



HAL
open science

Déboisement amazonien : son influence sur le débit de l'amazone à Obidos (Brésil)

Jacques Callède, Josyane Ronchail, Jean-Loup Guyot, Eurides de Oliveira

► To cite this version:

Jacques Callède, Josyane Ronchail, Jean-Loup Guyot, Eurides de Oliveira. Déboisement amazonien : son influence sur le débit de l'amazone à Obidos (Brésil). *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 2008, 21 (1), pp.59-72. 10.7202/017931ar . ird-00394813

HAL Id: ird-00394813

<https://ird.hal.science/ird-00394813>

Submitted on 12 Jun 2009

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.

Déboisement amazonien : son influence sur le débit de l'Amazone à Óbidos (Brésil)

Jacques CALLEDE*, QE15, conj. S, casa 51, Guará II, CEP 71050-191 Brasília (DF), Brésil, cld@apis.com.br, Téléphone : (55 61) 3381 951

Josyane RONCHAIL, LOCEAN/IPSL et Département de Géographie de l'Université ParisVII, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

Jean-Loup GUYOT, IRD, Casilla 18 1209 Lima 18, Pérou

Eurides DE OLIVEIRA, Agência Nacional de Águas (ANA), Setor Policial, Area 5, Quadra 03, Bloco L, CEP 70610-200 Brasília (DF), Brésil

Résumé: cette étude complète l'ébauche publiée dans *Evolution du débit de l'Amazone à Óbidos de 1903 à 1999*. Sur les 4680.10^3 km² du bassin versant amazonien limité à Óbidos, 341.10^3 km² ont été déjà déboisés de 1976 à 2003. L'impact de ce déboisement sur les débits moyens annuels est mis en évidence en utilisant le Bilan hydrologique, calculé de 1940 à 2003. L'évolution du coefficient d'écoulement permet d'estimer à 5% l'augmentation du débit moyen annuel sur 22 ans (1981-2003). Le nombre de fortes crues a quintuplé. Par contre, aucune influence du déboisement sur les étiages n'a été décelée.

Mots-clés : Amérique du Sud, bassin amazonien, Óbidos, pluviométrie, débit, bilan hydrologique, déboisement.

Abstract: This survey complete our former paper *Evolution of the Amazon discharge at Óbidos from 1903 to 1999*. In the Amazon basin until Óbidos (4680.10^3 km²), 341.10^3 km² have been deforested between 1976 and 2003. The impact of this deforestation on the mean annual discharge is estimated using a Water balance approach from 1940 to 2003. The evolution of the runoff coefficient enables to compute a 5% increase of the mean annual discharge in 22 years (1981-2003). The number of strong floods is five time higher during this period than it was before. On the other hand, it seems that there is no influence of the deforestation on the low flows.

Key-words : South America, Amazon catchments, Óbidos, rainfall, discharge, water balance, deforestation.

1 - INTRODUCTION

Le déboisement de la forêt amazonienne est un phénomène humain qui n'a réellement commencé à s'amplifier que durant la décennie 1970. En 2003, le déboisement global atteint 679.10^3 km² (soit 1,23 fois la superficie de la France) mais celui de son bassin versant limité à Óbidos n'est que de 342.10^3 km², superficie déjà importante.

Comme nous disposons, aujourd'hui, de données précises concernant la pluviométrie et les débits, il est possible de savoir si ce déboisement a une influence sur les débits et quelle est son importance. C'est le but de cette étude, dont l'ébauche a été donnée dans la publication *Evolution du débit de l'Amazone à Óbidos de 1903 à 1999* (CALLEDE *et al.*, 2004). Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme Hydrologie et géochimie du Bassin amazonien (*Hidrologia e geoquímica na Bacia Amazônica* - HiBAm), suivant les accords bilatéraux de coopération France/ Brésil, où les partenaires principaux sont l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, anciennement ORSTOM) pour la France et l'Agence Nationale des Eaux (*Agência Nacional de Águas* - ANA) pour le Brésil.

2 - LE BASSIN VERSANT DE L'AMAZONE À ÓBIDOS (Fig. 1)

Située à près de 800 km de l'Océan atlantique, Óbidos est la station hydrométrique de référence la plus aval pour la mesure des débits de l'Amazone. Cette station (01°56' S - 055°30' W) draine un bassin continental de 4680.10^3 km². L'altitude du zéro de l'échelle limnimétrique serait de 2,6 m et l'Amazone déborde dans la ville basse vers 10 m. L'influence de la marée océanique n'y est plus très importante : 10 cm tout au plus en étiage. Cette amplitude n'entraîne qu'un écart en débit de $\pm 2\%$, valeur que l'on peut considérer comme négligeable.

La relation hauteur-débit a été bien définie jusqu'à octobre 2003 (fin de l'année hydrologique clôturant cette étude).

Le bassin concerne 7 pays : Bolivie (15,4% de la superficie totale), Brésil (52,7%), Colombie (7,2%), Equateur (2,8%), Guyana (0,3%), Pérou (20,5%) et Venezuela (1,1%).

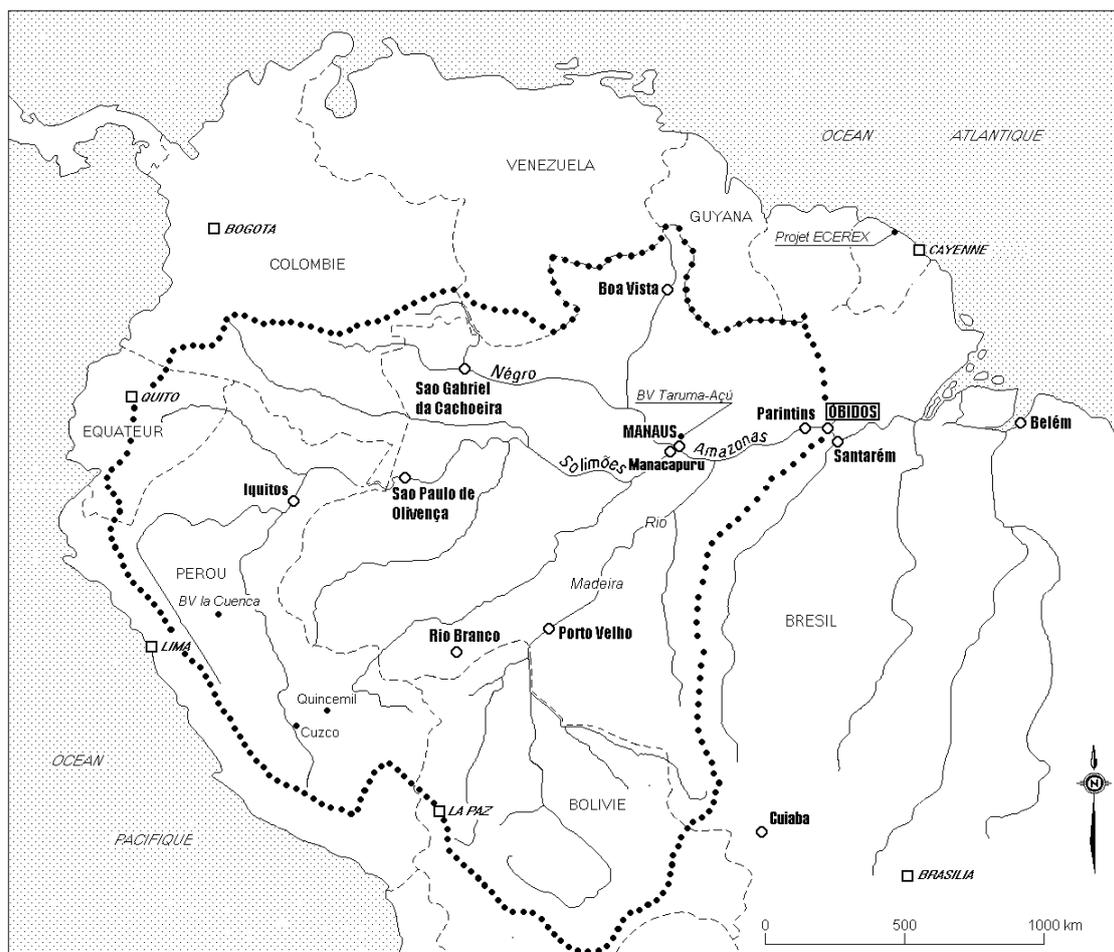


Figure 1. Carte du bassin amazonien limité à Óbidos

3 – FORÊT ET ÉCOULEMENT

Un peu partout dans le Monde, "la sagesse conventionnelle veut que les forêts agissent en tant que "éponges" géantes, absorbant l'eau pendant les fortes pluies et la libérant lentement quand elle est la plus nécessaire, pendant les mois secs de l'année. La réalité est bien plus complexe." (Food and Agricultural Organization –FAO- et Center for International Forestry Research - CIFOR, 2005).

