of the annual discharges is observed. Those two studies also reveal an increase of the floods and the discharges in the north part of this basin and a decrease in its south part. This opposition is consistent with the observations of Espinoza (Espinoza *et al.*, 2007a) on the whole Amazonian basin. The correlation between the discharges and the rainfall data examined between 1990 and 2004 is not good, most likely because of the bad spatial repartition of the rainfall stations, which induces a bias in the estimation of the watershed mean rainfall. Finally, a link between deforestation and discharge tendencies is difficult to establish because of the lack of deforestation data.

Key words: hydrology – Amazon – Peru – discharges – tendencies.

Resumen

El río Amazonas es el principal río del mundo por su caudal (209 000 m^3/s en su desembocadura) y por la extensión de su cuenca (más de 6 millones km^2), está afectado a la vez por el cambio climático y la deforestación. No obstante pocos estudios han sido realizados en la parte peruana de esta cuenca, que representa 16 % de su superficie. Este estudio trata de la variabilidad temporal de los caudales en la cuenca del río Amazonas en Tamshiyacu, que abarca en mayor parte el Perú y minoritariamente el Ecuador. Durante el estudio de las crecidas de diferentes periodos de retorno sobre el periodo 1990-2006 y el estudio de las tendencias de los caudales anuales mínimos, medios y máximos sobre el periodo 1990-2005, una débil disminución de las crecidas y de los caudales anuales es observado. Estos dos estudios muestran también un incremento de las crecidas y de los caudales en la parte Norte de esta cuenca y una bajada en su parte Sur. Esta oposición de tendencias concuerda con las conclusiones de Espinoza (Espinoza *et al*., 2007a) a nivel de toda la cuenca amazónica. La correlación entre los datos de lluvia y caudales examinada en el periodo 1990-2004 no es buena, probablemente por la mala repartición espacial de los puestos pluviométricos, que induce un error en la estimación de las lluvias medias en la cuenca. Finalmente, el vínculo entre las tendencias de los caudales y la deforestación es difícil de establecer, a causa de la falta de datos sobre la deforestación.

Palabras claves: hidrología – Amazonas – Perú – caudales – tendencias.

Sommaire

Résumé p.2
Abstract p.2
Resumen p.3
Sommaire p.4
A. Introduction p.5
B. Données et méthodes p.7
1. Données. p.7
(a)Délimitation des bassins versants p.7
(b)Les stations hydrologiques p.7
(c)Jaugeage et courbe d'étalonnage p.8
(d)Les postes pluviométriques p.10
(e)Les données de pluie et leur transformation p.11
2. Méthodes p.12
(a)Ajustement de lois statistiques sur les valeurs de crues p.12
(b)Recherche de tendances dans les séries temporelles de débits p.13
(c)Tendances des données de pluie et comparaison avec les débits moyens p.17
C. Résultats et discussion p.18
1. Description des cycles des débits et des précipitations sur les bassins péruviens et sur le bassin d'Óbidos p.18
2. Evolution décennale des crues annuelles p.21
(a)Une vue de tout le bassin amazonien : Evolution des crues à Óbidos p.21
(b)Une vue de l'ensemble du Pérou : Evolution des crues à Tamshiyacu p.22
(c)Distinction de plusieurs sous-bassins au Pérou p.24
(d)Confirmation des résultats précédents par l'analyse du nombre de crues plus fortes que la moyenne p.25
3. Recherche des tendances dans le bassin du río Amazonas à Tamshiyacu p.26
(a)Tendances des débits à Tamshiyacu p.26
(b)Tendances des débits dans les sous-bassins péruviens sur la période 1990-2005 p.27
4. Variabilité temporelle des pluies et corrélation avec les débits p.32
D. Conclusion p.37
E. Remerciements p.38
F. Références p.39

A. Introduction

Le río Amazonas est le plus important fleuve de la planète en termes de surface drainée (plus de 6 millions de km^2 entre 5ºN et 20ºS, soit près de 5 % des terres émergées) et de débit (débit moyen de 209 000 m^3/s à son embouchure selon Molinier *et al*., 1996). Il prend naissance au Pérou à la rencontre des ríos andins Ucayali et Marañón (Fig. 1), change de nom pour celui de río Solimões en entrant au Brésil puis reprend son nom initial après l'apport des eaux du río Negro. Son bassin versant s'étend sur sept pays : Brésil (63 %), Pérou (16 %), Bolivie (12 %), Colombie (6 %), Equateur (2 %), Venezuela et Guyane (1%) et trois grandes unités morphologiques peuvent y être distinguées (Fig. 2) : les boucliers guyanais et brésiliens (44 %), la plaine amazonienne (45 %), les Andes (11 %) (Molinier *et al.*, 1996).

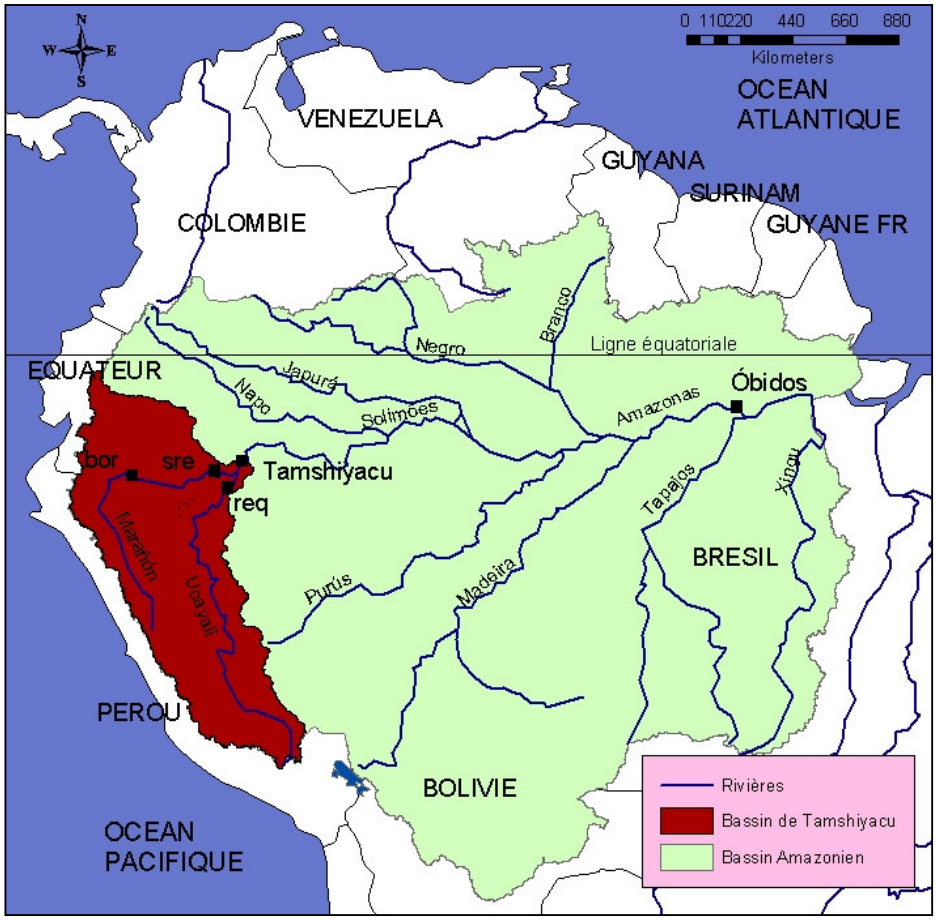


Figure 1: Carte du bassin amazonien, du bassin du río Amazonas à Tamshiyacu et des principales rivières du nord de l'Amérique du sud. Les carrés localisent les stations qui seront utilisées par la suite : Borja (bor), Óbidos, Requena (req), San Regis (sre) et Tamshiyacu.

Cette étude se focalisera sur le bassin du río Amazonas à Tamshiyacu (Fig. 1), situé en grande partie dans la partie péruvienne du bassin amazonien, car peu d'études ont été réalisées dans ce pays. Le bassin amazonien représente 76 % de la superficie du

Pérou, soit 977 900 km^2, et 98 % de ses ressources en eau (DGAS, 1995) : le Pérou est donc le plus amazonien des pays du bassin.

Le présent rapport est le résultat d'un stage de M1 (mars-juillet 2007) réalisé au sein du programme HyBAm (Hydro-géodynamique actuelle du Bassin Amazonien, www.mpl.ird.fr/hybam). Le programme HyBam est implanté en Bolivie, au Brésil, en Equateur, en France et au Pérou. Dans ce dernier pays, ce programme associe l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) à deux partenaires péruviens : le SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, www.senamhi.gob.pe) et l'UNALM (Universidad Nacional Agraria La Molina, www.lamolina.edu.pe).

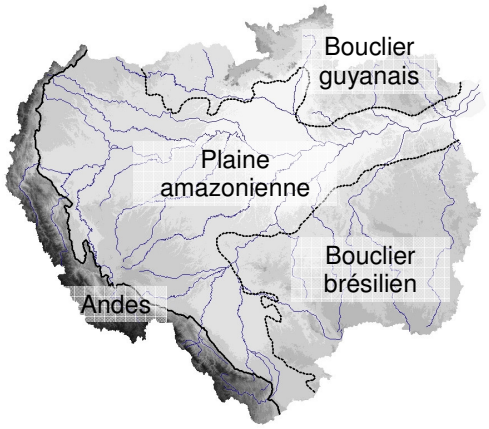


Figure 2: Les grandes unités morphologiques du bassin amazonien. Modifié d'après Guyot *et al.,* 2007.

L'Amazonie est aujourd'hui affecté à la fois par le changement climatique global et par le problème assez médiatisé de la déforestation. Ces deux facteurs devraient a priori influencer les débits des fleuves de ce bassin. Callède (Callède *et al.*, 2004) observe une augmentation des modules et des crues à Óbidos entre 1903 et 1999, Espinoza (Espinoza *et al*., 2007a) observe quant à lui des tendances de débit croissantes au nord du bassin amazonien et décroissantes au sud pour la période 1974-2004. A partir de ces observations, la question se pose de savoir s'il est possible de retrouver ces observations dans le bassin du río Amazonas à Tamshiyacu. Quelles sont donc les variations spatiales et temporelles des débits dans la partie péruvienne du bassin amazonien ? Plus précisément, quelles sont les variations temporelles des valeurs des crues à différentes périodes de retour dans le bassin amazonien et plus particulièrement au Pérou ? Quelles sont les tendances pour les débits au Pérou ? Les pluies étant prises comme un exemple d'indicateur de changement climatique, est-il possible de corréler leurs tendances à celles des débits ?

Avant d'aborder ces points, nous exposerons rapidement l'acquisition et le traitement des données, puis les méthodes employées pour réaliser cette étude et enfin une courte description des régimes des débits et des précipitations aux stations de Borja, d'Óbidos, de Requena, de San Regis et de Tamshiyacu (Fig. 1).

B. Données et méthodes

1. Données

a. Délimitation des bassins versants

Les bassins versants utilisés ont été déterminés à partir des données altimétriques SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Lors de cette mission, la topographie du globe a été affinée par interférométrie radar, permettant d'élaborer un modèle d'élévation digitale plus précis. Les bassins ont ensuite été déterminés à partir de ce modèle en tenant compte de la délimitation des différentes zones de drainage (Mialocq et Cochonneau, 2005).

b. Les stations hydrologiques

De toutes les stations hydrologiques implantées sur le bassin amazonien, celle de Manaus au Brésil est la plus ancienne : elle débute sa série de données en 1902. Chaque station hydrologique est équipée au minimum d'une échelle limnimétrique, où un observateur lit la hauteur d'eau avec une précision centimétrique (Cochonneau *et al.*, 2006). La qualité des données est à la charge des hydrologues du réseau, ce qui permet d'éliminer les valeurs aberrantes et, par corrélation avec les stations voisines, de compléter les valeurs manquantes.

Station	**Pays (zone)**	**Latitude (degrés sud)**	**Longitude (degrés ouest)**	**Altitude (m)**	**Superficie du bassin versant (km^2)**	**Première mesure de débit disponible**	**Dernière mesure de débit disponible**
BOR	Pérou (Loreto)	4,47	77,55	450	117 200	24/08/86	24/08/06
OBI	Brésil (Pará)	1.92	55.51	7	4 618 800	23/02/68	24/12/06
REQ	Pérou (Loreto)	5,03	73,83	200	350 000	25/10/84	23/09/06
SRE	Pérou (Loreto)	4,51	73,95	84	365 100	12/10/86	25/09/06
TAM	Pérou (Loreto)	4,00	73,16	105	726 400	02/10/83	01/12/06

Table 1 : Caractéristiques des stations hydrologiques utilisées.

Dans le cadre de cette étude, seul un petit nombre de stations a été considéré : Borja sur le río Marañón (BOR), Óbidos sur le río Amazonas (OBI), Requena sur le río Ucayali (REQ), San Regis sur le río Marañón (SRE) et Tamshiyacu sur le río Amazonas (TAM). L'année hydrologique débute à chaque fois en octobre, sauf à Óbidos où elle débute en décembre. Les caractéristiques des stations sont fournies dans la table 1.

Remarque : Dans le texte, la notation « le bassin du río x à la station y » sera simplifiée par « le bassin de y ».

Óbidos est la seule des stations prises en compte située au Brésil et gérée par l'ANA (Agência Nacional de Águas de Brasil, www.ana.gov.br). Il s'agit de la dernière station jaugée de l'Amazone avant l'Océan Atlantique, dont elle est distante de 800 km (Fig. 1) et elle draine un bassin de 4 676 000 km^2, soit 77 % du bassin amazonien. L'échelle limnimétrique actuelle a été mise en place en 1968, mais une échelle plus ancienne a fonctionné de 1927 à 1947 avant d'être détruite par une forte crue en 1953 (Callède *et al.,* 2002).

Les quatre autres stations de Borja, Requena, San Regis et Tamshiyacu sont situées au Pérou (Fig. 1) et gérées par le SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, www.senamhi.gob.pe). Elles sont en service depuis les années 1980. Comme l'Amazone commence, selon les Péruviens, à la confluence des ríos Marañón (dont les niveaux d'eau sont mesurés à San Regis) et Ucayali (dont les niveaux d'eau sont mesurés à Requena), la station hydrométrique de Tamshiyacu est la première station sur ce fleuve possédant des séries temporelles de hauteurs d'eau. Cette station draine un bassin de 726 400 km^2 dont plus de la moitié est situé dans les Andes (Espinoza *et al*., 2006). Les premières données de cette station datent de fin 1983 mais elles ont été complétées afin de débuter en 1970 grâce à une corrélation avec les hauteurs d'eau à Iquitos. Le bassin de San Regis inclus des bassins de rivières venant d'Equateur, alors que Requena reçoit seulement de l'eau venant du sud du bassin amazonien. La station de Borja est la seule à posséder l'intégralité de son bassin versant dans les Andes.

c. Jaugeage et courbe d'étalonnage

En 2001, l'arrivée du courantomètre à effet Doppler (Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP) a permis à l'HyBAm de mesurer les débits au Pérou, alors qu'auparavant, la taille des ríos empêchait la mesure des débits. L'utilisation d'un ADCP pour effectuer des jaugeages est considérée comme particulièrement bien adaptée aux grands fleuves amazoniens (Filizola et Guyot, 2004). Au cours de mon stage, j'ai pu m'initier au fonctionnement de cet appareil lors d'une mission sur le terrain (Fig. 3). Cette mission m'a permis de découvrir la dimension impressionnante des ríos amazoniens, d'évaluer les difficultés du terrain et de découvrir l'Amazonie péruvienne.

