



Université Montpellier II

Licence Sciences de la Terre et de l'Environnement

Parcours Géosciences, Prévention et Traitement des Pollutions

Analyse de l'évolution des chroniques de flux liquides dans les bassins du Congo et de l'Orénoque

Par Marie Bellanger

Stage de licence 3 effectué à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

2011 - 2012

Encadrant : Mr Alain Laraque, Chargé de Recherche à l'IRD de Montpellier Responsable de licence : Mme Christine Leredde Second rapporteur : Mme Valérie Borrell

RESUMÉ

Nous avons analysé les flux liquides de deux grands fleuves intertropicaux le Congo (et deux de ses affluents) en Afrique centrale et l'Orénoque en Amérique du Sud, qui se font face de part et d'autre de l'Océan Atlantique intertropical.

Cette étude des débits (du Congo de 1903 à 2010 et de l'Orénoque de 1926 à 2010) a été réalisée avec différents logiciels, Khronostat pour la détection des ruptures dans les chroniques disponibles, Hydraccess principalement pour la morphologie des hydrogrammes et Excel pour exploiter toutes les données.

Les résultats montrent que les variabilités interannuelles des débits de ces grands fleuves sont très proches : 1,69 pour le Congo et 1,66 pour l'Orénoque. Par contre, les modules de l'Orénoque à Ciudad Bolivar sont homogènes sur toute la chronique, alors que celle du Congo à Beach Brazzaville est découpée en 5 segments (1903-1959, 1960-1970, 1971-1981, 1982-1994, 1995-2010). La quatrième rupture de débits du Congo à Beach Brazzaville en 1994, ne semble pas être liée aux affluents étudiés, l'Oubangui et la Sangha.

SOMMAIRE :

INTR	ODUC	TION ET OBJECTIFS1
CHAI	PITRE	I : DESCRIPTION DU CADRE DE L'ENTREPRISE
CHAI	PITRE	II : PRÉSENTATION DES ZONES D'ÉTUDE5
2.1	LE BA	ASSIN DU CONGO
	2.1.1 2.1.2	Caractéristiques générales du bassin du Congo5 Station hydrologique de Beach Brazzaville8
2.2	LE BA	ASSIN DE L'OUBANGUI
	2.2.1 2.2.2 2.2.3 2.2.4	Caractéristiques générales du bassin de l'Oubangui
2.3	LE BA	ASSIN DE LA SANGHA
	2.3.1 2.3.2 2.3.3 2.3.4	Caractéristiques générales du bassin de la Sangha9 Géologie et végétation
2.4	LE BA	ASSIN DE L'ORENOQUE10
	2.4.1 2.4.2 2.4.3 2.4.4	Caractéristiques générales du bassin de l'Orénoque10 Géologie et végétation
CHAI	PITRE	III : DONNÉES ET MÉTHODES13
3.1	PROT	OCOLE DE TERRAIN
	3.1.1	Mesures de Débits (Q)13
3.2	DONN	NÉES DISPONIBLES
3.3	PROT	OCOLES D'EXPLOITATION DES DONNEES14
	3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4	Comparaison des données
CHA	PITRE	IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS17
4.1 KHRO	RECH DNOST	ERCHE DES RUPTURES DANS LES CHRONIQUES DE DÉBITS AVEC AT17

	4.1.1	Le Congo à Beach Brazzaville	17
	4.1.2	L'Oubangui à Bangui	18
	4.1.3	La Sangha à Ouesso	18
	4.1.4	L'Orénoque à Ciudad Bolivar	18
	5 5 6 7		
4.2	RECH	IERCHE DES TENDANCES DANS LES CHRONIQUES DE DI	EBITS AVEC
EXCE	L		19
	4.2.1	Le Congo à Beach Brazzaville	19
	4.2.2	L'Oubangui à Bangui	22
	4.2.3	La Sangha à Ouesso	23
	4.2.4	L'Orénoque à Ciudad Bolivar	25
		1	
4.3	ETUD	DE DES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES	REGIMES
HYDI	ROLOG	SIQUES PAR STATIONS AVEC EXCEL	
	431	Le Congo à Beach Brazzaville	26
	432	L'Ouhangui à Bangui	30
	433	La Sangha à Ouesso	33
	4.3.5	L'Orénoque à Ciudad Bolivar	36
	-1011	E orenoque a crudad bonvar	
CON	CLUSI	ON	
0.010			
RÉFÉ	RENC	ES BIBLIOGRAPHIOUES.	
L			

LISTE DES GRAPHIQUES :