L'historique des idées concernant le rôle régulateur de la forêt a été établi par ANDRÉASSIAN (2002) et s'étend de l'Antiquité jusqu'à nos jours. En voici un très bref résumé :

Dès le 19^{ème} siècle, en France, deux factions vont s'opposer : celle des "forestiers" et celle des "ingénieurs". Les "forestiers" pensent - en se basant sur les faits historiques - que la forêt régularise systématiquement les débits. Les "ingénieurs" veulent étudier le problème d'une façon scientifique en mesurant pluie et débit sous divers couverts végétaux. Le travail des "ingénieurs" a conduit naturellement à l'expérimentation de BELGRAND (1853) qui, au grand dam des "forestiers", en déduit en 1853 qu'il n'y a pas de grande différence de comportement hydrologique entre un bassin boisé et un bassin dénudé. Aux Etats-Unis, les programmes de mesures sur bassins versants commencent en 1910 et se poursuivent jusqu'en 1970, la conclusion étant que la forêt consomme davantage d'eau qu'aucun autre type de couvert végétal et que, en général, il semble que les crues rares sont peu affectées par le boisement ou le reboisement. A la différence des bassins versants représentatifs, il s'agit là de bassins versants expérimentaux (ou appariés) sur lesquels une partie de la couverture végétale a été modifiée.

La FAO et le CIFOR (2005) concluent : "contrairement à la croyance populaire, les forêts n'ont seulement qu'une influence limitée sur les importantes inondations en aval, surtout sur les événements à grande échelle. Il est exact qu'à l'échelle locale les forêts et les sols de forêt sont capables de réduire l'écoulement, généralement comme étant le résultat de l'augmentation de l'infiltration et de la capacité de stockage. Ceci n'est vrai seulement que pour des événements pluvieux

à petite échelle, qui ne sont pas responsables des graves inondations en aval".

Les hydrologues français estiment aujourd'hui qu'il est bien difficile de cerner le rôle hydrologique exact de la forêt : "il est aussi faux de penser que la forêt n'a pas d'influence sur les crues que d'affirmer qu'elle les réduit systématiquement !" (COSANDEY *et al.*, 2005).

Pour ce qui concerne le bassin amazonien, les bassins versants représentatifs sont rares. Citons (Fig. 1) le bassin versant du Rio Taruma-Açu (23,5 km²), proche de Manaus et observé de septembre 1979 à septembre 1980 et de juillet 1981 à juin 1983 (MARQUES FILHO *et al.*, 1981; GÓES RIBEIRO et MARQUES FILHO, 1983) et celui de la Cuenca (0,7 ha) au Pérou (ELSENBERG et CASSEL, 1990) observé de septembre 1986 à avril 1989 sur l'interception de la pluie par la voûte forestière (canopée).

Fruits d'une coopération interdisciplinaire entre l'ORSTOM (aujourd'hui IRD) et le CTFT/CIRAD (Centre Technique Forestier Tropical/Centre International pour la Recherche en Agronomie Tropicale), les bassins expérimentaux du Projet ECEREX (**E**cologie, **E**rosion, **E**xpérimentation) sont situés en Guyane française, sous forêt dense (Fig. 1). L'expérimentation a commencé en 1977 et s'est terminée fin 1984. Ce sont dix bassins dont la superficie va de 1,0 à 1,6 ha. Deux bassins servent de témoins et sont laissés en forêt. Les huit autres ont été d'abord défrichés mécaniquement, puis réaménagés : plantations de pins ou d'eucalyptus, reconstitution naturelle de la forêt après débardage, pâturages, verger, culture traditionnelle. La synthèse des études effectuées a été réalisée par FRITSCH (1986). Bien que situés un peu en dehors du bassin amazonien (mais quand même sous le même climat) cette unique étude de bassin expérimental est très intéressante : ses conclusions indiquent que si la parcelle déboisée est laissée telle quelle, après trois à six ans la régénération forestière assume en tout ou en partie les fonctions de la forêt originale. Mais en cas de remplacement définitif de la forêt par du pâturage comme c'est le cas, à plus de 90%, sur le bassin amazonien brésilien (Ph. LÉNA, *communication personnelle*, 2002), l'écoulement restera, principalement par disparition de la canopée, définitivement supérieur d'environ 30% à ce qu'il était sous forêt (FRITSCH, 1993). Cette valeur est strictement indicative à cause de l'effet d'échelle entre les parcelles expérimentales de l'ordre de l'hectare et celle de l'immense bassin amazonien.

Les effets du déboisement sur l'écoulement

Plusieurs auteurs ont traité ce problème d'une façon générale. Citons tout d'abord SIOLI (1985, 1989), et aussi FEARNSIDE (1990).

Au point de vue strictement hydrologique, le déboisement (FRÄNZLE, 1979; SIOLI, 1989; FRITSCH, 1986; SHUKLA *et al.*, 1990; LAURANCE, 1998) entraînerait :

-a) une augmentation des écoulements par disparition de l'interception de la pluie par la voûte forestière (canopée). Cette interception a été évaluée à 19,8% (FRANKEN *et al.*, 1982) dans les environs du Bassin représentatif du Rio Taruma-Açu, de 15 à 34% (FRITSCH, 1986) sur le Projet ECEREX et à 16,9% (ELSENBEER *et al.*, 1994) sur le Bassin représentatif de la Cuenca. Ceci se traduit, dans le Bilan hydrologique, par une augmentation du coefficient d'écoulement associée à une diminution de l'Evapotranspiration réelle (ETR), de par le fait que la pluviométrie de référence du Bilan est mesurée sur des pluviomètres situés hors forêt.

-b) une augmentation des écoulements par diminution de la percolation de l'eau dans le sol et par l'augmentation du ruissellement superficiel, qui n'est plus freiné par la végétation. Ceci occasionnera des crues plus brutales, avec une augmentation des débits de pointe.

-c) des étiages plus sévères car les réserves en eau du sol ont diminué.

4 – MATÉRIELS ET MÉTHODES

4.1 - Données utilisées pour cette étude

Elles concernent l'évolution dans le temps du déboisement du bassin, de sa pluviométrie et enfin de celle des débits mesurés à Óbidos. La première estimation donnée dans la publication *Evolution du débit de l'Amazone à Óbidos de 1903 à 1999* (CALLÈDE *et al.*, 2004) a montré la nécessité de déterminer ces paramètres avec la meilleure précision possible. Ceci est essentiel pour la pluviométrie et les débits car les différences dans leur évolution d'une année à l'autre sont faibles sur ce bassin (CALLÈDE, 2002). Sinon le "signal" que l'on essaie de mettre en évidence sera noyé dans les "bruits de fond".