L'ADCP (Fig. 3.a), comme son nom l'indique, est un courantomètre utilisant l'effet Doppler. Cet appareil envoie quatre faisceaux étroits d'ondes sonores que les particules présentes dans l'eau diffusent dans toutes les directions. Une partie de ces ondes retourne à l'ADCP qui mesure la vitesse de l'eau à partir du décalage en fréquence du signal reçu. L'ADCP mesure aussi la vitesse du bateau par rapport au fond, ce qui permet d'obtenir la vitesse réelle de l'eau affranchie de celle du bateau. En cas de fond mobile ou non détecté, un GPS peut être utilisé pour le référentiel de position (Cochonneau *et al*., 2006). Le logiciel associé calcule en temps réel le débit, en même temps qu'il trace un profil du fond (Fig. 4).

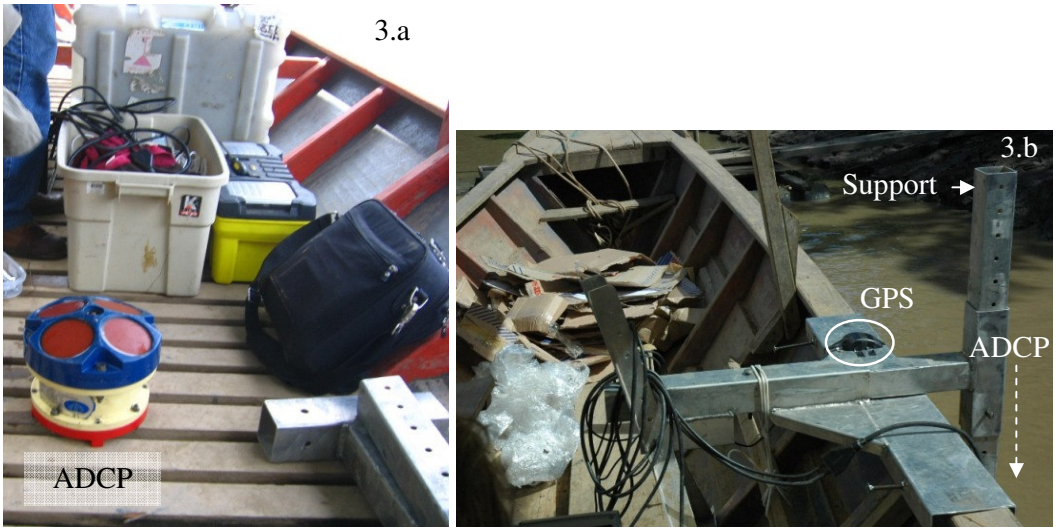


Figure 3: Le matériel permettant d'effectuer un jaugeage (3.a) et l'installation dans le bateau (3.b).

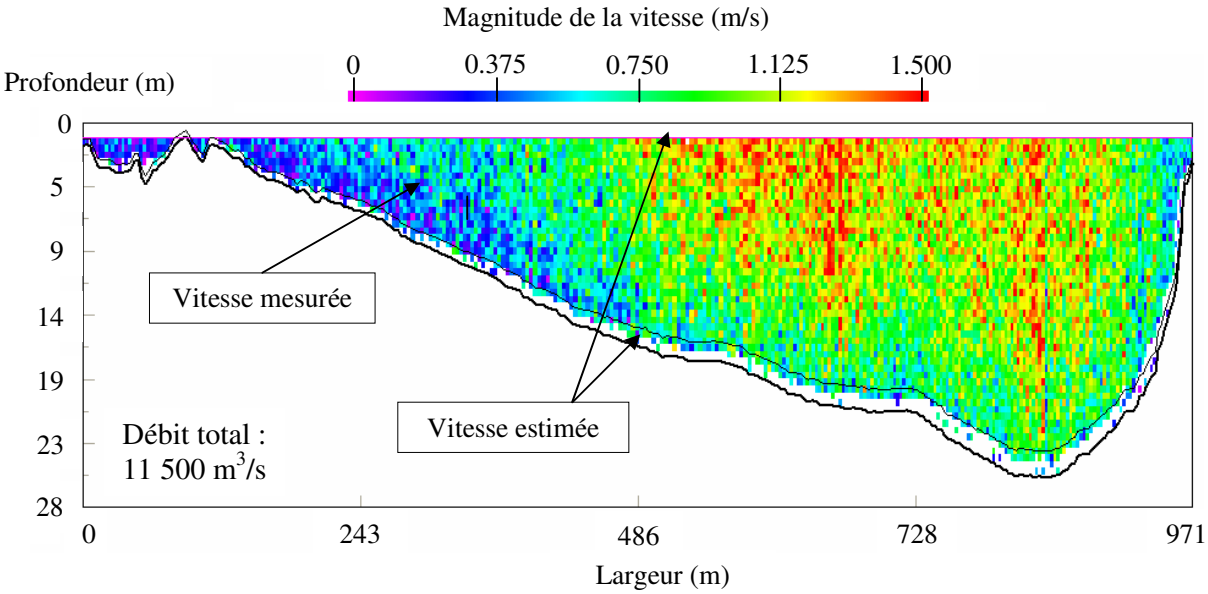


Figure 4: Exemple de profil des vitesses obtenu avec l'ADCP à la station de Tamshiyacu le 24 septembre 2006. La magnitude de la vitesse (m/s) est présentée sur une coupe de la rivière, la profondeur (m) de l'eau étant en ordonnée et la largeur (m) de la rivière en abscisses. Le référentiel est ici GPS. Le débit total calculé à partir des vitesses est présenté en bas à gauche de la coupe.

L'ADCP est fixé sur une embarcation, à environ 50 cm sous la surface de l'eau (Fig. 3.b). Le bateau effectue des allers et retours entre les deux berges. Une seule traversée est suffisante pour avoir une mesure mais plusieurs allers-retours permettent de réduire l'incertitude sur la mesure.

Chaque jaugeage ainsi effectué permet de placer un point sur une courbe d'étalonnage « hauteur d'eau-débit » (Fig. 5). L'objectif est bien évidemment d'avoir des mesures sur toute l'étendue du marnage pour avoir une courbe d'étalonnage la plus précise possible. La courbe d'étalonnage, éventuellement extrapolée, tracée à partir des

points mesurés permet d'obtenir des valeurs de débits pour tous les niveaux d'eau observés (Fig. 5). Cependant, une courbe d'étalonnage n'est valable que de façon temporaire. Les événements catastrophiques de type crues exceptionnelles ou simplement l'érosion quotidienne du lit de la rivière peuvent en effet modifier la géométrie de la section et donc la courbe d'étalonnage. Il est alors nécessaire d'en réaliser une autre. Les données nouvelles peuvent confirmer ou non la courbe d'étalonnage.

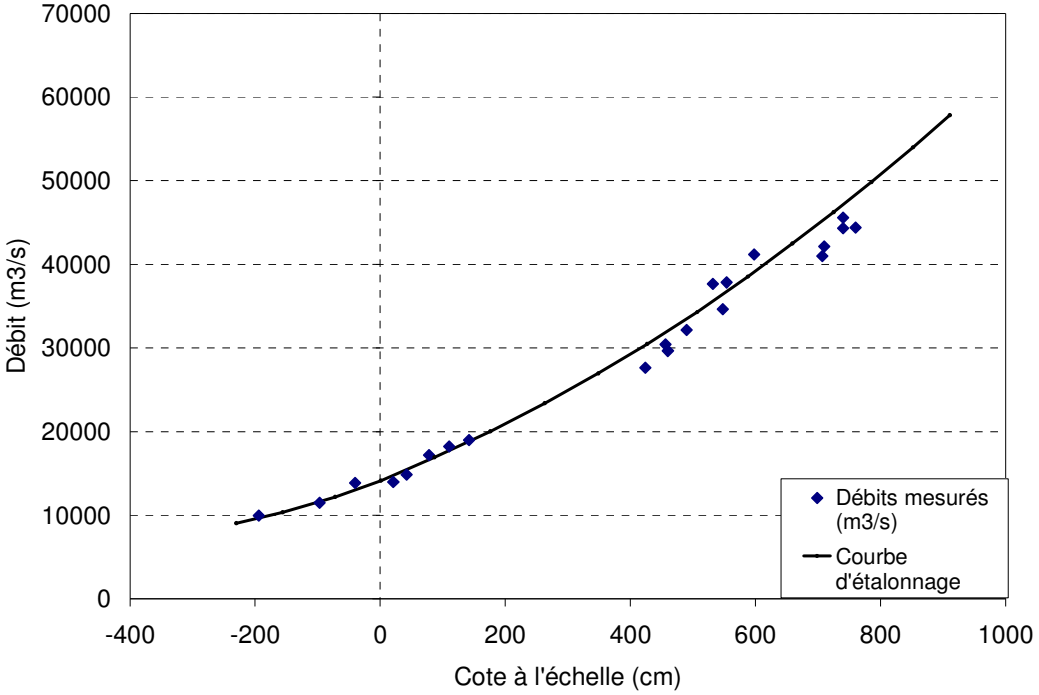


Figure 5: Courbe d'étalonnage actuelle à la station de Tamshiyacu. Le débit (m^3/s) est représenté en fonction de la cote à l'échelle (cm).

d. Les postes pluviométriques

Tout comme les stations hydrologiques, des postes pluviométriques sont implantés sur tout le bassin amazonien, mais en quantité bien plus importante. Les données de pluie ont été analysées sur l'ensemble du bassin de Tamshiyacu (Fig. 1) et donc aux postes péruviens du SENAMHI, et aux postes équatoriens gérés par l'INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador, www.inamhi.gov.ec). Au total, les données mensuelles de 375 postes pluviométriques ont ici été utilisées, les mêmes que celles utilisées par Espinoza *et al.*, 2006 (Fig. 6). Ces données sont disponibles à partir des années 1950 ou 1960 selon les postes, avec une période commune allant de 1963 à 2004. Mais en Equateur, la quantité de données est très faible après 1997, ce qui affecte l'estimation des pluies moyennes sur les bassins de Borja, San Regis et Tamshiyacu après cette date. Remarquons que les postes sont relativement mal répartis sur le bassin de Tamshiyacu (Fig. 6), avec une plus forte présence dans la partie andine, plus facile d'accès. Il s'agit d'un problème général dans les pays andins du bassin amazonien (Espinoza *et al.,* 2007b).

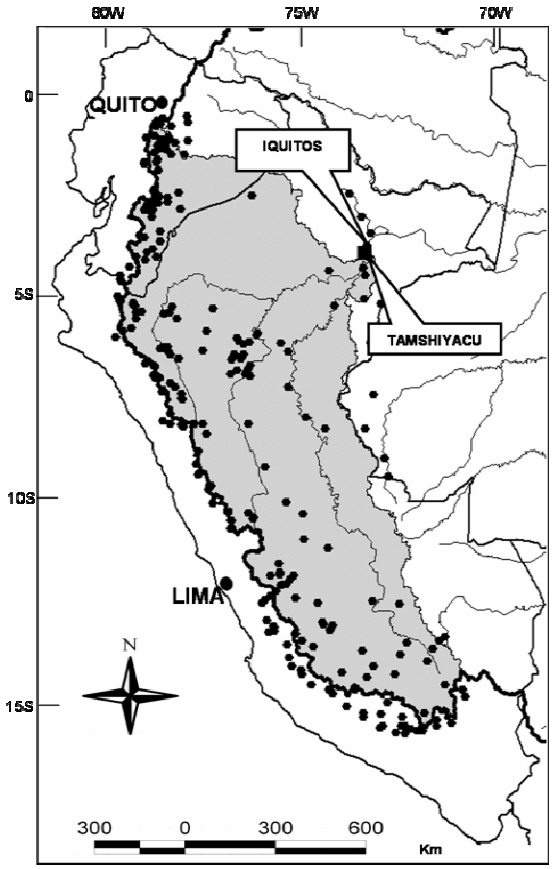


Figure 6: Carte du bassin du Río Amazonas à la station de Tamshiyacu (fond gris), et localisation des postes pluviométriques (ronds noirs). Extrait de Espinoza *et al*., 2006.

e. Les données de pluie et leur transformation

Les données de pluie ont tout d'abord été critiquées par la méthode du vecteur régional (MVR, Hiez, 1977 et Brunet-Moret, 1979), pour éliminer les stations douteuses. Cette méthode, décrite précisément par Espinoza (Espinoza *et al.*, 2007b), consiste à considérer que les données pluviométriques annuelles sont homogènes dans une même zone climatique, c'est-à-dire par exemple qu'une année de faibles précipitations présente de faibles valeurs dans toute la zone considérée. Pour chaque station, un vecteur temporel d'indices est créé, les indices reflétant le rapport entre la valeur annuelle et la moyenne temporelle. Un vecteur régional correspondant à une station fictive représentative de toute la zone d'étude est ensuite créé à partir des vecteurs des stations. La comparaison des séries temporelles des précipitations à chaque station avec le vecteur régional permet d'éliminer les stations douteuses. Par cette méthode 234 stations, soit 62 % du total, ont été validées (Espinoza *et al.*, 2006).

Cependant, il n'est pas logique de comparer les valeurs ponctuelles de précipitations mesurées à quelques postes pluviométriques aux débits, issus de l'ensemble de ces pluies sur tout le bassin. Les valeurs de pluie sont donc interpolées entre les postes pluviométriques grâce à la méthode du Kriging, afin de trouver la lame

d'eau tombée sur l'ensemble du bassin. L'interpolation est effectuée sur une grille de cellules de même aire en calculant une moyenne pondérée des valeurs avoisinantes. Le facteur de pondération est calculé à partir d'un variogramme qui évalue l'influence des 16 stations les plus proches. Un éventuel gradient spatial des données est donc pris en compte dans le facteur de pondération.

En ce qui concerne la station de Tamshiyacu, les données de pluie ont de plus été complétées pour la période 1997-2004 à l'aide des données de pluie à Óbidos avec lesquelles une bonne relation a pu être trouvée (Espinoza *et al.,* 2007c).

2. Méthodes

L'obtention des débits à partir des hauteurs d'eau, la critique des données pluviométriques par la MVR, le calcul des lames d'eau précipitée ainsi que le traitement des données par la suite ont été effectués à l'aide du logiciel HYDRACCESS développé par le programme HyBAm (Vauchel, 2005). Les données ont toutes été traitées en année hydrologique, une année hydrologique commençant à la fin des valeurs de débits ou de pluie des plus faibles.

a. Ajustement de lois statistiques sur les valeurs de crues

Les débits maximaux annuels (Q_{max}) de toutes les années disponibles pour chaque station ont été utilisés en tant que première approximation des valeurs de crues annuelles.