4.1.1 Evolution des superficies déboisées

La délimitation des superficies déboisées s'est faite en utilisant le plus grand nombre de sources d'informations disponibles, à savoir :

- la Carte de la Végétation de l'Amérique du Sud, publiée par l'UNESCO (UNESCO, 1980). Elle indique la situation en 1976,
- l'étude de la FAO concernant le déboisement de l'Amérique latine (FAO, 2003). Elle traite de l'évolution des superficies déboisées, pays par pays,
- pour le Brésil, les données de l'*Instituto de Pesquisas Espaciais* (INPE, <http://www.inpe.br>), qui dans son *Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia* (PRODES, <http://www.obt.inpe.br/prodes>) suit l'évolution du déboisement de la forêt amazonienne brésilienne année par année. Les techniques de télédétection y sont pleinement employées,
- pour le Pérou, celles de l'*Instituto Nacional de Recursos Naturales* (INRENA) à Lima.
- en Equateur, les travaux de l'Ingénieur forestier G. ROBERTO SÁNCHEZ et ceux du *Ecuadorian Government Remote Sensing Research* (CLIRSEN),
- les données d'Organisations Non Gouvernementales, provenant du *Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales* (WRM, 2001) pour l'ensemble du bassin amazonien, et celles de *Amigos da Terra- Amazônia Brasileira* (???) uniquement pour le Brésil.
- celles de la Revue *Nature* (HOUGHTON *et al.*, 2000),
- le témoignage de A. LARAQUE (*communication personnelle*) constatant l'absence de déboisement sur le bassin amazonien vénézuélien.

Une synthèse, pays par pays, est réalisée à partir de cet ensemble de données. Ceci est nécessaire, à cause du caractère passablement subjectif de la détermination, sur le terrain, des superficies déboisées. Là, chaque expert a sa propre façon d'estimer le taux de déboisement. Bien souvent, la mise à jour de l'information est défailante, de même que la surveillance systématique du couvert forestier.

Les résultats de cette évaluation sont donnés sur le Tableau 1.

Tableau 1. Superficies déboisées, de 1976 à 2003 sur le bassin amazonien limité à Óbidos

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

La colonne "Forêt (1976)" correspond aux résultats de l'analyse de la *Carte de la Végétation de l'Amérique du Sud*, publiée par l'UNESCO (1980)

4.1.2 - Evolution de la pluviométrie moyenne du bassin

La pluviométrie annuelle 1945-1998 (CALLÈDE *et al.*, 2004) a été affinée et complétée mais nous sommes restés très exigeants sur la qualité des mesures. La nouvelle détermination va de 1940 à 2003. Les données pluviométriques mensuelles proviennent tout d'abord des Services nationaux des pays concernés. Elles ont été complétées par quelques fichiers, anciens ou récents, établis par l'IRD auxquels s'ajoutent deux (énormes) fichiers pluviométriques mondiaux :

- celui du *National Oceanic and Atmospheric Administration/ Global Historical Climatology*

Network (NOAA/GHCN) disponible sur <http://cdiac.esd.ornl.gov/ghcn/ghcn.html>,

- celui du professeur M.HULME (Centre de recherches universitaires de l'University of East Anglia, Norwich, UK) que l'on trouve sous <http://www.cru.uea.ac.uk>

De ce fait, il a été possible de calculer la pluviométrie moyenne annuelle en utilisant 163 postes pluviométriques, au lieu des 43 de l'étude précédente : i) - quatre-vingt-quatre sont situés au Brésil, ii) - vingt-quatre sont au Pérou, iii) - vingt-deux en Bolivie, iv) - vingt en Equateur, v) huit en Colombie et vi) - cinq au Venezuela.

Chaque station a fait l'objet d'un dossier EXCEL regroupant toutes les pluviométries mensuelles des divers fichiers disponibles. Une synthèse a été faite et les observations manquantes ont été reconstituées en utilisant soit les valeurs des stations voisines, soit par corrélation linéaire avec au moins deux séries d'observations complètes sur la période 1940-2003. L'année hydrologique commence le 01 novembre et se termine le 31 octobre de l'année suivante.

L'homogénéité des valeurs annuelles est vérifiée par la méthode du Vecteur régional (BRUNET-MORET, 1979; L'HÔTE, 1986).

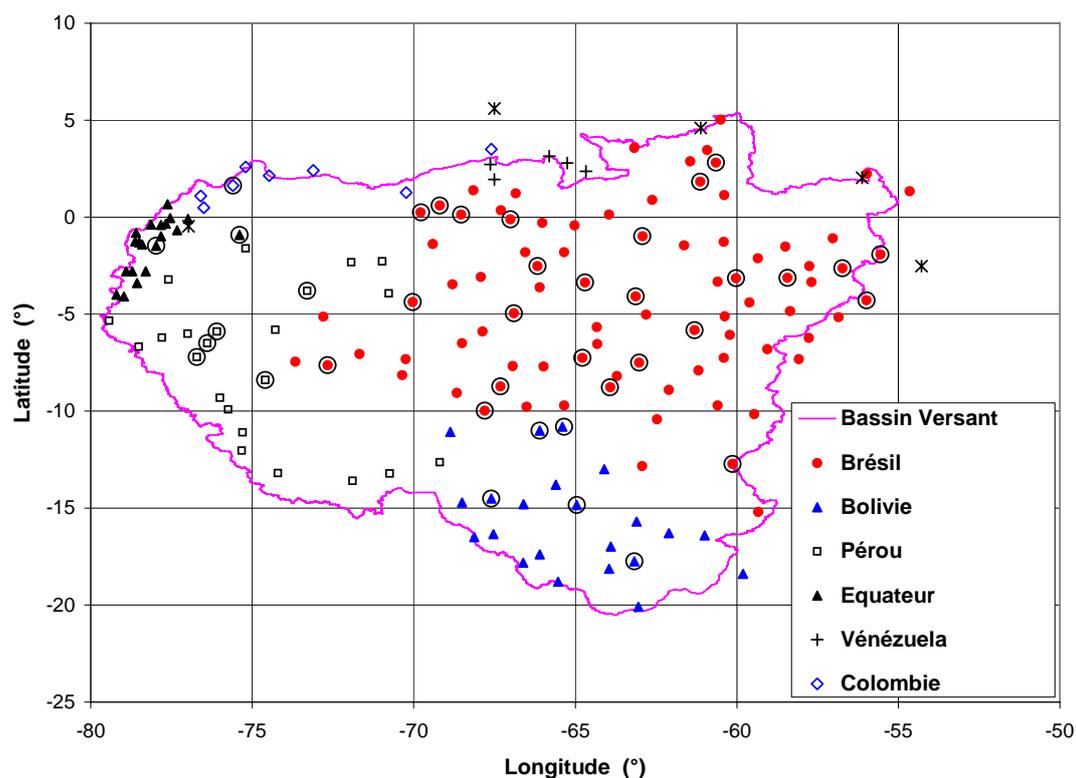


Figure 2. Emplacement des postes pluviométriques utilisés pour la période 1940-2003. Ceux de la période 1945-1998 sont également indiqués

L'emplacement des postes pluviométriques est indiqué sur la Fig. 2. D'une part elle montre que, par rapport à l'étude de 1945-1998, la densité et la répartition des stations ont été améliorées et, d'autre part, que des postes du piémont andin (Colombie, Equateur, Pérou et Bolivie) ont été pris en compte (43 postes au lieu des 5 de l'étude précédente). Sur le piémont andin, en effet, des lignes de crête séparent les régions "au vent" (*barlavento*) de celles "sous le vent" (*sotavento*), les écarts pluviométriques annuels pouvant être très important par effet de foehn. Au Pérou, par exemple, il pleut 10 fois plus à Quincemil (7,0 m/an) qu'à Cuzco (0,7 m/an) alors que les deux stations ne sont distantes que de 145 km (Fig. 1).

En traitant séparément les régions "sous le vent" de celles "au vent" et en utilisant ces 163 postes pluviométriques, la détermination de la pluviométrie moyenne annuelle par la méthode des polygones de THIESSEN (THIESSEN, 1911) apparaît aussi précise que celle des isohyètes. Ajoutons que la méthode de THIESSEN repose sur un tracé immuable de la médiatrice entre deux postes pluviométriques alors que le dessin des isohyètes risque d'être subjectif car soumis à l'interprétation du dessinateur.