A partir de ces valeurs ont été tracées les courbes des débits en fonction de leur période de retour. Une période de retour de x années pour un débit correspond à un débit qui revient statistiquement une fois toutes les x années. Puis un ajustement des lois de Galton, Gauss, Goodrich, Gumbel et Pearson a été effectué avec pour but de trouver la loi modélisant au mieux les données. Ces différentes lois sont présentées par Brunet-Moret (Brunet-Moret, 1969). Le meilleur ajustement a été recherché à l'aide du test Yves Brunet-Moret (Brunet-Moret, 1978) et par simple visualisation graphique.

L'exemple de l'ajustement à Óbidos est présenté figure 7. Le meilleur ajustement est ici la loi de Goodrich, ce qui se voit clairement sur le graphique, en particulier pour les valeurs des débits à forte période de retour. Le test Yves Brunet-Moret donne également la loi de Goodrich comme le meilleur ajustement avec une valeur plus faible que pour les autres lois (Table 2). Ceci est cohérent avec l'étude de Callède (Callède *et al.*, 2002), qui trouve que le meilleur ajustement se fait avec la loi de Jenkinson. En effet les deux lois sont des lois exponentielles généralisées.

Lois ajustées	**Galton**	**Gauss**	**Goodrich**	**Gumbel**	**Pearson 3**	**Pearson 5**
Test Y.B.M.	42.31	39.91	36.50	48.89	44.59	51.83

Table 2 : Valeurs du test Yves Brunet-Moret (Y.B.M.) pour les données de débits maximaux à Óbidos. Le meilleur ajustement est ici présenté en noir.

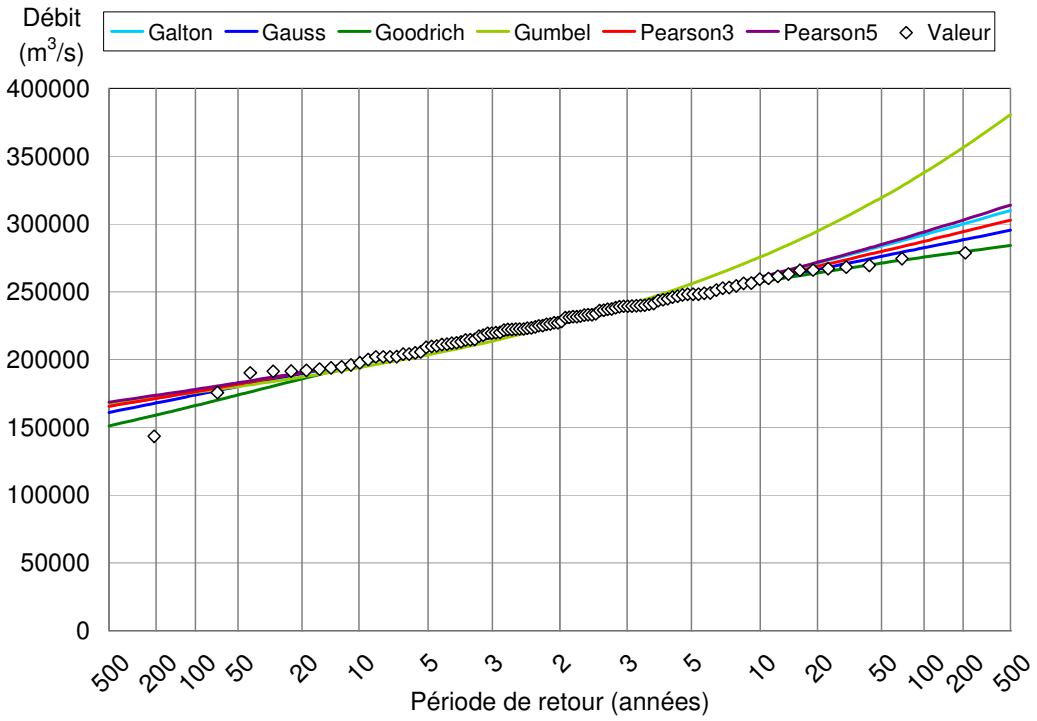


Figure 7: Exemple d'ajustement de lois aux débits maximaux annuels à Óbidos. Les losanges représentent les valeurs de débits mesurés, les courbes correspondent aux ajustements de différentes lois. L'axe des abscisses représente à gauche le temps de retour au non-dépassement (le débit en ordonnée n'est pas dépassé une fois tous les x années) et à droite le temps de retour au dépassement (le débit en ordonnée est dépassé une fois tous les x années).

Ainsi, la loi de Goodrich a été choisie à Borja et à Óbidos, et la loi de Gauss à Requena, San Regis et Tamshiyacu. Par la suite, la même loi que celle trouvée pour l'ensemble des données disponibles pour chaque station a été ajustée sur chaque décennie où les stations avaient plus de 5 ans de données. Remarquons que l'incertitude sur la courbe trouvée et sur les valeurs qui en sont déductibles est plus forte quand l'ajustement se fait sur un nombre de points moindre et quand on considère une période de retour forte.

b. Recherche de tendances dans les séries temporelles de débits

Pour la recherche de tendances au sein des séries temporelles de débits, la même méthode a été utilisée que celle employée par Espinoza (Espinoza *et al.*, 2007a).

Les données de débits maximum (Q_{max}), moyen (Q_{moy}) et minimum (Q_{min}) et l'amplitude (Amp = Q_{max} - Q_{min}) ont été considérées pour les stations hydrologiques péruviennes de Borja (BOR), Requena (REQ), San Regis (SRE) et Tamshiyacu (TAM) (Fig. 8). Les stations appelées SRE* et TAM* représentent les bassins intermédiaires de ces stations, soit respectivement les données de (SRE - BOR) et de (TAM - REQ - SRE). Ces données calculées permettent de ne considérer qu0e la partie des bassins versants qui n'est pas prise en compte par une(des) station(s) plus en amont. Pour ces stations fictives les débits minimaux n'ont pas été analysés car, à cause de la complexité

des écoulements entre chaque station et des incertitudes sur les mesures, ils peuvent être trouvés négatifs.

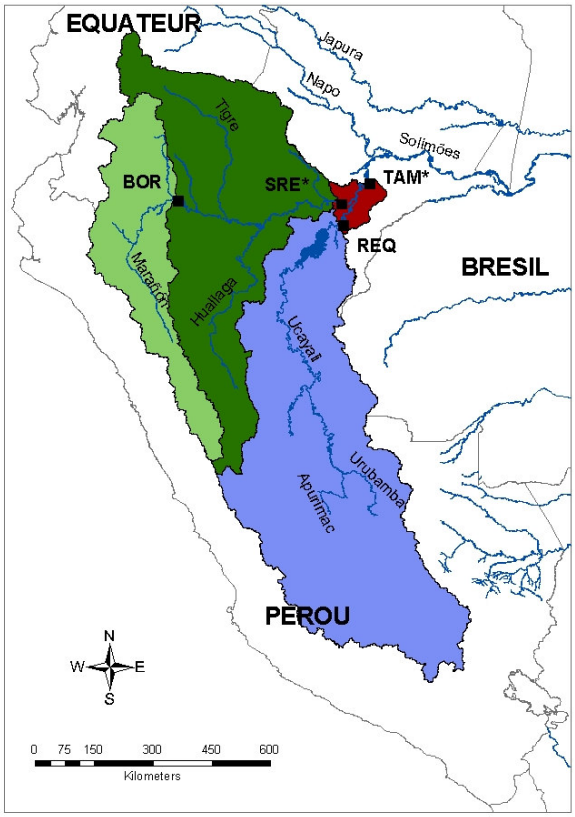


Figure 8: Carte des bassins et des stations hydrologiques utilisés dans la recherche de tendances. Les carrés légendés BOR, SRE*, TAM* et REQ représentent respectivement les stations de Borja, San Regis, Tamshiyacu et Requena. Chaque station est présentée avec son bassin, les bassins en *, SRE* et TAM* étant les bassins intermédiaires (SRE-BOR) et de (TAM-SRE-REQ).

Contrairement aux données utilisées sur l'ensemble du bassin amazonien par Espinoza (Espinoza *et al.*, 2007a), dont la période commune est 1974-2004, les données au Pérou ne sont toutes disponibles que pour la période 1990-2005. Les données manquantes de Q_{moy} du mois de novembre 1991 à Borja ont été complétées avec la moyenne de tous les autres mois de novembre, ce qui permet d'avoir des valeurs de Q_{moy} sur toute la période 1990-2005. Les valeurs de Q_{max} et de Q_{min} par contre ne tiennent pas compte du mois de novembre 1991.

Les données de débit Q (m^3/s) sont converties en lame d'eau écoulée par mois ou par an L (mm) sur le bassin, selon la formule (1), où S (km^2) est la surface du bassin versant et T (s) est la durée d'un mois ou d'une année. Cette conversion permet de s'affranchir de la taille du bassin versant de chaque station et donc de pouvoir comparer les différents débits.

$$L = \frac{Q \times T}{S \times 1000} \qquad (1)$$

Les coefficients de variations saisonniers sCV et interannuel iCV sont calculés pour toutes les années disponibles pour chaque station, car l'estimation de ces coefficients caractéristiques de l'échantillon-mère sera améliorée avec un nombre de

valeurs plus élevé. Le coefficient de variation est le paramètre le plus important lors de l'étude d'une série temporelle de débit après le module (débit annuel moyen). Il permet de mesurer la variabilité de la série temporelle, sur l'ensemble de la période considérée pour le iCV ou sur une année moyenne pour le sCV. Le coefficient de variation CV est calculé selon la formule (2), avec σ (mm) l'écart-type et M (mm) la moyenne de la lame d'eau écoulée considéré. Dans le cas du coefficient de variation interannuel, ces deux valeurs sont calculées sur l'ensemble de la série temporelle du L annuel, tandis que dans le cas du coefficient de variation saisonnier, elles sont calculées à partir des moyennes mensuelles interannuelles.

$$CV = \frac{\sigma}{M} \qquad (2)$$

Pour chaque station et chaque type de débit (Q_{max}, Q_{moy}, Q_{min}, Amp), un indice des tendances I (% /an) est calculé selon la formule (3), où P (mm/an) est la pente de la lame d'eau écoulée par rapport au temps et M (mm) est la moyenne des lames d'eau annuelles écoulées. Cet indice, comme tous les facteurs suivants a été calculé sur la période commune 1990-2005. Il permet de visualiser la tendance de la série (sa pente) modulée par sa moyenne, ce qui permet d'avoir une évolution en pourcentage.

$$I = \frac{P \times 100}{M} \qquad (3)$$

Trois tests de corrélation ont ensuite été calculés à l'aide du programme xlstat-pro : les corrélations de Pearson, Spearman et Kendall. Le coefficient de corrélation de Pearson r, issu d'un test paramétrique, correspond à la formule (4), où t est le temps (ans), σ_Q (mm, calculé à partir des lames d'eau annuelles écoulées) et σ_t (ans) sont les écarts-types des débits et du temps. Ce test permet de mesurer la corrélation linéaire entre deux variables.

$$r = \frac{\mathrm{cov}(Q,t)}{\sigma_Q \times \sigma_t} \qquad (4)$$

Les coefficients de corrélation de Spearman ρ et de Kendall τ sont deux coefficients non-paramétriques de puissance égale basés sur les rangs des valeurs et, pour le test de Kendall, sur la probabilité que les données soient rangées dans l'ordre où elles le sont (Yue *et al*., 2002). Contrairement aux tests paramétriques, les tests non-paramétriques ne sont pas construits à partir d'une hypothèse sur la distribution de la variable étudiée (distribution normale dans le cas du test de Pearson). Les tests non-paramétriques sont considérés comme plus justes pour les variables non aléatoirement distribuées, ce qui est fréquemment le cas des séries hydrologiques.

Dans le cas du test de Spearman (Lehmann, 1975) une valeur statistique ρ est calculée à l'aide de l'équation (5). $R(X_i)$ est le rang de la $i^{ème}$ observation X_i et n est la taille de l'échantillon. ρ tend vers une répartition normale et possède une moyenne nulle et une variance présentée par l'équation (6). L'équation (7) permet d'obtenir une variable Z_ρ centrée réduite.

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n}[R(X_i) - i]^2}{n(n^2 - 1)} \qquad (5)$$

$$V(\rho) = \frac{1}{n-1} \qquad (6)$$

$$Z_\rho = \frac{\rho}{\sqrt{V(\rho)}} \tag{7}$$

Dans le cas du test de Kendall (Kendall, 1975), une valeur statistique τ est calculée à l'aide de l'équation (8). Les X_j sont les valeurs successives des données, n la longueur de la série et l'opérateur sgn (θ) est explicité dans l'équation (9). τ est à peu près normalement réparti et il possède une moyenne nulle pour les échantillons de plus de 8 éléments. Sa variance est présentée dans l'équation (10). t_i est le nombre de groupes contenant i éléments, sachant qu'un groupe est constitué par les données présentant la même valeur. L'équation (11) permet d'obtenir une variable Z_τ centrée réduite.

$$\tau = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \mathrm{sgn}(X_j - X_i) \tag{8}$$

$$\mathrm{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 \rightarrow \theta > 0 \\ 0 \rightarrow \theta = 0 \\ -1 \rightarrow \theta < 0 \end{cases} \tag{9}$$

$$V(\tau) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{n} t_i i(i-1)(2i+5)}{18} \tag{10}$$

$$Z_\tau = \begin{cases} \dfrac{\tau - 1}{\sqrt{V(\tau)}} \rightarrow \tau > 0 \\ 0 \rightarrow \tau = 0 \\ \dfrac{\tau + 1}{\sqrt{V(\tau)}} \rightarrow \tau < 0 \end{cases} \tag{11}$$

Chacun des coefficients de corrélation calculés est assorti d'une appréciation sur sa signification statistique. Cette estimation est basée sur le calcul d'une p-value (valeur de probabilité p). La p-value est la probabilité d'obtenir un résultat au moins aussi extrême que la valeur donnée, en supposant que cette valeur est due entièrement au hasard. Pour les deux valeurs ρ et τ, elle est calculée à l'aide de l'équation (12). La lettre Z représente Z_ρ ou Z_τ selon le test considéré. Cette p-value est comparée à deux seuils de signification α de 1 % et 10 %, le seuil de signification étant la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle d'absence de corrélation quand elle est vraie. Le coefficient de corrélation de Pearson quant à lui est comparé aux valeurs de la table de Bravais-Pearson afin de trouver la significativité du test. Il est ainsi possible de distinguer des corrélations peu significatives, significatives à 90 % et significatives à 99 %.

$$p = 0.5 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{|Z|} e^{-t^2/2} dt \tag{12}$$

c. Tendances des données de pluie et comparaison avec les débits moyens

De façon parfaitement analogue à ce qui a été fait pour les débits, le calcul des coefficients de variation, de l'indice des tendances et de la significativité des tests a été effectué pour les pluies. La période commune des données de pluie est 1963-2004, mais afin de pouvoir comparer les résultats avec les débits, seule a été considérée la période 1990-2004 pour les tendances (les données de 2005 ne sont pas disponibles).

Les données de débits moyens et de pluie ont ensuite été comparées et les trois coefficients de corrélation de Pearson, Spearman et Kendall entre les deux séries ont été calculés.

C. Résultats et discussion

1. Description des cycles des débits et des précipitations sur les bassins péruviens et sur le bassin d'Obidos

L'année hydrologique pour les débits débute en octobre pour toutes les stations péruviennes et en décembre à Óbidos (Fig. 9). Le cycle des précipitations quant à lui débute en août pour Requena et Tamshiyacu, en septembre pour Borja, Óbidos et San Regis (Fig. 10). Par définition, ces cycles hydrologiques débutent après le mois présentant les valeurs les plus faibles. Les hauts débits ont lieu en avril-mai. Les précipitations les plus fortes se situent en février pour Requena, en février-mars pour Tamshiyacu et en mars pour Borja, Óbidos et San Regis. Le décalage entre les deux cycles témoigne du temps de propagation des écoulements dans chacun des bassins.

Les valeurs moyennes et extrêmes des débits et les valeurs moyennes des précipitations sont présentées table 3. Les lames d'eau écoulée varient moins que les lames d'eau précipitée, qui dépendent beaucoup des caractéristiques climatiques du lieu considéré. Remarquons que le coefficient d'écoulement L/P_{moy} diffère d'une station à l'autre, ce qui révèle des conditions d'écoulement et d'évapotranspiration différentes entre les bassins. Les valeurs de ce coefficient d'écoulement paraissent anormalement élevées et cette caractéristique sera discutée par la suite. La différence entre les stations est aussi visible sur les valeurs extrêmes et sur le rapport Q_{max}/Q_{min} : si ce rapport présente une valeur similaire aux stations de Requena, San Regis ou Tamshiyacu, il est beaucoup plus élevé à Borja. Ceci est caractéristique d'une station andine, avec des crues très rapides et très fortes. Remarquons enfin la similitude des débits en m^3/s aux stations de Requena et de San Regis.

Station	**Q_{moy} (m^3/s)**	**L (mm)**	**P_{moy} (mm)**	**(L/P_{moy})**	**Q_{max} (m^3/s)**	**Q_{min} (m^3/s)**	**(Q_{max}/Q_{min})**
BOR	4697	1265	1342	0,94	14645	1440	10
OBI	172400	1163	2200	0,53	240000	100200	2
REQ	13490	1216	1491	0,82	23179	4412	5
SRE	14871	1285	1734	0,74	22195	6194	4
SRE*	10195	1298			18457		
TAM	31713	1377	1621	0,85	46727	16439	3

Table 3 : Valeurs moyennes des débits (Q_{moy} en m^3/s), des lames d'eau écoulée (L sur un an en mm) et des précipitations annuelles (P_{moy} en mm), valeurs extrêmes des débits (Q_{min}, Q_{max} en m^3/s) et leur rapport Q_{max}/Q_{min} pour les différents bassins péruviens. Ces paramètres ont été évalués sur toutes les données disponibles pour chacune des stations. Les valeurs pour Óbidos sont tirées de Espinoza *et al.*, 2006 et 2007b.

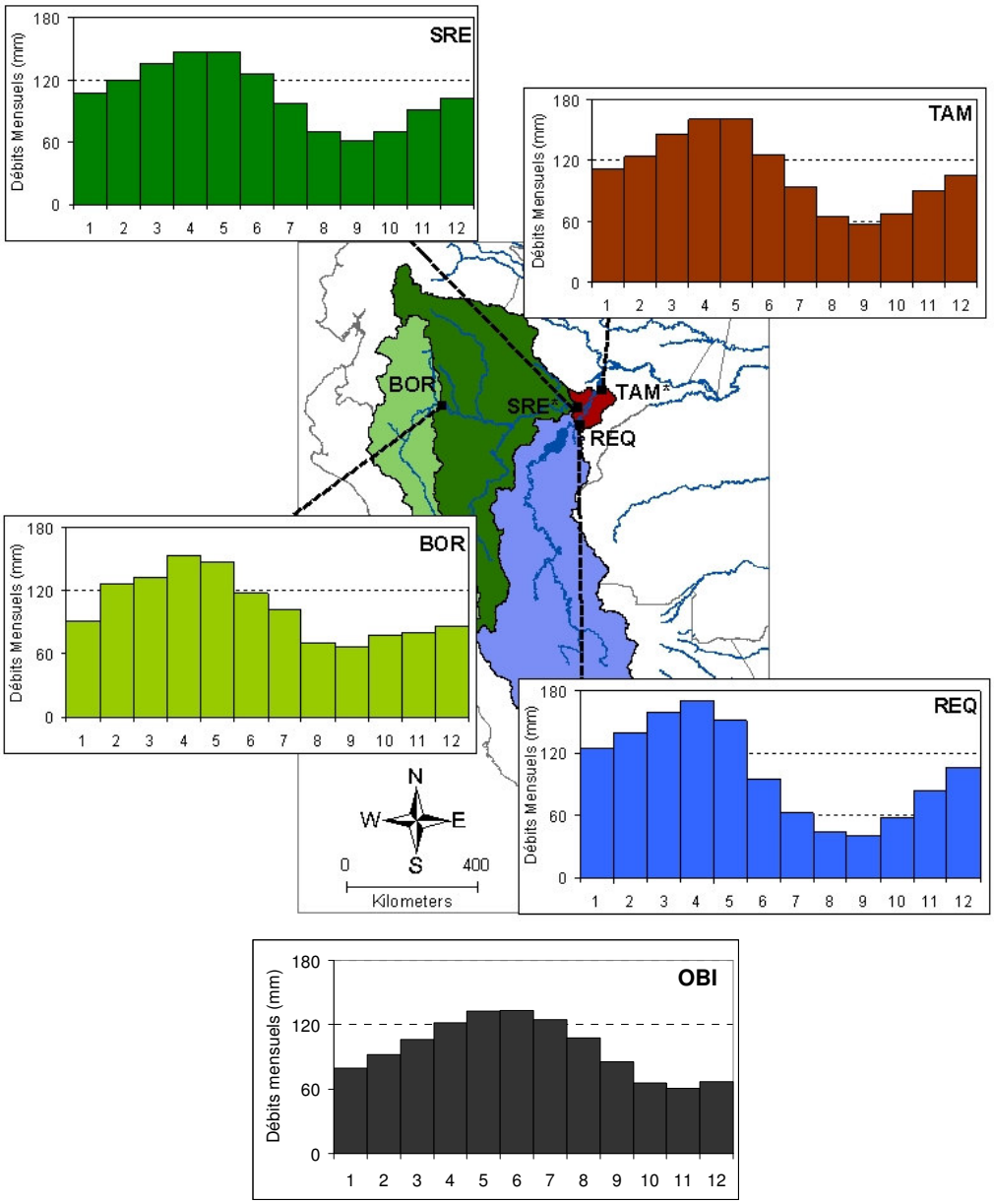


Figure 9: Les cycles hydrologiques (débits mensuels en mm) aux stations péruviennes de Borja (BOR), Requena (REQ), San Regis (SRE) et Tamshiyacu (TAM) et à la station brésilienne d'Óbidos (OBI). L'axe des abscisses représente les mois de l'année.

La variabilité saisonnière est présentée graphiquement par les figures 9 et 10 et quantifiée par le coefficient de variation saisonnier (sCV, Table 4). Les coefficients de variation des pluies et des débits sont remarquablement similaires à une station donnée. Cependant d'une station à l'autre, les cycles annuels sont plus (Requena) ou moins (Borja et San Regis) prononcés, ce qui traduit des régimes climatiques différents avec des saisons plus marquées loin de l'équateur. La faiblesse du sCV des débits à Óbidos est due au fait que la station est plus en aval, les crues y sont donc tamponnées.

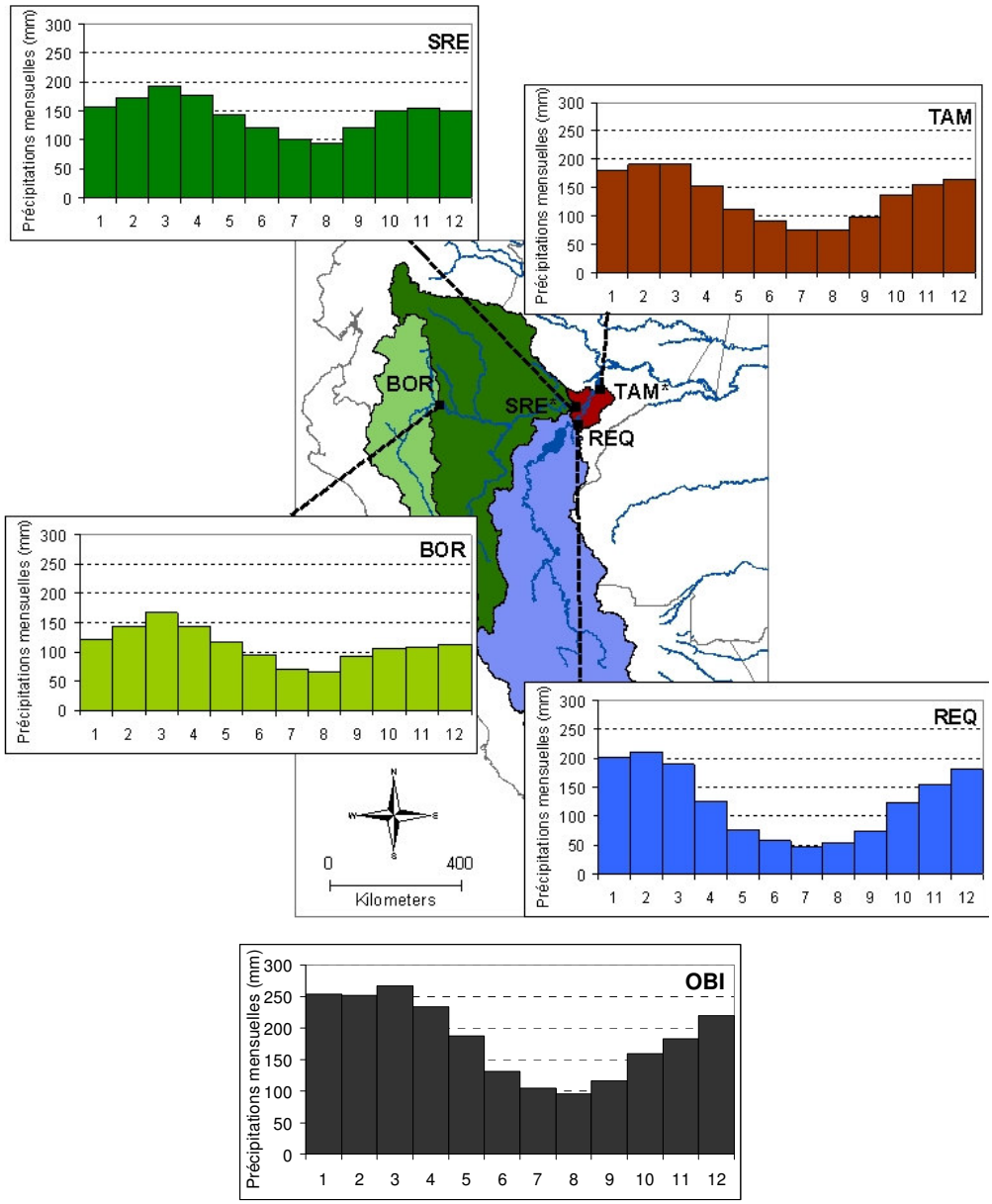


Figure 10: Les cycles annuels des précipitations (mm) dans les bassins péruviens de Borja (BOR), Requena (REQ), San Regis (SRE), Tamshiyacu (TAM) et dans la majeure partie du bassin amazonien (OBI). L'axe des abscisses représente les mois de l'année. Le graphique OBI est extrait de Espinoza *et al*., 2007b.

La variabilité interannuelle quant à elle est quantifiée par le coefficient de variation interannuel (iCV, Table 4). Cette variabilité est très faible à la station d'Óbidos et elle est assez similaire dans les autres bassins. A part dans le cas de Borja, le iCV pour Q_{min} présente des valeurs supérieures aux autres iCV tandis que les iCV des pluies présentent des valeurs plus faibles. La forte variabilité des étiages traduit leur caractère aléatoire en fonction de l'année. La faible variabilité de Q_{min} à la station de Borja est peut-être à mette en relation avec son caractère andin caractérisé par une forte variabilité spatiale des pluies et donc, à l'échelle de ce bassin, des précipitations plus régulières. Le iCV du Q_{min} à Óbidos est également assez faible, même s'il est plus élevé que les autres iCV de cette station. Ceci est dû à la taille de son bassin versant et donc

au fait que le régime hydrologique à Óbidos résulte de la combinaison de régimes très différents existant dans les différentes régions du bassin amazonien (Espinoza *et al.*, 2007a).

Station	sCV Q_{moy}	sCV P_{moy}	iCV Q_{moy}	iCV P_{moy}	iCV Q_{max}	iCV Q_{min}
BOR	0.29	0.27	0.12	0.17	0.12	0.13
OBI	0.27	0.32	0.09	0.06	0.09	0.15
REQ	0.45	0.50	0.17	0.11	0.13	0.36
SRE	0.28	0.21	0.17	0.10	0.18	0.29
SRE*	0.28		0.22		0.20	
TAM	0.31	0.32	0.12	0.10	0.11	0.26

Table 4 : Coefficients de variation saisonniers (sCV) et coefficients de variation interannuels (iCV) des pluies moyennes et des débits moyens, maximum et minimum. Ces paramètres ont été calculés sur toutes les données disponibles pour chacune des stations. Les valeurs pour Óbidos sont tirées de Espinoza *et al.*, 2007a et b.

La variabilité interannuelle va être étudiée plus en détail par la suite.

2. Evolution décennale des crues annuelles

Afin de considérer les variations temporelles des débits dans le bassin amazonien, l'évolution des événements spectaculaires que sont les crues a été dans un premier temps analysée. Plus précisément, les crues à différentes périodes de retour ont été étudiées pour chaque décennie disponible à chaque station.

a. Une vue de tout le bassin amazonien : Evolution des crues à Óbidos

Tout d'abord, l'évolution des crues a été analysée à Óbidos, dernière station jaugée avant l'océan Atlantique, dont le bassin couvre plus des trois-quarts du bassin amazonien. Ceci permet d'avoir une vue d'ensemble sur ce bassin au cours du siècle dernier.