La série des pluviométries annuelles 1940-2003 du bassin a été comparée avec l'ancienne série 1945-1998, comme le montre la Fig. 3.

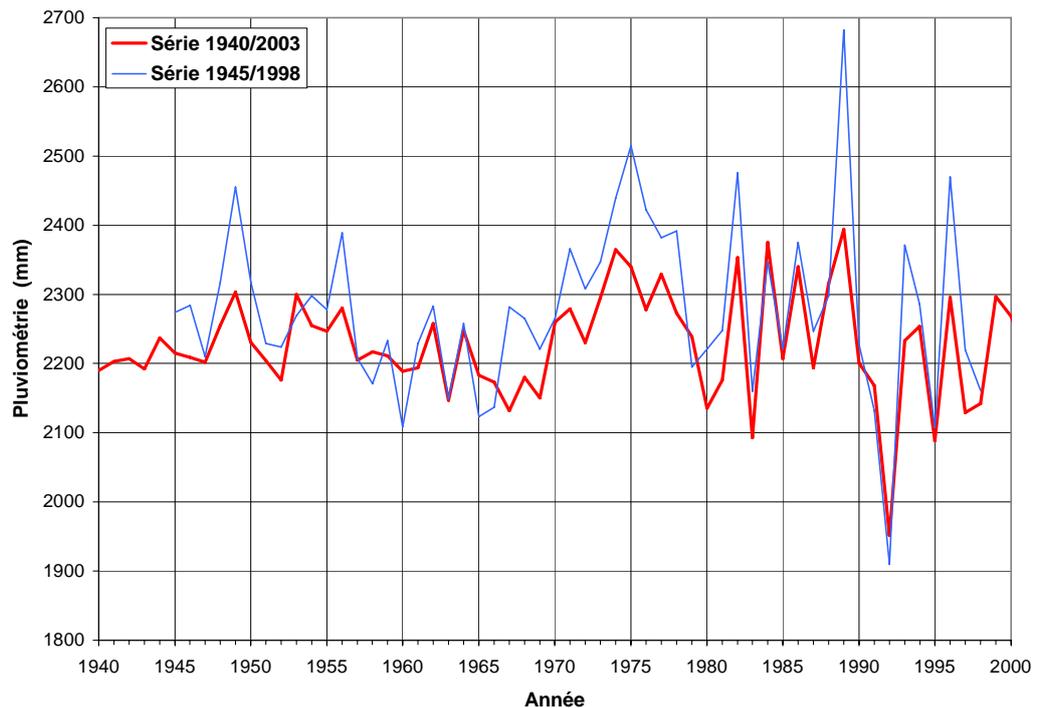


Figure 3. Comparaison des pluviométries moyennes du bassin

La corrélation linéaire entre les 2 séries est bonne : $r = 0,852$. La Fig. 3 montre que l'augmentation du nombre de postes pluviométriques tempère les années à forte pluviosité.

La pluviométrie du bassin amazonien a fait l'objet de deux études bien particulières.

- la première, de SALATI *et al.* (1978), traite du recyclage de la pluie tombée sur la canopée. Cette pluie est re-évoaporée, condensée à nouveau par convection et va retomber plus loin. Le phénomène a été mis en évidence par trois méthodes. D'après les auteurs, ce recyclage représenterait environ 50% de la pluie initiale, que le déboisement modifierait à l'échelle du bassin.

- MOLION et DALLAROSA (1990), dans la seconde étude, se demandent si les données pluviométriques sont fiables, de par le fait que les postes d'observation sont généralement situés au bord des cours d'eau, principale voie d'accès en Amazonie. Les phénomènes convectifs, de la rivière vers l'intérieur des terres, feraient que la pluviométrie à l'intérieur des terres - non mesurée faute de pluviomètre - serait plus forte que celle mesurée au bord de la rivière.

4.1.3 - Evolution du débit annuel moyen (module) à Óbidos

Les transformations hauteur-débit (CALLÈDE *et al.*, 2002) ont été continuées jusqu'au 31 octobre 2003. Rappelons que cette relation hauteur-débit n'est pas univoque en hautes eaux (c'est à dire que pour une même hauteur d'eau observée à la station d'Óbidos et des dates différentes, le débit risque de ne pas être le même) et a fait l'objet d'une étude particulière (CALLÈDE *et al.*, 2001). Nous avons utilisé sept mesures de débit, effectuées de 2001 à 2003, pour vérifier leur bonne adéquation à la relation hauteur-débit utilisée pour cette transformation.

Module, crue et étiage sont déterminés pour chaque année hydrologique.

5 – RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1 - Analyse de l'évolution pluie-débit

La Fig. 4 montre l'évolution des quatre séries de données annuelles (pluie, modules, crues et étiages). De 1940 à 1980, la pluviométrie varie lentement d'une année à l'autre, puis en "dents de scie" de 1980 à 1999. Ceci se retrouve sur la variation des modules, déterminés par une méthode totalement différente.

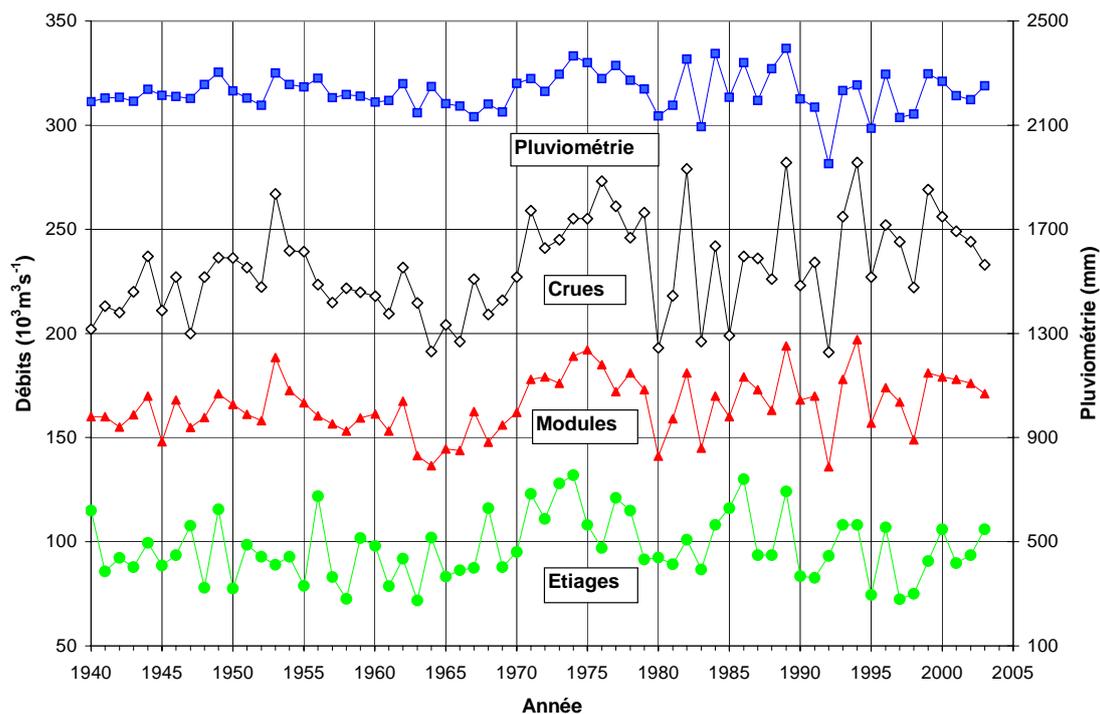


Figure 4. Evolution des 4 séries statistiques

5.1.1 - Tendances dans les séries de données (Tableau 2)

Les tendances ont été analysées en s'appuyant sur les moyennes mobiles sur 5 ans, centrées, ainsi que sur les courbes polynomiales.