Le tracé des débits en fonction de leur période de retour et l'ajustement de la loi de Goodrich associée a été effectué pour l'ensemble des données à Óbidos ainsi que pour chacune des décennies de valeurs disponibles. La figure résultante est assez complexe mais il est possible d'y distinguer une augmentation des débits de crue au cours du temps, en particulier à partir des années 1970. Deux ajustements ont alors été effectués, sur les valeurs des crues avant et après 1970 (Fig. 11).

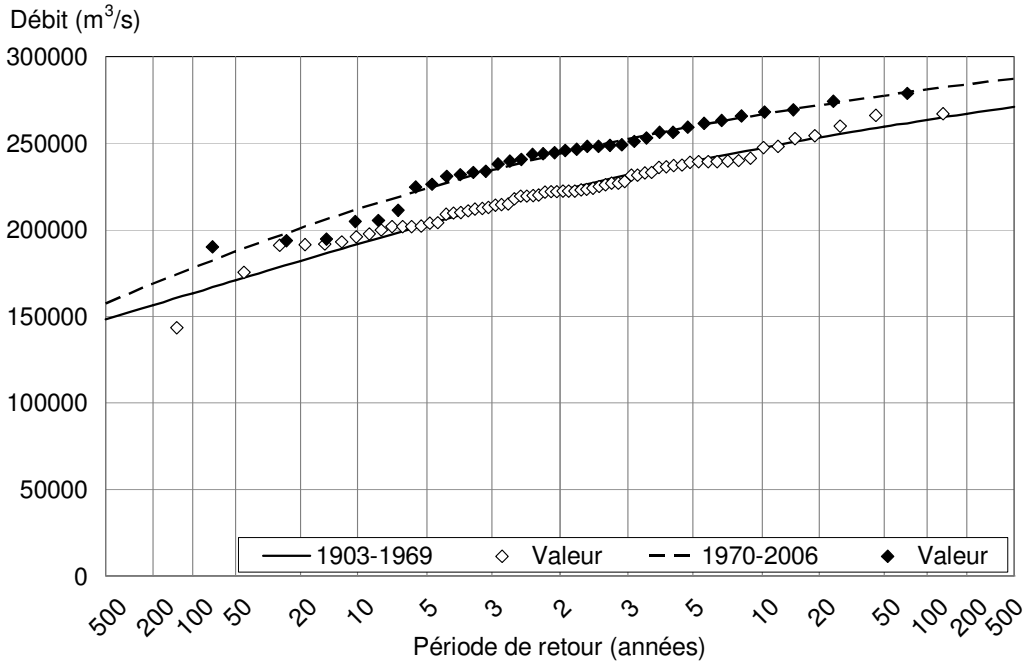


Figure 11: Débits des crues annuelles en fonction de leur période de retour à Óbidos. Les losanges représentent les valeurs mesurées des crues. Les courbes correspondent aux ajustements de la loi de Goodrich, effectués sur les données de 1903 à 1969 (trait plein et losanges blancs) et sur celles de 1970 à 2006 (tiretés et losanges noirs).

La figure 11 montre deux ajustements bien distincts, avec des débits supérieurs de 20 000 m^3/s à 25 000 m^3/s pour une même période de retour après 1970. Ceci confirme l'existence d'une rupture cette année-là comme décrit par Callède (Callède *et al.,* 2004). Les deux ajustements étant bien séparés et les valeurs mesurées bien cohérentes avec la loi ajustée, il est possible de parler d'une augmentation des crues au cours du temps sur le siècle dernier, cohérente avec celle décrite par Callède (Callède *et al.,* 2004) et de comportements différents des crues avant et après 1970. Il semble d'autant plus intéressant de mettre en avant cette date qu'elle se retrouve aussi dans l'hydrologie africaine : 1970 est par exemple une année pivot pour le début de la sécheresse au Sahel (Albergel *et al*., 1985).

b. Une vue de l'ensemble du Pérou : Evolution des crues à Tamshiyacu

De même qu'Óbidos au Brésil, Tamshiyacu est situé à l'exutoire du bassin amazonien péruvien. Aussi, l'analyse des crues à cette station permet d'avoir une vue d'ensemble de leur évolution au Pérou.

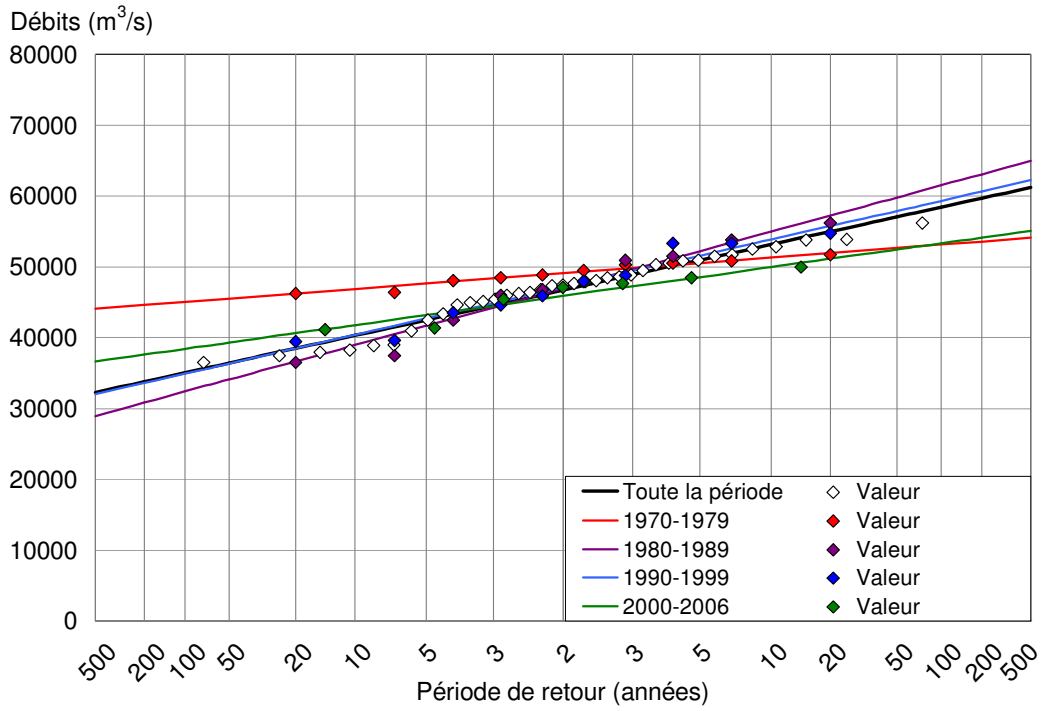


Figure 12: Débits des crues annuelles en fonction de leur période de retour à Tamshiyacu. Les losanges représentent les valeurs mesurées des crues. Les courbes sont les ajustements de la loi de Gauss, effectuée sur toutes les données (en noir) ou sur les données d'une décennie (autres couleurs).

Tout d'abord, il semble nécessaire d'émettre des réserves sur la méthode utilisée. En effet, la figure 12 montre qu'au cours de la décennie 1970-1979 les valeurs des crues sont supérieures à celles des autres décennies. Or l'ajustement statistique est assez plat en raison d'une absence de débits exceptionnellement forts et exceptionnellement faibles, ce qui aboutit à des débits de forte période de retour plus faibles que pour les autres décennies. L'interprétation à partir des seules valeurs de débits de forte période de retour aboutit donc à une erreur d'interprétation. Cette limite de la méthode employée est issue de l'utilisation d'ajustements à partir de seulement 10 points, ce qui est très peu d'un point de vue statistique. En tenant compte de cette limite, il est alors possible d'analyser les résultats obtenus.

Remarquons tout d'abord la similitude des valeurs des crues entre les décennies de 1990 et 2000 et celle entre les ajustements effectués sur ces deux décennies et sur toutes les données disponibles (Fig. 12). Les débits des années 1970 et 2000 sont quant à eux respectivement plus forts et plus faibles que les débits calculés pour toute la période. Les forts débits des années 1970 sont cohérents avec les observations d'Espinoza (Espinoza *et al.,* 2006). Ces observations indiquent une tendance à la baisse des débits de crue à Tamshiyacu entre les années 1970 et les années 2000.

Or Tamshiyacu est une station particulière dans le bassin amazonien. En effet, la série de données commence dans les années 1970 alors que dans les autres stations péruviennes, les séries ne débutent que dans la fin des années 1980. De plus, cette station synthétise l'apport de presque toute la région andine et elle possède une très forte extension nord-sud (de 0,5°S à 15,6°S). Une grande variabilité des régimes des pluies au sein de son bassin peut également y être remarquée (Espinoza *et al*., 2006). A partir

de ces observations, la question se pose de savoir si l'évolution des crues à l'intérieur du bassin de Tamshiyacu est similaire à ce qui se passe à cette station.

c. Distinction de plusieurs sous-bassins au Pérou

De la même façon que pour les deux stations précédentes, les crues sont analysées dans le bassin de Tamshiyacu, aux stations hydrologiques de Borja, Requena (sur le río Ucayali) et San Regis (stations sur le río Marañón). Remarquons que l'absence de débits au mois de novembre 1991 à Borja ne biaise pas la valeur du maximum annuel car novembre n'enregistre pas les débits les plus forts à cette station (Fig. 9).

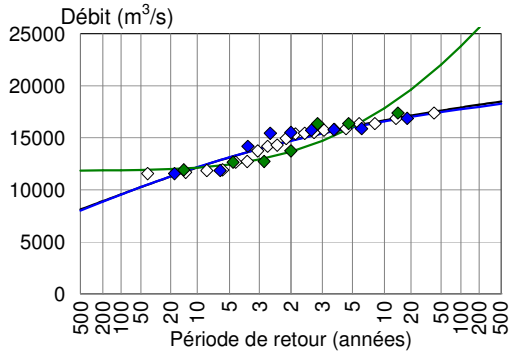


Figure 13.a : Borja

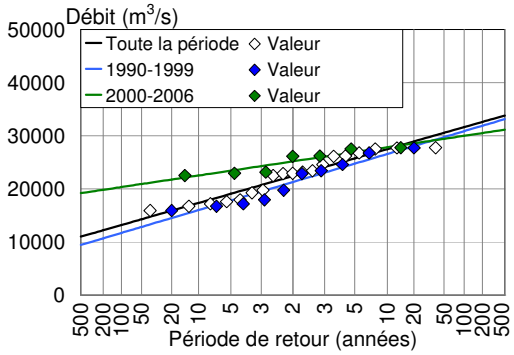


Figure 13.b : San Regis

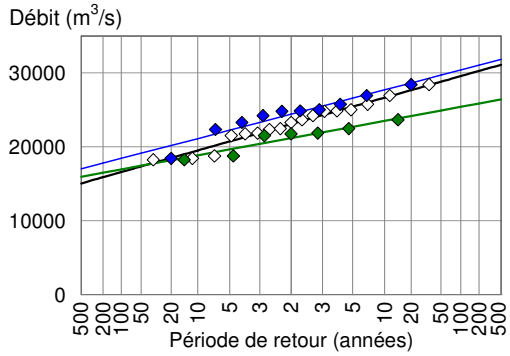


Figure 13.c : Requena

Figure 13: Débits des crues annuelles en fonction de leur période de retour à Borja (13.a), San Regis (13.b) et Requena (13.c). Les losanges représentent les valeurs mesurées des crues. Les courbes sont les ajustements de Goodrich (à Borja) ou Gauss (Requena, San Regis), effectués sur toutes les données (en noir) ou sur les données d'une décennie (autres couleurs). Les figures sont présentées selon leurs positions géographiques respectives.

De la même façon qu'à la station de Tamshiyacu (Fig. 12), les crues des années 1990 sont très proches de celles calculées à partir de toutes les données disponibles (Fig. 13), ce qui fait de cette décennie une « décennie-type » pour les crues dans tout le bassin de Tamshiyacu sur la courte période d'observation. Par contre, les crues des années 2000 ne sont semblables à celles de Tamshiyacu que pour la station de Requena, où elles sont inférieures à celles calculées sur l'ensemble de la période. A Borja, ces

crues sont dans la moyenne des autres, alors qu'elles sont supérieures à celles de toute la période à la station de San Regis.

Il faut encore une fois se méfier des lois ajustées car leur étude, dans le cas de San Regis par exemple, aboutit à des conclusions faussées : les débits des années 2000 sont forts mais l'ajustement ne présente pas des valeurs très élevées pour les fortes périodes de retour. Il s'agit là d'un effet d'échantillonnage. Devant cette forte erreur présente dans les lois ajustées par décennies, il semble difficile de vraiment conclure sur les tendances dans le bassin de Tamshiyacu. Aussi nous avons eu recours à une autre méthode.

d. Confirmation des résultats précédents par l'analyse du nombre de crues plus fortes que la moyenne

La méthode proposée ici consiste à examiner l'évolution temporelle par décennie du nombre de crues plus forte que la moyenne.

La figure 14 montre très nettement une augmentation des crues les plus fortes à Óbidos sur le siècle dernier, avec des valeurs exceptionnellement fortes dans les années 1970 puisqu'elles sont toutes supérieures à la moyenne. De nouveau, cette observation confirme celle d'Espinoza (Espinoza *et al.,* 2006). La distinction de deux périodes avant et après 1970 est ici confirmée, avec des crues bien plus fortes dans la seconde période.

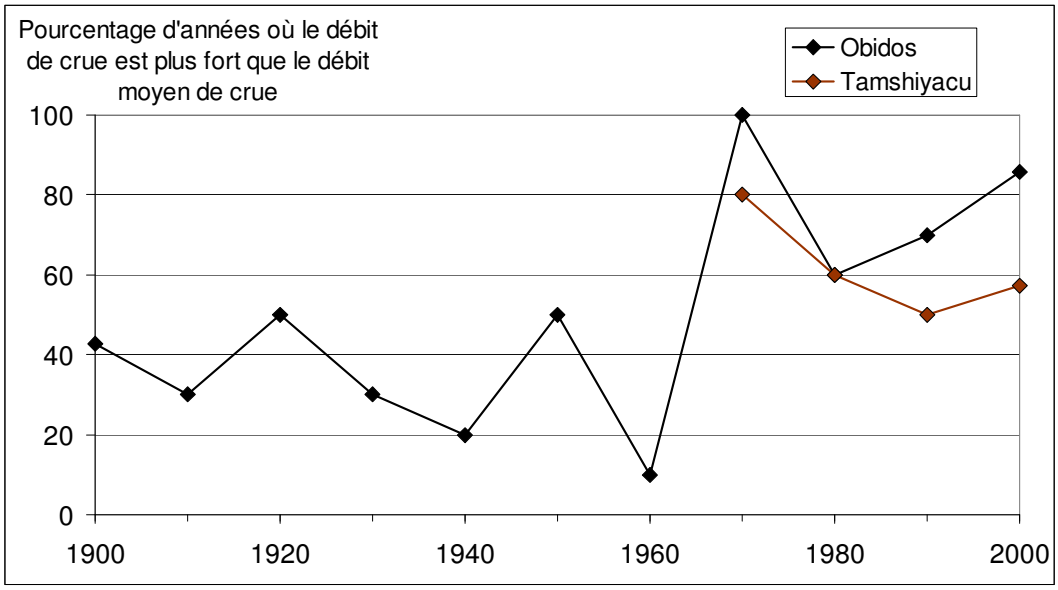


Figure 14: Evolution du pourcentage de crues supérieures à la moyenne à Óbidos et Tamshiyacu. L'axe des ordonnées représente pour chaque décennie le nombre de crues plus fortes que la crue moyenne sur toute la période de données, divisé par le nombre d'années observées dans la décennie et multiplié par 100 afin d'avoir un pourcentage.

A Tamshiyacu, les crues sont à la baisse depuis les années 1970 (Fig. 14), avec une faible hausse entre les années 1990 et 2000 (Table 5). Cette évolution entre les deux dernières décennies n'était pas visible à partir des ajustements de loi ce qui montre

encore une fois la limite de cette méthode. Les variations temporelles à Tamshiyacu sont différentes de celles à Óbidos, ce qui montre bien l'existence de sous-bassins de comportements différents composant celui d'Óbidos.

Entre les années 1990 et 2000, le nombre de crues plus fortes que la moyenne augmente partout sauf à Borja et à Requena. Les variations les plus importantes ont lieu à Requena et à San Regis, avec respectivement des baisses et hausses très marquées. Ces observations confirment celles effectuées à partir des ajustements de loi précédents, tout en apportant une information supplémentaire pour Borja, où la tendance détectée est à la baisse. Deux zones se distinguent donc au sein du bassin du río Amazonas à Tamshiyacu : la zone du bassin du río Marañón à San Regis où les crues des années 2000 augmentent et une zone du bassin du río Ucayali à Requena où elles diminuent.

Station	1990-1999	2000-2006
BOR	60	43
OBI	50	71
REQ	80	14
SRE	40	86
TAM	50	57

Table 5 : Evolution du pourcentage de crues supérieures à la moyenne à Borja, Óbidos, Requena, San Regis et Tamshiyacu. Les valeurs représentent pour les années 1990 et 2000 le nombre de crues plus fortes que la crue moyenne sur toute la période de données, divisé par le nombre d'années observées dans la décennie et multiplié par 100 afin d'avoir un pourcentage.

Les crues à différentes périodes de retour ont ici été analysées. En continuant de se focaliser sur la partie péruvienne du bassin amazonien, plus précisément sur le bassin du río Amazonas à Tamshiyacu, les tendances des débits annuels maximum, moyen et minimum vont maintenant être étudiées : il s'agit ici d'une autre façon de considérer l'évolution temporelle des débits.

3. Recherche des tendances dans le bassin du río Amazonas à Tamshiyacu

a. Tendances des débits à Tamshiyacu

Les tendances des débits dans les grands bassins versants composant le bassin amazonien ont été étudiées par Espinoza (Espinoza *et al.*, 2007a) sur la période commune où toutes les stations possèdent des données : 1974-2004. De cette étude ressort que les bassins au sud voient leurs débits diminuer tandis que les bassins au nord les voient augmenter. Cette opposition est trouvée cohérente avec le mode de variabilité des pluies. En ce qui concerne la station de Tamshiyacu, une tendance à la baisse pour tous les débits est visible (-0,22 % pour Q_{max}, -0,60 % pour Q_{moy} et -1,31 % pour Q_{min} d'après cet article). La figure 15 retrace cette tendance (droites en trait plein).

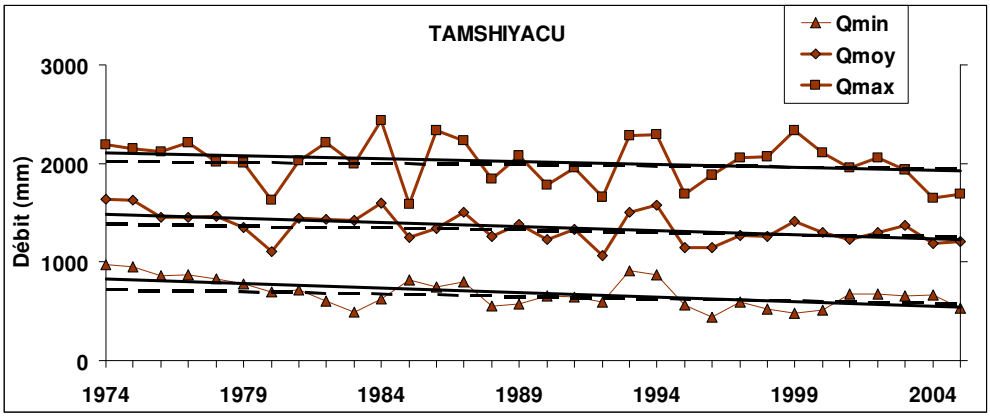


Figure 15: Débits et tendances à Tamshiyacu. Les courbes avec les points représentent les données (triangles pour Q_{min}, losanges pour Q_{moy} et carrés pour Q_{max}), la droite en trait plein représente la tendance sur la période 1974-2005 et la droite en tiretés représente la tendance sur la période 1990-2005.

Cependant, la période commune des données disponibles au Pérou couvre seulement 1990-2005. La tendance à la baisse vue à la station de Tamshiyacu existe encore sur cette période (Fig. 15) mais elle est plus faible, voire presque nulle sur cette période. Ceci montre que la tendance à la baisse vue par Espinoza est plus forte avant 1990, voire même qu'elle n'existe presque qu'avant cette date. Ceci confirme l'observation de la partie précédente sur les crues où la diminution n'était visible que jusqu'à la décennie 1990-1999.

A partir de cette observation de tendance à Tamshiyacu, vue la spécificité de la station, décrite plus haut (bassin très étendu en latitude, variabilité du régime des pluies dans ce bassin), la question se pose de savoir si cette tendance reflète ce qui se passe au sein du bassin de Tamshiyacu, sur les ríos Marañón et Ucayali et s'il est possible de retrouver la différence nord-sud visible sur l'ensemble du bassin amazonien dans le bassin de Tamshiyacu.

b. Tendances des débits dans les sous-bassins péruviens sur la période 1990-2005

L'indice des tendances a été calculé pour Q_{max}, Q_{moy}, Q_{min} et Amp aux stations de Borja, Requena, San Regis, San Regis* et Tamshiyacu. A chaque fois, les tests de corrélation de Pearson, Spearman et Kendall ont été calculés et les seuils de signification de 90 % et 99 % ont été testés (Table 6). Une synthèse des tendances et de la significativité des tests est présentée figures 16 et 17.

L'absence de données de débits au mois de novembre 1991 à Borja peut éventuellement induire un biais dans la valeur de Q_{min} car le mois de novembre enregistre des débits assez faibles à cette station. La probabilité d'existence de ce biais est cependant assez faible car les mois d'août, de septembre et d'octobre possèdent des débits moyens plus bas que ceux du mois de novembre. En ce qui concerne les valeurs de Q_{max} et Q_{moy}, elles sont peu affectées par cette absence de données en raison des débits faibles et de l'utilisation de la moyenne des autres mois de novembre à la place de celle de novembre 1991.

Table 6 : Table des valeurs des tests de corrélation de Pearson (r), Spearman (ρ) et Kendall (τ) et indice des tendances de Q_{max}, Q_{moy}, Q_{min} et de l'amplitude (Amp). Ces valeurs ont été calculés sur la période 1990-2005 pour les stations de Borja (BOR), San Regis (SRE), San Regis-Borja (SRE*), Requena (REQ) et Tamshiyacu (TAM).

	Q_{max}			Q_{moy}			Q_{min}			Indice des tendances			
STATION	**r**	**ρ**	**τ**	**r**	**ρ**	**τ**	**r**	**ρ**	**τ**	**Q_{max}**	**Q_{moy}**	**Q_{min}**	**Amp**
BOR	0.114	0.244	0.183	0.387	0.388	0.25	-0.457	-0.33	-0.192	0.31	1.04	-1.34	0.48
REQ	-0.508	-0.562	-0.483	-0.579	-0.55	-0.433	-0.722	-0.659	-0.5	-1.29	-2.09	-5.39	-0.38
SRE	0.57	0.524	0.4	0.623	0.644	0.45	0.136	0.026	0.067	2.06	2.18	0.87	2.53
SRE*	0.551	0.488	0.35	0.649	0.665	0.433				2.09	2.72		
TAM	-0.096	-0.071	-0.05	-0.081	-0.021	0.017	-0.239	-0.074	-0.07	-0.24	-0.18	-1.02	0.38

	Tendance positive significative à 99%
	Tendance positive significative à 90%
	Tendance positive non significative
	Pas de tendance
	Tendance négative non significative
	Tendance négative significative à 90%
	Tendance négative significative à 99%

Tout d'abord, remarquons la légère tendance à la baisse de tous les débits à la station de Tamshiyacu (Table 6 et Fig. 16), comme mentionné plus haut. Ensuite, observons que les débits augmentent à Borja et à San Regis (à part le Q_{min} de Borja) et qu'ils diminuent à Requena. Plus précisément, des tendances fortes existent pour les Q_{max} et Q_{moy} à San Regis et pour les Q_{moy} et Q_{min} de Requena. En ce qui concerne l'amplitude, si elle augmente fortement à San Regis, elle reste par contre à peu près inchangée aux autres stations.

De plus, pour Tamshiyacu aucune tendance n'est détectée avec les tests de Pearson, Spearman et Kendall ; les tests sont significatifs à plus de 90 % pour Q_{max} et Q_{moy} à San Regis, Q_{min} à Borja (seulement pour le test de Pearson) et tous les débits à Requena (Fig. 17 et table 6). Ceci signifie que les tendances calculées sont fiables pour ces débits et clairement non dues au hasard.

Ces deux paramètres, indices de tendances et significativité, indiquent donc une augmentation forte des débits à San Regis avec des maximaux plus hauts, une augmentation plus modérée des débits à Borja avec des minimaux plus bas et une diminution forte des débits à Requena avec des minimaux surtout, mais aussi des maximaux, plus bas. La distinction nord-sud effectuée sur l'ensemble du bassin amazonien montrant des débits en augmentation au nord et en diminution au sud peut donc être étendue au bassin du río Amazonas à Tamshiyacu : le río Marañón au nord voit ses débits augmenter tandis que le río Ucayali au sud les voit diminuer. De plus, si la comparaison entre ces tendances et celles trouvées par Espinoza (Espinoza *et al.*, 2007a) montre une continuité avec les tendances des bassins immédiatement à l'est de ceux de San Regis et de Requena. Avec l'aide des tendances dans tout le bassin amazonien et de la répartition des pluies (Espinoza *et al.*, 2007a et b), il est possible de dessiner une limite approximative des influences nord et sud, orientée nord-est – sud-ouest entre 4°S et 6°S (Fig. 16). Si la conclusion de l'opposition entre nord et sud est aussi valable pour les débits maxima, il faut prendre plus de précaution avec les minima, qui diminuent à Borja. Le parallélisme entre les deux stations de San Regis et de Requena est clairement mis en évidence et il est souligné par la similitude des valeurs des débits explicitée dans la partie sur les cycles hydrologiques. Les débits à Tamshiyacu, présentant très peu de tendance, correspondent donc à peu près à la somme des débits de ces deux stations ayant des tendances opposées. La station de Borja présente des résultats à part, où les tendances sont moins nettes. Ceci est sans doute dû à l'extension en latitude de ce bassin (de -2.00ºS à -10.50ºS).

En ce qui concerne la déforestation, Callède (Callède *et al.*, 2007) l'estime à 62 729 km² (disparition de 8.5 % de la forêt péruvienne) en 1990, à 95 371 km² (disparition de 13.0 % de la forêt) en 2003, alors qu'elle était nulle en 1976. Aucune étude précise globale de la déforestation n'existant au Pérou, il n'est pas possible de déterminer quelles sont les zones les plus durement touchées. La détermination d'une carte détaillée demanderait une longue étude à elle seule. Comme la tendance détectée des débits moyens à Tamshiyacu est très faible, il n'est pas possible de faire de lien avec la déforestation sur la période 1990-2005. La tendance à la baisse visible pour Q_{min} à cette même station pourrait par contre être due à la déforestation, qui entraînerait des étiages plus sévères (Fritsch, 1992). Les tendances dans les sous-bassins de Tamshiyacu ne peuvent pas être comparées aux tendances de déforestation à cause du manque de données de celles-ci.