Pluviométrie

La tendance générale de la série 1940-2003 est à la stabilité.

En détaillant davantage, il ressort que la série présente une légère montée de 1940 à 1955, suivie d'une légère baisse de 1955 à 1967. Une nouvelle montée, plus marquée va de 1967 à 1975, puis baisse également marquée de 1975 à 1981. A partir de 1981, les oscillations en "dents de scie" enchaînent croissances et décroissances, la tendance générale jusqu'en 2003 étant une très légère baisse. La dispersion est faible ($\pm 1,90\%$) de 1940 à 1980, plus importante ($\pm 3,67\%$) ensuite.

Tableau 2. Tendances des pluviométries, modules, crues et étiages
Tendances du coefficient d'écoulement

<i>Année</i>	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000
Pluviométrie	lgmt +		lgmt -		+	-	lgmt -
Modules	+		-		+	-	+
Crues	+		-		+	lgmt +	
Etiages	-			+	-		
Coef. Ecoulement	-			+	-	+	

(+ : croissance, - : décroissance, lgmt : légèrement)

Modules

La tendance générale est à l'augmentation.

La série croît de 1940 à 1954, décroît de 1954 à 1964. Nouvelle croissance marquée jusqu'en 1975, suivie d'une décroissance jusqu'en 1981. Enfin croissance jusqu'en 2003. La dispersion est plus importante que pour la pluviométrie ($\pm 6,33\%$).

Crues

Là aussi, la tendance générale est à l'augmentation.

La série croît nettement de 1940 à 1953, décroît tout aussi fortement jusqu'en 1966. Nouvelle croissance bien marquée jusqu'en 1977 mais moins soutenue de 1977 à 2003. La dispersion est de $\pm 6,39\%$ de 1940 à 1980, $\pm 8,24\%$ de 1980 à 2003.

Etiages

La tendance générale 1940-2003 montre une très légère augmentation.

De 1940 à 1965, la tendance est à la baisse, suivie d'une augmentation très nette des débits de 1965 à 1974. De 1974 à 2003, la tendance est à la baisse. La dispersion est forte, de 1940 à 2003 : $\pm 12,42\%$.

Les 4 séries évoluent de façon semblable, sauf peut-être les étiages.

5.1.2 - Recherche statistique sur les séries de données

La pluviométrie et les étiages ont une distribution aléatoire et suivent la Loi normale (loi de GAUSS). Aucune rupture n'a été décelée (LEE et HEGHINIAN, 1977 ; PETTITT, 1979 ; HUBERT *et al.*, 1989).

Les modules et les crues suivent également la Loi normale mais avec une distribution non aléatoire. Pour ces deux séries, une rupture a été décelée en 1970 (LEE et HEGHINIAN, 1977; HUBERT *et al.*, 1989). Cette rupture de 1970, assez générale tant en Afrique sahélienne qu'en Amérique du Sud (CALLÈDE *et al.*, 2004) apparaît comme un "effet de bascule" entre les deux continents. En Amérique du Sud, les débits augmentent après 1970 sur les rios Negro (Uruguay), Parana et Paraguay (GENTA *et al.* (1998); MÜLLER *et al.* (1998); CUTIM *et al.* (2000); COLLISCHONN *et al.* (2001). En Afrique les débits diminuent sur le Congo à Brazzaville (LARAQUE *et al.*, 2001), l'Oubangui à Bangui ou le Sénégal à Bakel (CALLÈDE, *travaux personnels*) et cette diminution coïncide avec la grande sécheresse sahélienne.

La cause exacte de cet "effet de bascule" n'est pas encore clairement expliquée.

Corrélation pluie-débit

Nous retrouvons ici des valeurs proches de celles de la publication *Evolution du débit de l'Amazone à Óbidos de 1903 à 1999* (CALLÈDE *et al.*, 2004).

Le coefficient de corrélation linéaire, r , est de 0,695 entre pluviométrie et modules. Il est de 0,660 entre pluviométrie et crues, valeurs voisines du fait de l'excellente corrélation entre crues et modules ($r = 0,913$). Il est beaucoup plus lâche avec les étiages : 0,574 avec la pluie et 0,463 avec les modules.

5.2 – Impact du déboisement. Analyse et discussion

5.2.1 - Impact sur le débit moyen annuel (Module)

Plutôt que d'utiliser, pour les différents paramètres, leurs valeurs réduites à la moyenne, nous avons préféré travailler avec le Bilan hydrologique qui permet de comparer la pluie moyenne et le débit à l'exutoire. Le *Glossaire International d'Hydrologie* (UNESCO et WMO, 2000) en donne la définition :

$$P = Q + ETR + \Delta R \quad (1)$$

où :

P : pluviométrie moyenne du bassin (en mm)

Q : débit à l'exutoire (en m^3/s). Pour pouvoir comparer le débit aux autres paramètres exprimés en mm de hauteur d'eau, Q doit être converti en *lame d'eau écoulée (Le)*, qui est "la hauteur d'une nappe répartie sur une surface horizontale égale à la superficie du bassin et de volume égal au volume écoulé à l'exutoire" (ROCHE, 1963). Cette lame écoulée est appelée aussi *lame équivalente* (ROCHE, 1963).

ETR : Evapotranspiration Réelle (en mm), c'est à dire eau réellement consommée par évaporation du sol et pour les besoins végétatifs.

ΔR variation des réserves en eau souterraine (en mm).

Pour le bassin de l'Amazone à Óbidos et à l'échelle annuelle,
P est pluviométrie moyenne annuelle du bassin (en mm) et Q est le débit moyen annuel (module) à Óbidos.

$$Le = T.Q/S \quad (2)$$

où :

T : durée de l'année, en secondes (soit 31 536 000 s),

Q : débit en m³/s,

S : superficie du bassin, en km² (soit 4 680 100 km²).

Pour à Óbidos, la variation ΔR est considérée comme négligeable (Callède *et al.*, 2002).

Dans l'équation 1, nous connaissons P, Q et ΔR . Son application donnera l'ETR. La valeur moyenne de l'ETR, de 1940 à 2003, est de 1112 mm (pour une pluviométrie inter-annuelle de 2227 mm).

Coefficient d'écoulement

Egalement défini dans le *Glossaire International d'Hydrologie* (UNESCO et WMO, 2000) et par ROCHE (1963), le *Coefficient d'écoulement* est le rapport

$$K = Le / P \quad (\%) \quad (3)$$

avec

Le : lame d'eau écoulee annuellement,

P : pluviométrie moyenne annuelle du bassin.

K représente ici la part de la pluie annuelle du bassin qui va ruisseler dans le réseau hydrographique amazonien et arriver à Óbidos. C'est le seul paramètre utilisé dans ce qui suit.

D'une façon générale, ce coefficient est assez constant au cours de la période 1940-2003. Il varie de 40,9 à 58,9% (valeur moyenne 50,8 %) mais, en détaillant davantage, on distingue une tendance à une légère baisse, de 1940 à 1965, une nette augmentation de 1965 à 1975 suivie d'une baisse aussi nette jusqu'en 1981. A partir de 1965, la tendance est nettement à l'augmentation. Cette tendance a été rappelée en dernière ligne du Tableau 2.

Ceci est confirmé par une courbe de tendance polynomiale d'ordre 4 (plus générale que celle de l'ordre 5) et, surtout, par les moyennes mobiles sur 5 ans (Fig. 5).

La distribution statistique des coefficients d'écoulement suit une Loi normale mais la série n'a pas un caractère aléatoire. Le test de segmentation des séries d'Hubert *et al.* (1989) indique une rupture en 1963 et une autre en 1967.

Quelles sont les causes des variations du Coefficient d'écoulement ?

a- la Rupture de 1970

Il est indéniable que la rupture généralisée de 1970 a eu une influence sur la variation du Coefficient d'écoulement.

La Fig. 4 indique qu'elle se retrouve, sous la forme d'une "bosse", sur la pluviométrie, les crues, les modules et les étiages. Elle est très nette sur les moyennes mobiles du coefficient d'écoulement de la

Les paramètres augmentent vers l'année 1965, passe par un maximum en 1975 et décroissent jusque vers 1981. Les tests statistiques n'ont pas décelé de rupture sur cette "bosse".

b- le Déboisement

Jusqu'en 1960, la superficie déboisée du bassin amazonien brésilien pouvait être considérée comme négligeable (HOUGHTON *et al.*, 2000).

Elle n'était que de 0,34% en 1976 et ce n'est qu'à partir de 1985 (3,16%) qu'elle commence à devenir notable (Tableau 1) et à croître de façon continue tout comme le Coefficient d'écoulement.

La Fig. 6 rassemble, sur le même graphique, la pluviométrie moyenne annuelle du bassin, les coefficients d'écoulement et les taux de déboisement pour la période 1981-2003 (c'est à dire postérieure à la "bosse").

Figure 5. *Evolution du Coefficient d'écoulement.*

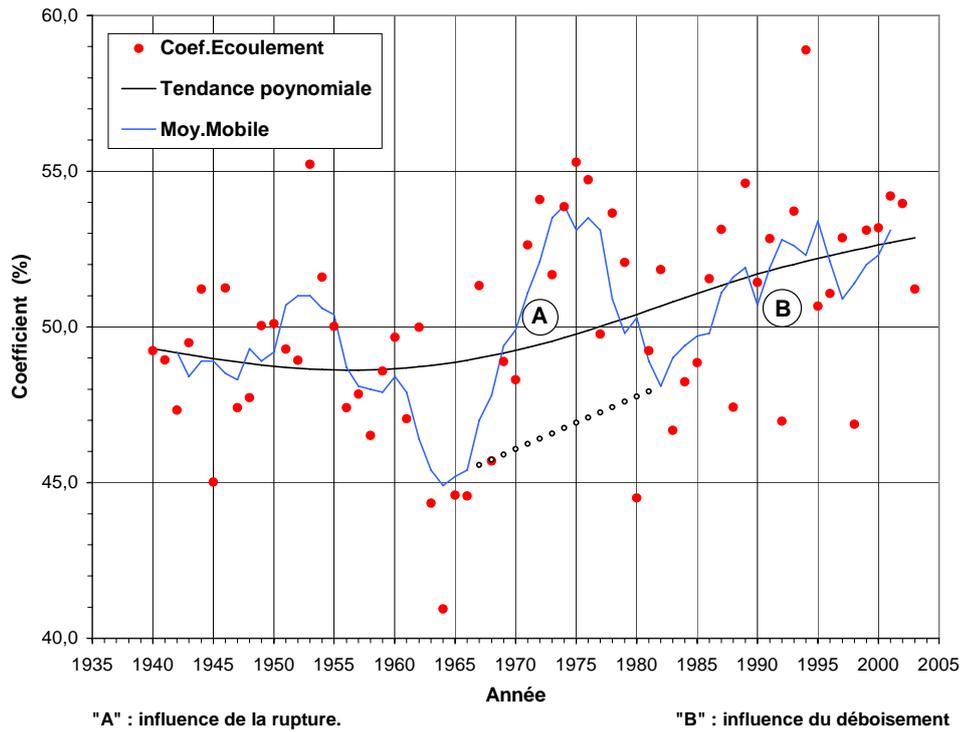
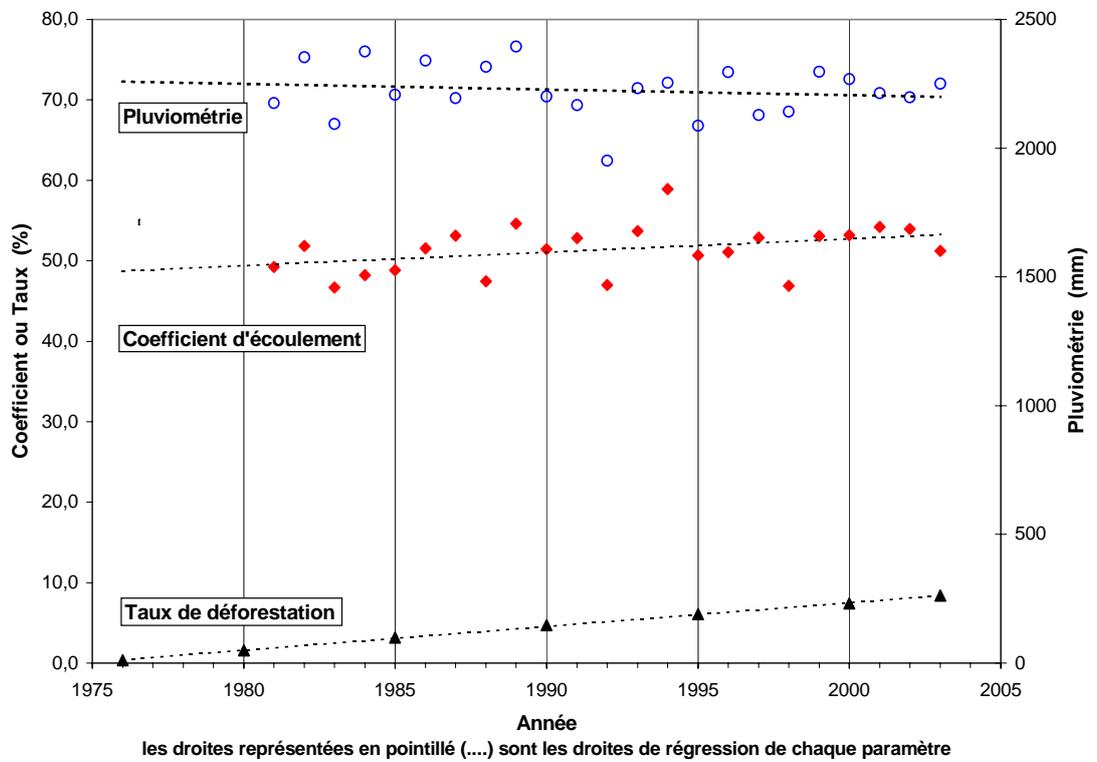


Figure 6. Période 1981-2003. Distribution de la Pluviométrie moyenne annuelle, du Coefficient d'écoulement et du Taux de déboisement.



Les droites de régression, pour ces trois paramètres durant cette période, sont

également représentées. Elles indiquent :

a- que la tendance des coefficients d'écoulement et du taux de déboisement est positive de 1981 à 2003. Egalement, la droite de régression des modules (non représentée Fig. 4) indique une croissance,

b- qu'au contraire, celle de la pluviométrie décroît légèrement. Cette décroissance est confirmée par les tendances polynomiales d'ordre 2 à 6.

Ainsi l'écoulement augmente alors que la pluviométrie diminue légèrement ou reste stationnaire.

Ceci implique que les conditions d'écoulement ont changé. Le taux de déboisement augmentant durant cette période, il est logique de penser que le déboisement est la cause de l'augmentation des débits. Cela a été exposé plus haut ("*les effets du déboisement sur l'écoulement*", point a-).

c- autres causes

Jusqu'à présent, seules la rupture de 1970 et le déboisement nous paraissent être les causes de l'augmentation du coefficient d'écoulement.

Mais restons prudent et gardons-nous d'être trop affirmatif : l'hydrologie de l'Amazonie est chose compliquée et il ne serait pas impossible que d'autres facteurs interviennent.

d- séparation des influences

Il n'est pas possible de connaître exactement la date de début du déboisement sur le bassin amazonien en entier. Si l'on se base sur la Fig. 5 et sur les moyennes mobiles représentées, le déboisement commencerait à se faire sentir dès 1965. La droite de régression du coefficient d'écoulement de la Fig. 6, prolongée vers la gauche, indiquerait un coefficient d'écoulement *théorique* de 46,9% au lieu de 44,6% *observé*.