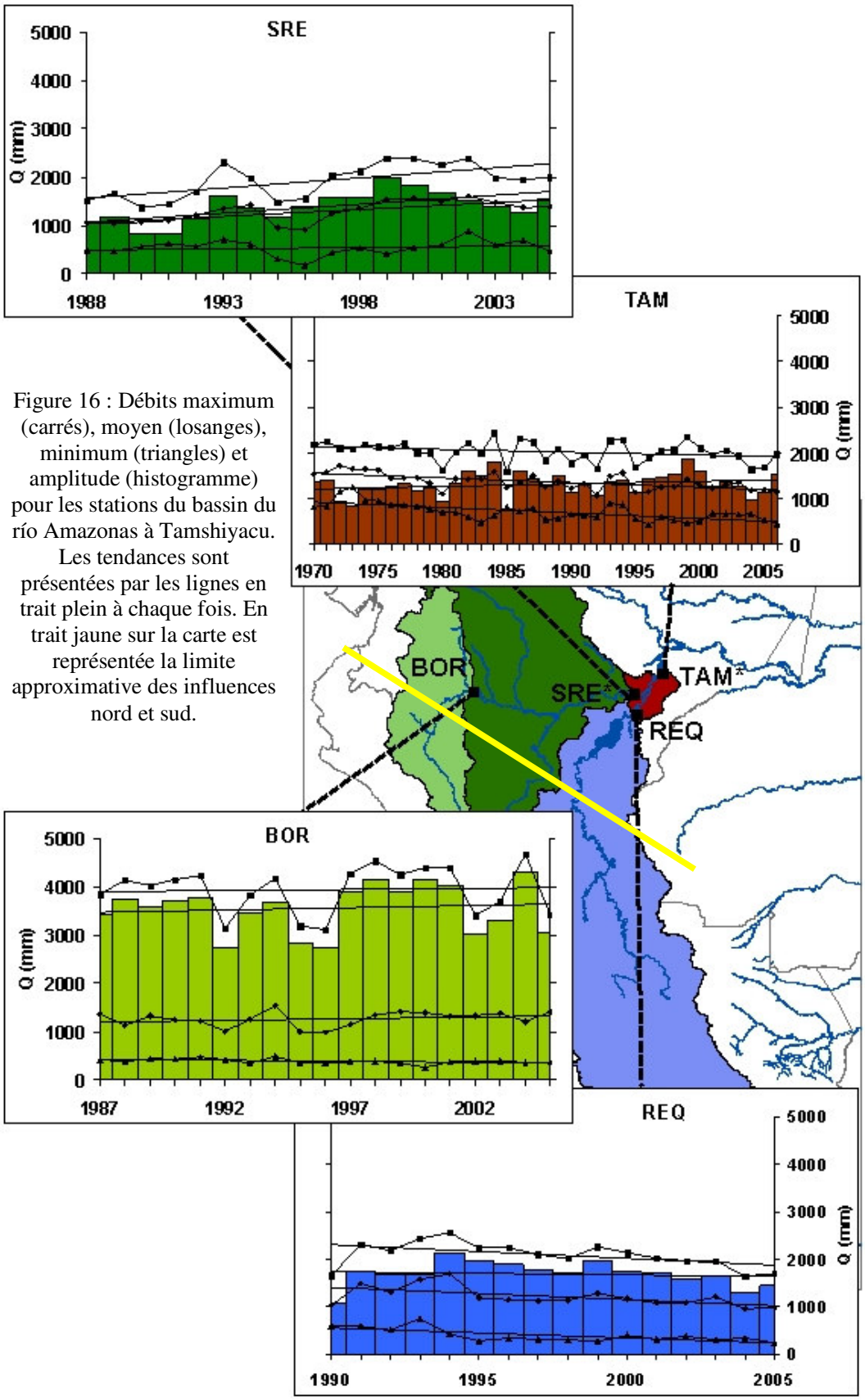
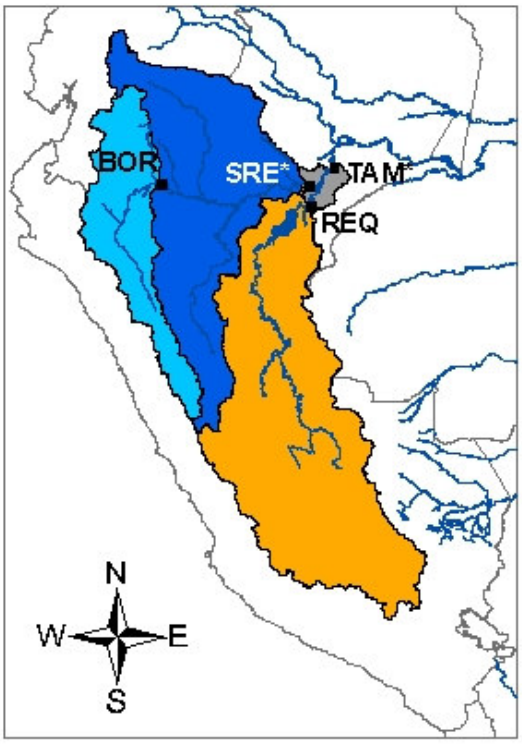


Figure 16 : Débits maximum (carrés), moyen (losanges), minimum (triangles) et amplitude (histogramme) pour les stations du bassin du río Amazonas à Tamshiyacu. Les tendances sont présentées par les lignes en trait plein à chaque fois. En trait jaune sur la carte est représentée la limite approximative des influences nord et sud.

Qmax



Qmoy

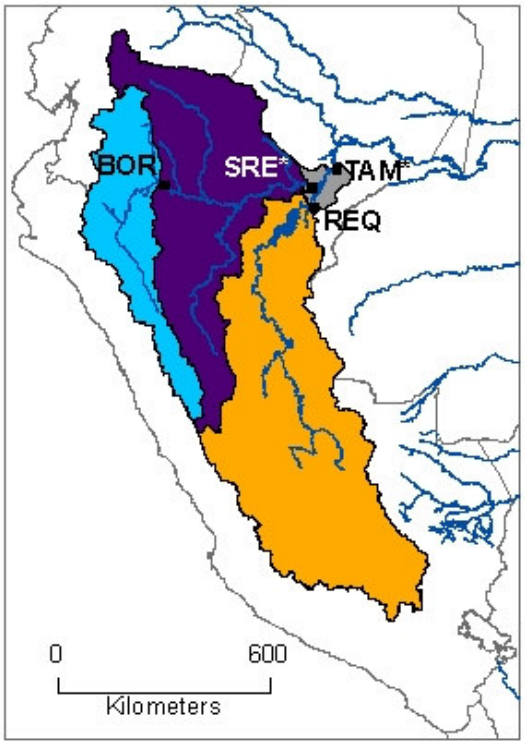
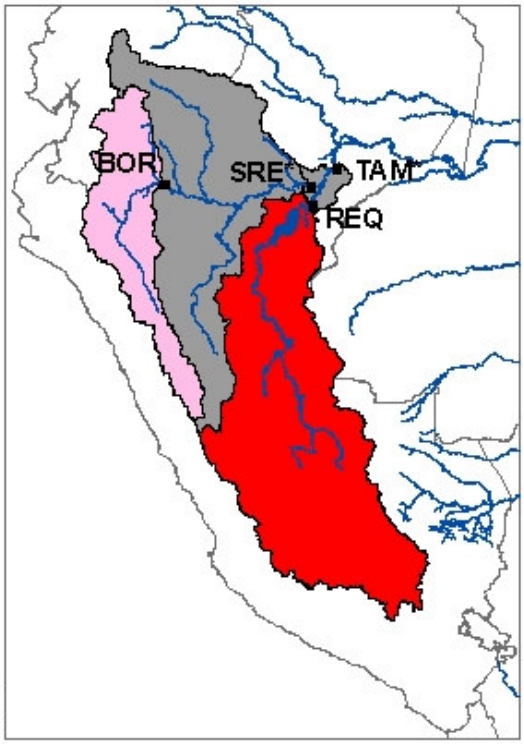
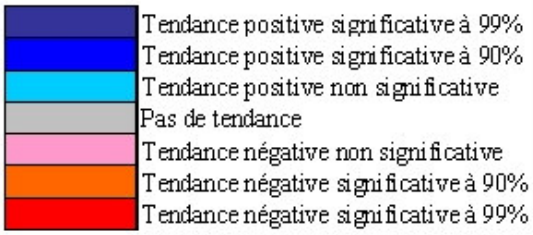


Figure 17 : Cartes de la significativité des tendances dans le bassin de Tamshiyacu (résultats les plus fréquents).

Note : Pour SRE et TAM, sont présentés les résultats pour tout le bassin et pas seulement le bassin intermédiaire.

Qmin





Les tendances des débits permettent ainsi de distinguer différentes zones dans le bassin de Tamshiyacu. Or le changement climatique global affecte tous les débits. Est-il possible alors de distinguer des influences différentes sur le bassin ?

4. Variabilité temporelle des pluies et corrélation avec les débits

Le changement climatique va ici être considéré à partir d'un des paramètres qu'il modifie : les précipitations. Ce paramètre est d'autant plus intéressant qu'une forte variabilité des pluies a été notée dans ce bassin (Espinoza *et al.*, 2006). La relation entre les tendances des précipitations (P) et des débits moyens (Q_{moy}) est donc recherchée.

Les deux séries temporelles ont donc été représentées sur le même graphique pour chacune des stations du bassin de Tamshiyacu (Fig. 18). Sur chacun des graphiques, les débits sont inférieurs aux précipitations dans la plupart des cas mais pas toujours. De plus, les valeurs des deux séries temporelles sont très proches : le coefficient d'écoulement (rapport L/P, table 3) est en moyenne de 0,8 pour San Regis et Requena et de 0,9 pour Borja et Tamshiyacu. Ces valeurs moyennes sont anormalement élevées (des valeurs normales en plaine amazonienne sont comprises entre 0,3 et 0,7 d'après Molinier *et al*., 1996) et les valeurs de débits supérieures à celles de pluies sont impossibles. En effet, une partie de la pluie est évaporée, une autre infiltrée et le reste s'écoule en surface, ce qui fait que le coefficient d'écoulement est forcément inférieur à 1. Toutes ces observations montrent que les données de pluie sont largement sous-évaluées.

Cependant, malgré les problèmes dans les valeurs absolues, les variations temporelles dans les lieux proches sont supposés similaires et donc les variations relatives des précipitations sont supposées bonnes : le calcul des tendances peut ainsi être effectué. Pour tester cette hypothèse, la corrélation entre les séries temporelles de pluie et de débits moyens a été calculée sur la période 1990-2004 (Table 7). Comme les pluies sont le moteur des écoulements, une forte corrélation devrait être trouvée.

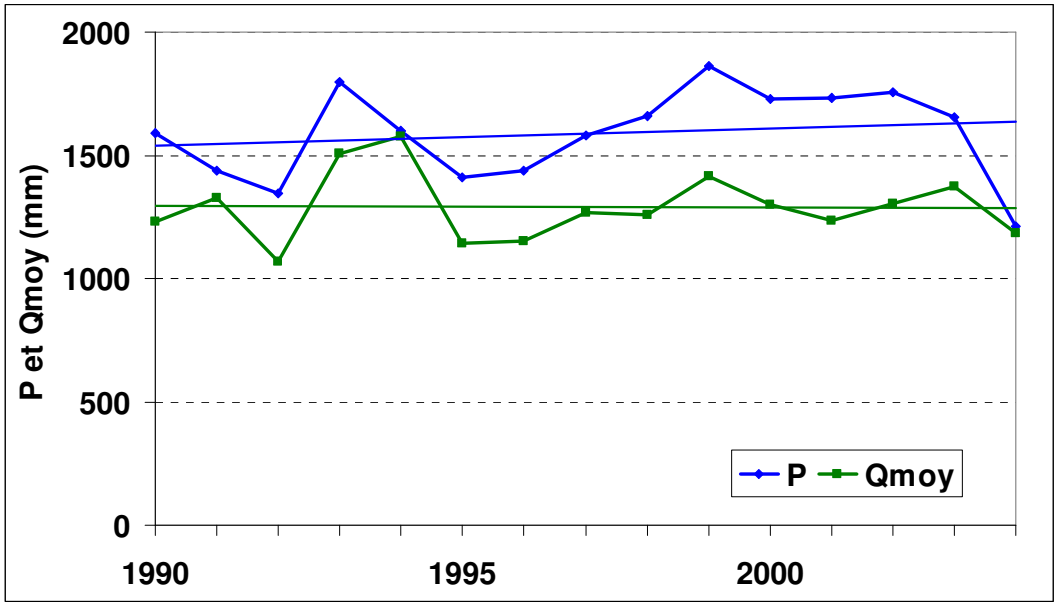


Figure 18.a : Tamshiyacu

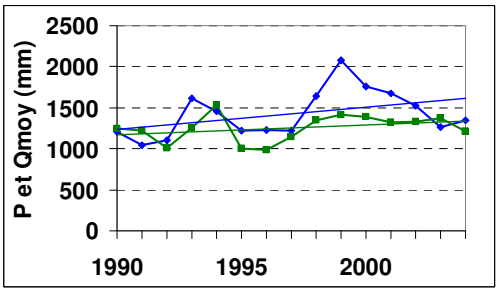


Figure 18.b : Borja

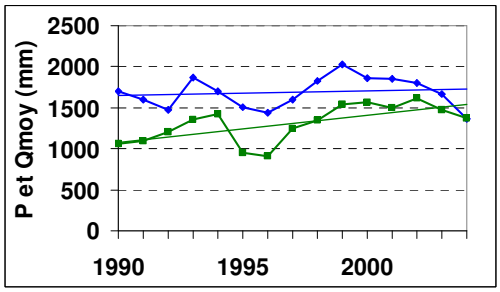


Figure 18.c : San Regis

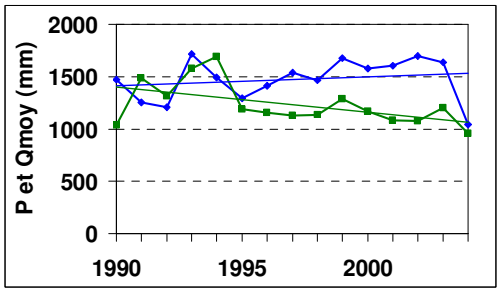


Figure 18.d : Requena

Figure 18: Pluies (P en losanges bleus) et débits moyens (Q_{moy} en triangles verts) sur la période 1990-2004, pour Tamshiyacu (18.a), Borja (18.b), San Regis (18.c) et Requena (18.d). Les tendances sont représentées par les droites en trait fin. Les valeurs sont en mm d'eau sur chacun des bassins.

Le test de signification est effectivement d'au moins 90 % dans tous les cas (Table 7), à part dans le bassin de Requena, ce qui est également clairement visible figure 18.d. Une grande réserve doit donc être émise sur les données de pluie dans ce dernier bassin, qui sont extrapolées à partir de quelques postes pluviométriques mal répartis sur le bassin (Fig. 6). La mauvaise corrélation pourrait aussi être due à des valeurs anciennes des débits faussées. Elles sont en effet estimées à partir de la courbe de jaugeage actuelle, aucune courbe ancienne n'ayant été effectuée, alors que le cours

d'eau s'est déplacé au cours du temps. La corrélation étant forte dans les autres bassins, l'hypothèse que les tendances soient bonnes peut y être validée. Cependant, une réserve doit quand même être émise sur les séries temporelles de pluie dans les bassins de San Regis et de Borja car peu de données sont disponibles en Equateur après 1997 et aucune corrélation n'y a été effectuée comme à Tamshiyacu. Seul le bassin de Tamshiyacu parait donc présenter des valeurs de précipitations acceptables sur la période 1990-2004.

	Corrélation P-Q_{moy}		
STATION	**r**	**ρ**	**T**
BOR	0.626	0.689	0.467
REQ	0.149	0.104	0.048
SRE	0.653	0.614	0.448
TAM	0.611	0.657	0.486

Tendance positive significative à 99%
Tendance positive significative à 90%
Tendance positive non significative
Pas de tendance
Tendance négative non significative
Tendance négative significative à 90%
Tendance négative significative à 99%

Table 7 : Valeur des tests de corrélation de Pearson (r), de Spearman (ρ) et de Kendall (τ) entre les séries temporelles de pluie (P) et de débit moyen (Q_{moy}). La corrélation a été effectuée sur la période 1990-2004. La significativité des tests est donnée par le code de couleur situé sous le tableau des valeurs.

La figure 18 présente les tendances des précipitations tandis que la table 8 présente les résultats des tests de tendances. Les tendances des pluies pour chacun des bassins sont à la hausse, de façon plus ou moins significative. Le bassin de Borja enregistre une forte augmentation de 1,9 % par an, la hausse est modérée sur le bassin de Requena (augmentation de 0,6 % par an) et elle est assez faible dans les bassins de San Regis et de Tamshiyacu (hausses respectivement de 0,3 % et de 0,4 % par an). Ces tendances ne sont pas significatives (Table 8), sauf à Borja où les tests de Spearman et Kendall donnent une fiabilité de 90 %. A San Regis ces deux tests ne détectent aucune tendance. Les précipitations augmentent donc sur tout le bassin de Tamshiyacu, de façon plus forte dans la partie sud (mais les valeurs sont très peu fiables dans cette partie) que dans la partie nord et de façon très forte dans le seul bassin andin. Cette hausse est donc en opposition avec la baisse des précipitations de 0,8 % par an observée par Espinoza (Espinoza *et al.*, 2006) sur la période 1970-1997 dans le bassin de Tamshiyacu. Ceci montre l'existence de deux tendances, une à la baisse des années 1970 au début des années 1990, suivie d'une période de hausse des débits. Il n'est pas possible non plus de faire le lien avec la déforestation, qui entraînerait une baisse des précipitations par diminution du recyclage de la pluie tombée sur la canopée (Salati *et al.*, 1978).