La "bosse" viendrait en superposition, comme représenté sur la Fig. 5, de l'augmentation liée au déboisement.

Cette hypothèse paraît très acceptable car elle est en accord tant avec l'évolution des coefficients d'écoulement qu'avec celle du taux de déboisement.

e- estimation de l'influence du déboisement sur les modules

En utilisant les droites de régression de la pluviométrie et du coefficient d'écoulement, et en faisant le calcul inverse du Bilan, l'augmentation du débit moyen annuel est estimée à $8,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sur la période 1981-2003 (22 ans). Ceci représente une augmentation globale de 5% sur cette même période.

5.2.2 - Impact sur les crues

L'impact sur les crues est très visible avec l'augmentation du nombre des fortes crues (Fig. 4).

Le Tableau 3 montre l'augmentation, de 1904 à 2003, du nombre des crues supérieures à 250 000 m³/s (soit environ 7,6 m de hauteur de l'Amazonie à la station hydrométrique) qui occasionnent une inondation dans la ville basse d'Óbidos.

Tableau 3. Augmentation du nombre de fortes crues et des étiages sévères

Décennie	04/13	14/23	24/33	34/43	44/53	54/63	64/73	74/83	84/93	94/03
Débit > 250 000 m ³ /s										
Crues	2	2	0	0	1	0	1	6	2	4
Débit < 80 000 m ³ /s										
Etiages	2	1	1	1	2	3	0	0	0	3

Ce Tableau est éloquent. De 1904 à 1963, il ne s'est produit que 5 fortes crues en 60 ans.

Depuis 1964 (début du déboisement) et en 2 fois moins de temps (30 ans), il s'en est produit 13, soit 5,2 fois plus. Il y a bien augmentation du nombre de fortes crues. On retrouve bien là un des effets du déboisement cités plus haut ("*les effets du déboisement sur l'écoulement*", point b-)

5.2.3 - Impact sur les étiages

Il est impossible ici de déceler la moindre influence du déboisement. Au contraire, le Tableau 3 et la Fig. 4 montrerait une tendance à l'augmentation des débits, en parfaite contradiction avec le point c- "*les effets du déboisement sur l'écoulement*", cité plus haut. Le nombre d'étiages sévères (où le débit descend à 80.000 m³/s et en dessous) est de 10 pour la période 1904-1963 et de 3 seulement pour 1964-2003.

Rappelons que les débits de basses eaux à Óbidos sont importants (CALLÈDE *et al.*, 2002). La valeur minimale du débit observé une année sur dix (période 1902–1999), 78 000 m³ s⁻¹, est de même ordre de grandeur que la crue du Congo (70 000 m³ s⁻¹) de 1961, observée à Brazzaville, et qui serait de période de retour au moins centenaire (FEYMANS, 1962). La distribution aléatoire des débits d'étiage est une seconde explication.

6 - CONCLUSION

Pour pouvoir comparer pluie et débit, le biais de la lame d'écoulement Le (issue du Bilan hydrologique) a été préféré à celui des valeurs réduites à la moyenne, car plus proche de la réalité hydrométrique. Le coefficient d'écoulement annuel, issu de Le , en est une application et son évolution a été étudiée de 1940 à 2003, conjointement avec celles de la pluviométrie annuelle et du taux de déforestation.

Cette étude montre que, de 1981 à 2003, la pluviométrie est stationnaire et même légèrement en baisse tandis que coefficient d'écoulement et taux de déforestation sont à la hausse. Ceci conduit logiquement à penser que le déboisement pourrait être la cause de l'augmentation du débit des modules. Cette augmentation reste toutefois modeste : 386 m³/s par an. Elle est de même ordre de grandeur que celle des modules sous l'effet d'une augmentation de la pluviométrie (CALLÈDE *et al.*, 2004), de 1903 à 1981 : 241 m³/s par an

D'un autre côté, de 1963 à 2003, le nombre de fortes crues, qui occasionnent une inondation dans la ville basse d'Óbidos, est 5,6 fois plus élevé que de 1903 à 1963. Cette nette augmentation serait aussi une conséquence du déboisement.

Par contre rien n'a été observé sur les basses eaux.

Ainsi l'influence du déboisement sur les débits de l'Amazone à Óbidos serait :

- nette sur les crues
- bien faible sur les modules
- nulle sur les étiages

La taille de cet immense bassin versant (près de 6 millions de km²) et des superficies déboisées a probablement amplifié les anomalies liées au déboisement et permis de les détecter. A l'inverse, ANDRÉASSIAN (2002) et COSANDEY *et al.* (2005) travaillant sur des bassins dont les superficies ne dépassent pas 100 km², n'ont pu rien déceler. La grande régularité du régime du bas Amazone (CALLÈDE *et al.*, 2002) nous a également facilité la tâche. Enfin nous nous sommes attachés à travailler sur des paramètres les plus exacts possibles, à cause des faibles variations observées d'une année à l'autre.

Sur le bassin amazonien la pluviométrie moyenne annuelle, pour la période 1940-2003, est de 2227 mm. L'évapotranspiration réelle (ETR) est de 1112 mm. Elle est toujours inférieure à l'évapotranspiration potentielle ETP (quantité d'eau susceptible d'être évaporée par le bassin versant quand l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant). Plusieurs chercheurs ont déterminé la valeur de l'ETP du bassin amazonien. Les résultats de leurs travaux, récapitulés par LEOPOLDO *et al.* (1982), concordent pour la plupart pour une ETP aux environs de 1450 mm. L'ETR représenterait 77% de l'ETP. C'est dire que 77% des besoins en eau du sol et de la végétation seraient actuellement satisfaits.

Tant que la pluviométrie sur le bassin amazonien restera toujours aussi abondante et à

condition que le déboisement n'augmente pas de façon catastrophique, une transformation de la couverture actuelle en *caatinga* (végétation arbustive d'épineux du Nordeste brésilien) paraît bien peu probable.

Il serait souhaitable de continuer cette étude sur le bassin amazonien en traitant d'autres bassins versants d'au moins 500.10³ km², par exemple ceux du Rio Negro à Manaus, Rio Solimões à Iquitos, Rio Madeira à Porto Velho, etc. Là aussi, le respect de la précision sera prioritaire.

7 – REMERCIEMENTS

Nous remercions, en tout premier lieu, Ph. VAUCHEL (pour ses données pluviométriques et pour son calcul automatique des coefficients de THIESSEN, méthode aujourd'hui incluse dans son logiciel *Hydracces*, <http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess.htm>) et G. COCHONNEAU (pour ses nombreux fichiers pluviométriques du bassin amazonien), tous deux à l'IRD. Nous remercions également P. FRAISY, A. LARAQUE et Ph. MAGAT, également à l'IRD. Nous avons apprécié, à l'ANA, l'aide apportée par V. S. GUIMARÃES et R.N. BORGÈS, qui nous ont communiqué les données hydrométriques brésiliennes nécessaires à ce travail.