	Corrélation P-T				Indice des tendances de Q_{moy}-T
STATION	r	ρ	τ	Indice des tendances	
BOR	0.426	0.571	0.371	1.92	1.04
REQ	0.192	0.289	0.276	0.58	-2.09
SRE	0.13	0.082	0.01	0.33	2.18
TAM	0.168	0.261	0.219	0.43	-0.18

Table 8 : Indice des tendances et significativité de ces tendances des précipitations sur la période 1990-2004. T est le temps, r le coefficient de corrélation du test de Pearson, ρ celui de Spearman et τ celui de Kendall. Le code de couleur utilisé est explicité sous la table 7. La significativité représentée pour l'indice des tendances de la corrélation entre Q_{moy} et le temps est la plus fréquemment trouvée. Cette colonne, présentée à titre comparatif, est un rappel des résultats précédents.

Ces tendances sont enfin comparées à celles trouvées précédemment pour les débits moyens. Pour l'ensemble du bassin de Tamshiyacu, les pluies augmentent légèrement sur la période 1990-2004, alors qu'aucune tendance n'affecte les débits. Ceci peut être dû à une augmentation de l'infiltration ou de l'évaporation en moyenne sur le bassin, mais pas à la déforestation dont l'effet serait une augmentation des écoulements car la voûte forestière n'intercepte plus les précipitations (Fritsch, 1992). Dans le bassin sud de Requena, la faible hausse des pluies est accompagnée d'une forte baisse des débits. Ceci confirme que les valeurs des lames d'eau précipitée sont erronées car cette variation en sens inverse est très peu probable. Dans le bassin nord de San Regis, l'absence de tendance des précipitations est accompagnée d'une très forte hausse des débits. Cette relation entre les deux séries temporelles est fort peu probable mais éventuellement elle peut être due à une vidange des aquifères, une diminution du stockage des eaux précipitées et une baisse de l'infiltration. La fonte de glaciers andins ne peut pas être mise en cause ici car un rapide calcul montre que leur influence est négligeable sur l'hydrologie amazonienne (Table 9). Dans le bassin andin de Borja, la hausse significative des précipitations s'accompagne d'une faible hausse des débits. Cette relation entre pluie et débits est inverse à celle trouvée sur le bassin de San Regis, ce qui laisse supposer à des tendances de pluies erronées ou des comportements différents dans la région andine.

Surface des glaciers andins	2000 km²
Part de l'écoulement venant des glaciers	0,5 m/an/km²
Ecoulement venant des glaciers	1000 m/an
Part de l'écoulement vers l'Atlantique	2/3
Ecoulement réel vers l'Atlantique	21 m^3/s
Q_{moy} à TAM	32000 m^3/s
Part du débit due aux glaciers à TAM	0,07 %

Table 9 : Ordre de grandeur de la part du débit à Tamshiyacu dû à la fonte des glaciers.

Le seul bassin où les tendances des précipitations sont cohérentes avec les tendances des débits est Tamshiyacu, où les postes pluviométriques sont à peu près bien répartis (Fig. 6). Il faut cependant noter que même dans ce bassin, la situation de ces postes n'est pas parfaite car, dans la plaine amazonienne, ils sont tous localisés au bord des rivières, seuls endroits accessibles. Ainsi, aucun pluviomètre n'est présent sur les reliefs entre les bras de rivières, où la pluviométrie est supposée plus élevée, ce qui peut

être une des causes de la sous-estimation flagrante des valeurs des précipitations (Molion et Dallarosa, 1990). Dans les bassins de plus faible dimension, il existe de plus une mauvaise répartition géographique (Fig. 6). Les stations sont nombreuses dans la région andine, facile d'accès, avec des séries temporelles longues, tandis qu'elles sont rares dans la plaine amazonienne. Dans les Andes, le nombre de postes pluviométriques est encore insuffisant car la variabilité de la pluie y est très forte selon l'exposition au vent, l'altitude et la possibilité d'ascendance d'air humide (Johnson, 1976). Le gradient de précipitation peut donc être très fort sur une faible distance. De plus, les postes sont moins nombreux dans les régions supposées les plus pluvieuses, comme les versants exposés aux vents dominants, et certains des postes où les précipitations étaient les plus fortes ont été éliminés lors de la critique par la MVR car ils ne disposaient pas de séries temporelles suffisamment longues.

Afin de corriger la sous-estimation des lames d'eau précipitée sur les bassins, deux possibilités sont envisageables. La première consiste à trouver une corrélation entre l'altitude du bassin et les précipitations, notamment en plaine amazonienne. La précipitation moyenne sur le bassin sera alors extrapolée à la fois à partir des données de pluies existantes et de données d'altitude comme celles du SRTM. La deuxième solution consiste à évaluer les précipitations à partir des données satellites TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). Il faut cependant dans un premier temps examiner la corrélation entre les données pluviométriques au sol et les valeurs de précipitation calculées à partir des données satellites afin de corriger si besoin ces dernières et ainsi pouvoir calculer la lame d'eau sur tout le bassin. Cette deuxième solution est actuellement investiguée par un des étudiants du programme HyBAm-Pérou.

D. Conclusion

Les variations temporelles des débits dans le bassin du río Amazonas à Tamshiyacu ont ici été analysées, tout d'abord en examinant l'évolution des crues à différentes périodes de retour, puis les tendances des débits et enfin le lien entre les tendances des pluies et celles des débits étudiées auparavant.

L'observation des crues à Óbidos qui donne une idée de l'ensemble du bassin amazonien montre une tendance à l'augmentation sur le siècle dernier, confirmant les observations de Callède (Callède *et al.*, 2004). L'observation des crues dans le bassin de Tamshiyacu permet de distinguer les parties nord et sud, distinction confirmée par l'étude des tendances des débits moyens, maximum et minimum dans ce bassin : les débits augmentent dans la partie nord et diminuent dans la partie sud. Cette différence de comportement correspond à celle observée par Espinoza (Espinoza *et al.*, 2007a) sur l'ensemble du bassin amazonien. La limite de comportement est orientée nord-est – sud-ouest et située entre 4°S et 6°S.

La corrélation effectuée avec les précipitations n'est pas satisfaisante à cause de valeurs douteuses des précipitations calculées sans doute à cause de la mauvaise répartition des postes pluviométriques dans le bassin amazonien. Le lien entre les tendances et la déforestation est difficile à établir car les tendances observées sont souvent contraires aux effets connus de la déforestation : les débits moyens n'ont pas tous tendance à augmenter, les précipitations ne diminuent pas, etc. De toute manière, pour évaluer l'impact réel de la déforestation, il faudrait auparavant des données sur l'ensemble du bassin de Tamshiyacu.

A partir de cette étude, il est assez clair que des séries plus longues permettraient de mieux évaluer les variations temporelles, qui ne sont estimées ici que sur une quinzaine d'années. De même une densité plus forte de stations hydrologiques permettrait bien évidemment de mieux évaluer la variation spatiale des débits dans les bassins. L'utilisation de stations virtuelles, élaborées à partir de données altimétriques de satellites, pourrait être une solution. De plus, il serait primordial de réévaluer les lames d'eau précipitées, par exemple à partir de mesures de satellites ou encore à partir de l'altitude sur le bassin. La corrélation avec les séries temporelles de débits pourra ainsi être de nouveau analysée, ce qui permettra de faire le lien avec le changement climatique et/ou la déforestation. Une évaluation de la déforestation sur l'ensemble du territoire péruvien, chose aujourd'hui possible mais demandant un travail énorme, semble également indispensable afin de déterminer son impact réel sur les variables hydrologiques.

E. Remerciements

Je remercie Jean-Loup Guyot d'avoir accepté de me prendre en stage pour ces 5 mois et ainsi de m'avoir permis de découvrir le monde de l'hydrologie et ce pays fabuleux qu'est le Pérou.

Je remercie Jhan Carlo Espinoza et Philippe Vauchel pour leur patience devant mes questions et pour le temps qu'ils ont consacré à y répondre.

Je remercie aussi Pierre Ribstein pour m'avoir aidée à trouver ce stage, pour m'avoir conseillée sur les formations en hydrologie.

Un grand merci à toute les personnes du labo du programme HyBam-Pérou pour leur soutien de tous les jours, pour leur aide dans mon travail quand j'en avais besoin, pour m'avoir emmené sur le terrain, pour les sorties et le bon temps que nous avons eu ensemble. Un remerciement spécial à Hector pour m'avoir aidée à trouver un appartement et pour m'avoir prêté une de ses nombreuses bicyclettes pendant tout mon séjour.

Merci à ma famille pour leur soutien dans ce projet à l'autre bout du monde et de venir me rendre visite.

Un grand merci aussi à la promo de géol pour leurs coups de gueule (mais pas trop souvent non plus…) ou leurs délires dans ma boite mail. Merci à Pasca' pour les week-ends d'aventure aux quatre coins du Pérou. Et un remerciement spécial à Sam' et A^2 qui ont supporté mes coups de blues, mes considérations métaphysiques et mes craquages…

F. Références

[1] Albergel, J., Carbonnel, J.P., Grouzis, M., 1985. Sécheresse au Sahel : incidences sur les ressources en eau et les productions végétales : cas du Burkina Faso. *Veille Climatique Satellitaire* **7** *(Séminaire Télédétection Spatiale, 1985/03/13-15, Niamey),* 18-30.

[2] Brunet-Moret, Y., 1969. Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* **6** (3), 3-100.

[3] Brunet-Moret, Y., 1978. Recherche d'un ajustement. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* **15** (3), 261-280.

[4] Brunet-Moret, Y., 1979. Homogénéisation des précipitations. *Cah ORSTOM, sér. Hydrol.* **16** (3-4), 147-170.

[5] Callède, J., Guyot J.L., Ronchail, J., Molinier, M., de Oliveira, E., 2002. L'Amazone à Óbidos (Brésil) : étude statistique des débits et bilan hydrologique. *Hydrol. Sci. J.* **47** (2), 321-333.

[6] Callède, J., Guyot, J.L., Ronchail, J., L'Hôte, Y., Niel, H., de Oliveira, E., 2004. Evolution du débit de l'Amazone à Óbidos de 1903 à 1999. *Hydrol. Sci. J.* **49** (1), 85-97.

[7] Callède, J., Ronchail, J., Guyot, J.L., de Oliveira, E., 2007. Déboisement amazonien : son influence sur le débit de l'Amazone à Óbidos (Brésil). *Revue des sciences de l'eau,* sous presse.

[8] Cochonneau, G., Sondag, F., Guyot, J.L., Boaventura, G., Filizola, N., Fraizy, P., Laraque, A., Magat, P., Martinez, J.M., Noriega, L., Oliveira, E., Ordoñez Galvez, J.J., Pombosa, R., Seyler, F., Sidgwick, J., Vauchel, P., 2006. L'observatoire de recherche en environnement ORE HYBAM sur les grands fleuves amazoniens. *Climate variability and change – Hydrological impacts. (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006), IAHS Publ.* **308**, 44-50.

[9] DGAS (Dirección General de Aguas y Suelos), 1995. Vers une gestion intégrée des ressources hydriques au Pérou (Hacia una gestión integrada de los recursos hídricos en el Perú). Ministerio de Agricultura, Perú.

[10] Espinoza Villar, J.C., Fraizy, P., Guyot, J.L., Ordoñez Galvez, J.J., Pombosa, R., Ronchail, J., 2006. La variabilité des débits du Río 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**, 424-429.

[11] Espinoza Villar, J.C., Guyot, J.L., Ronchail, J., Fraizy, P., 2007a. Discharge trends in the Amazon basins. *J. Clim*, en préparation.

[12] Espinoza Villar, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Filizola, N., Noriega, L., Ordoñez Galves, J.J., Pombosa, R., Romero, H., 2007b. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon Basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *Int. J. Hydrol*, soumis 2007.

[13] Espinoza, J.C., Guyot, J.L., Ronchail, J., Guyomard, M., Noriega, L., Ordoñez Galves, J.J., Pombosa, R., Vauchel, P., Fraizy, P., 2007c. *Hydroclimatic variability in the Andean region of Amazon Basin*. Poster presentation, session HW 3008 Changes to Hydrological Extremes and Water Quality – IUGG 2007 Perugia. Présentation le 12 juillet 2007.

[14] Filizola, N., Guyot, J.L., 2004. The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon. *Hydrolo. Sci. J.* **49** (1), 143-153.

[15] Fritsch, J.M., 1992. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en Guyane française. Thèse, Collection Etudes et Thèses, Editions Osrtom, Paris, France, 392 p.

[16] Guyot, J.L., Jouanneau, J.M., Soares, L., Boaventura, G.R., Maillet, N., Lagane, G., 2007. Clay mineral composition of river sediments in the Amazon Basin. *Catena*, sous presse.

[17] Hiez, G., 1977. L'homogénéité des donnes pluviométriques. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* **14**, 129-172.

[18] Johnson, A.M., 1976. The climate of Peru, Bolivia and Ecuador. *World survey of climatology* **12**, 147-218.

[19] Kendall, M.G., 1975. Rank Correlation Methods. Griffins, London, 202 p.

[20] Lehmann, E.L., 1975. Nonparametrics : Statistical Methods Based on Ranks. Holden-Day, Inc, California, 404 p.

[21] Mialocq, L., Cochonneau, G., 2005. Délimitation des bassins versants à l'aide d'Arcgis 8. Rapport de volontariat civil à l'IRD, *Publ. HyBAm-Pérou*, 23 p.

[22] Molinier, M., Guyot, J.L., de Oliveira, E., Guimarães, V., 1996. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. *L'hydrologie tropicale : géosciences et outils pour le développement (Actes de la conférence de Paris, mai 1995), IAHS Publ.* **238**, 209-222.

[23] Molion, L.C.B., Dallarosa, R.L.C., 1990. Pluviometria da Amazônia : são os dados confiáves ? (Pluviométrie de l'Amazonie : les données sont-elles fiables ?). *Climanálise*, **5** (3), 40-43.

[24] Salati, E., Marques, J., Molion, L.C.B., 1978. Origem e distribução das chuvas na Amazônia (Origine et distribution des pluies en Amazonie). *Interciencia,* **3**(4), 200–205.

[25] Vauchel, P., 2005. HYDRACCESS. Logiciel de gestion et traitement de données hydro-météorologiques, version 2.1.4. Téléchargeable sur www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess.htm.

[26] Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G., 2002. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.* **259**, 254-271.