8 – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMIGOS DA TERRA - AMAZÔNIA BRASILEIRA. <http://www.amazonia.org.br>.
- ANDRÉASSIAN V. (2002). Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Univ. P. et M. Curie, Paris, France, 276 p.
- BELGRAND E. (1853). De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux pluviales. *Annuaire de la Société Météorologique de France*, 1, 176-193.
- BRUNET-MORET Y. (1979). Homogénéisation des précipitations. *Cah. ORSTOM, sér. Hydro*. XVI(3-4), 147-170.
- CALLÈDE J., P. KOSUTH et E. DE OLIVEIRA. (2001). Etablissement de la relation hauteur-débit de l'Amazone à Óbidos: méthode de la dénivelée normale à «géométrie variable». *Hydrol. Sci. J.* 46(3), 451-463.
- CALLÈDE J., J.L. GUYOT, J. RONCHAIL, M. MOLINIER et E. DE OLIVEIRA (2002). L'Amazone à Óbidos (Brésil): étude statistique des débits et bilan hydrologique. *Hydrol. Sci. J.* 47(2), 321-333.
- CALLÈDE J., J.L. GUYOT, J. RONCHAIL, Y. L'HÔTE, H. NIEL et E. DE OLIVEIRA (2004). Evolution du débit de l'Amazone à Óbidos de 1903 à 1999. *Hydrol. Sci. J.* 49(1) 85-97.
- COSANDEY C., J. LAVABRE, C. MARTIN et N. MATHYS (2005). Conséquences de la forêt méditerranéenne sur les écoulements de crue. *Forêt méditerranéenne*, XXVI(2), juin 2005, 169-176.
- COLLISCHON W., C.E.M. TUCCI et R.T. CLARKE (2001). Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay : part of a wider phenomenon of climate change ? *J. Hydrol.*, 245, 218-238.
- CUTIM E.M.C., L.C.B. MOLION et D. NECHET (2000). Chuvas na Amazônia durante o século XX (Pluies en Amazonie durant le XXème siècle). *XI^e Congrès brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro, Brésil, 16-20 oct. 2000, 1327-1333.
- ELSENBEER H. et D. K. CASSEL (1990). Superficial processes in the rain forest of western Amazonia. *IAHS Publ. no. 192*, 9 p.
- ELSENBEER H., D. K. CASSEL et L. ZUNIGA (1994). Throughfall in the terra firme forest of western Amazonia. *J. Hydrol. (NZ)*. 32(2), 30-44.
- FAO (Food and Agricultural Organization) (2003). Situación forestal en la región de America latina y el Caribe 2002 (Situation forestière dans les régions de l'Amérique latine et des Caraïbes 2002). Oficina regional de la FAO para America latina y el Caribe, Santiago, Chile, 109 p.
- FAO et CIFOR (Center for International Forestry Research) (2005). Forests and Floods. Drowning in fiction or thriving on facts ? ed. by CIFOR & FAO, Bogor Barat, Indonesia, 40 p.
- FEARNSIDE P.M. (1990). Environmental Destruction in the Brazilian Amazon. *The Future of Amazonia: Destruction or Sustainable Development ?* (ed. D.Goodman & A.Hall), 179-225. MacMillan, Londres, UK.
- FEYMANS G. (1962). Note sur la crue du fleuve Congo en 1961. *Bull. de l'Acad. Royale des Sci. Outre-Mer*, Bruxelles, Belgique, 1962, 293-297.
- FRANKEN W., P.R.LEOPOLDO, E. MATSUI et M.N.G. RIBEIRO (1982). Estudo da

intercepção da água de chuva em cobertura florestal amazônica do tipo terra firme (Etude de l'interception de l'eau de pluie par le couvert forestier amazonien de type "terra firme"). *Acta Amazônica*, Manaus, Brésil, 12, 327-331.

FRÄNZLE O. (1979). The water balance of the tropical rain forest of Amazonia and the effect of human impact. *Appl. Sci.*, 7, 88–117.

FRITSCH J.M. (1986). L'augmentation du ruissellement après défrichement mécanisé de la forêt amazonienne. Les bassins-versants "ECEREX" en Guyane française. *XIX^e Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Paris, France, Rapport n°8, 10p.

FRITSCH J.M. (1993). The hydrological effects of clearing tropical rainforest and of the implementation of alternative land uses. *Hydrology of Warm Humid Regions*, IAHS Pub. no. 216, 53-66.

GENTA J., G. PEREZ-IRIBARREN et C. MECHOSOS (1998). A recent increasing trend in streamflow of rivers in Southeastern South America. *J. of Climate*, 11, 2858-2862.

GÓES RIBEIRO M. de N. et A. de O. MARQUES FILHO (1983). Bacia representativa do Rio Taruma-Açu (Bassin représentatif du Taruma-Açú). *V^e Symposium brésilien d'hydrologie et de ressources hydriques*, Blumenau, Brésil, 7 p.

HOUGHTON R.A., D.L. SKOLE, C.A. NOBRE, J.L. HACKLER, K.T. LAWRENCE et W. H. CHOMENTOWSKI (2000). Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *NATURE, Lond., UK*, 403, 20 January 2000, 301-304.

HUBERT P., J.-P. CARBONNEL et A. CHAUCHE (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* 110, 349–367.

LARAQUE A., G. MAHÉ, D. ORANGE et B. MARIEU (2001). Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. *J. Hydrol.*, 245, 104-117.

LAURANCE W. F. (1998). A crisis in the making: responses of Amazonian forests to land use and climate change. *Tree*, 13, 411–415.

LEE A.F.S. et S.M. HEGHINIAN (1977). A shift of the Mean Level in a Sequence of Independent normal random variables - A Bayesian approach. In : *Technometrics*, 19(4), 503-506.

LEOPOLDO P.R., W. FRANKEN et E. SALATI (1982). Balanço hídrico de pequena bacia hidrográfica em floresta amazônica de terra firme (Bilan hydrique d'un petit bassin hydrographique en forêt amazonienne de "terra firme"). *Acta Amazônica*, Manaus, Brésil, 12(2), 333-337.

L'HÔTE Y. (1986). Contrôle de la qualité et de l'homogénéité des données pluviométriques par la méthode du vecteur des indices annuels de précipitation. Deuxièmes Journées Hydrologiques de l'Orstom à Montpellier (16–17 septembre 1986). *Collection Colloques et Séminaires de l'Orstom*, Orstom, Paris, France, 37–52.

MARQUES FILHO A. de O., M. de N. GÓES RIBEIRO, J.M. DOS SANTOS et E. SALATI (1981). Simulação de escoamento superficial em bacias representativas na Amazônia (Simulation de l'écoulement superficiel sur bassins représentatifs en Amazonie). *IV^e Symposium brésilien d'hydrologie et de ressources hydriques*, Fortaleza, Brésil, 9 p.

MOLION L.C.B. et R.L.C. DALLAROSA (1990). Pluviometria da Amazônia : são os dados confiáveis ? (Pluviométrie de l'Amazonie : les données sont-elles fiables ?). *Climanálise*, 5(3), 40-43.

MÜLLER I.I., C.M. KRÜGER et E. KAVISKI (1998). Analysis of the stationary of hydrological series in the incremental basin of Itaipú (en portugais). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 3 (4), 51-71.

PETTIT A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.*, 28(2), 126-135.

ROCHE, M. (1963). *Hydrologie de Surface*. Gauthier-Villars, Paris, France, 430 p.

SHUKLA J., C. A. NOBRE et P. SELLERS (1990). Amazonia deforestation and climate change. *Science*, 247, 1322–1325.

SALATI E., J. MARQUES et L.C.B. MOLION (1978). Origem e distribuição das chuvas na Amazônia (Origine et distribution des pluies en Amazonie). *Interciencia*, 3(4), 200–205.

SIOLI H. (1985). The effects of deforestation in Amazonia. *Change in the Amazon basin*, vol 1 : Man's impact on forests and rivers, ed. John Hemmings, Londres, UK, 1-13.

SIOLI H. (1989). Introdução ao Simpósio «Amazônia : desflorestamento e possíveis efeitos» (Introduction au Symposium «Amazonie : déboisement et effets possibles»). *Interciencia* 14(6), 286–290.

THIESSEN A. H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Rev.*, 39, 1082–1084.

UNESCO (1980). Carte de la Végétation de l'Amérique du Sud (1980). Etablie et publiée

par l'UNESCO, 2 coupures à l'échelle du 1/5 000 000. Paris, France

UNESCO et WMO (2000) Glossaire International d'Hydrologie. Paris, France, 1 CD
(*diffusion restreinte*).

WRM (2001) Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales. Bosque Amazónico : 10 años después de la Cumbre de la Tierra (Mouvement mondial pour les Forêts tropicales. Forêt amazonienne : 10 années depuis la Conférence de la Terre). Montevideo, Uruguay.
<http://www.wrm.org.uy/inicio.html>.