Figure	1: Présentation du bassin du Congo, de ses sous bassins et situation des stations
	étudiées (Beach Brazzaville, Bangui, Ouesso) (Griès, 1996)
Figure	2: Présentation du bassin de l'Orénoque et situation de la station étudiée (Ciudad Bolivar) (d'après Warne et al. 2002).
Figure	3: Séquençage de la chronique de débits annuels du Congo à Brazzaville de 1003 à
riguie	2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs movennes interannuelles
	correspondantes
Figure	4: Séquençage de la chronique de débits annuels de l'Oubangui à Bangui de 1936 à
	2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs moyennes interannuelles
	correspondantes
Figure	5: Séquençage de la chronique de débits annuels de la Sangha à Ouesso de 1948 à
	2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs moyennes interannuelles
	correspondantes
Figure	6: Débits annuels de l'Orénoque à Ciudad Bolivar de 1926 à 201019
Figure	7: Séquençage de la chronique de débits minimums mensuels de l'Orénoque à Ciudad
	Bolivar de 1926 à 2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs moyennes
	mensuelles respectives
Figure	8: Evolution du module avec sa tendance pour le Congo à Beach Brazzaville 1903-
	2010
Figure	9: Evolution des débits minimums et maximums mensuels avec leurs tendances
	respectives pour le Congo à Beach Brazzaville 1903-2010
Figure	10: Evolution des modules par périodes de débits homogènes avec leurs tendances
	respectives pour le Congo à Beach Brazzaville 1903-2010
Figure	11: Evolution des débits minimums et maximums mensuels par périodes de débits
	homogènes avec leurs tendances respectives pour le Congo à Beach Brazzaville
	1903-2010
Figure	12: Evolution de la différence des débits maximums et minimums mensuels par
	périodes de débits homogènes avec leurs tendances respectives pour le Congo à
	Beach Brazzaville 1903-2010
Figure	13: Evolution du module avec sa tendance pour l'Oubangui à Bangui 1936-201022
Figure	14: Evolution des débits minimums et maximums mensuels avec leurs tendances
D '	respectives pour l'Oubangui à Bangui 1936-2010
Figure	15: Evolutions des modules par périodes homogènes avec leurs tendances respectives
D '	pour l'Oubangui à Bangui 1936-2010
Figure	16: Evolution des débits minimums et maximums mensuels par périodes de débits
 .	nomogenes avec leurs tendances respectives pour l'Oubangui à Bangui 1936-2010 23
Figure	1/: Evolution de la différence des debits maximums et minimums mensuels par
	periodes de debits homogenes avec leurs tendances respectives pour l'Oubangui à
	Bangui 1936-2010

Figure	18: Evolution du module avec sa tendance pour la Sangha à Ouesso 1948-2010 23
Figure	19: Evolution des débits minimums et maximums mensuels avec leurs tendances
	respectives pour la Sangha à Ouesso 1948-2010
Figure	20: Evolution des modules par périodes de débits homogènes avec leurs tendances
	respectives pour la Sangha à Ouesso 1948-2010
Figure	21: Evolution des débits minimums et maximums mensuels par périodes de débits
	homogènes avec leurs tendances respectives pour la Sangha à Ouesso 1948-201024
Figure	22: Evolution de la différence des débits maximums et minimums mensuels par
-	périodes de débits homogènes avec leurs tendances respectives pour la Sangha à
	Ouesso 1948-2010
Figure	23: Evolution du module avec sa tendance pour l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-
	2010
Figure	24: Evolution des débits minimums et maximums mensuels avec leurs tendances
	respectives pour l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010
Figure	25: Hydrogrammes journaliers moyen et extrêmes du Congo à Beach Brazzaville
	1947-2010 et tendances durant le cycle hydrologique
Figure	26: Comparaison des hydrogrammes moyens journaliers des différentes périodes
	d'écoulements homogènes du Congo à Beach Brazzaville 1947-201027
Figure	27: Principaux types morphologiques de la crue principale du Congo à Beach
	Brazzaville 1948-2010, classés par familles (1=pointue, 2=arrondie, 3=en plateau,
	4=dissymétrique)
Figure	28: Principaux types morphologiques de l'étiage du Congo à Beach Brazzaville
	1948-2010, classés par familles de crues secondaires (0=pas de crue secondaire,
	1=pointue, 2=arrondie, 3=en plateau)
Figure	29: Evolution du rapport des amplitudes sur les durées des crues et des étiages du
	Congo à Beach Brazzaville 1903-2010
Figure	30: Evolution des amplitudes de crues et d'étiages du Congo à Beach Brazzaville
	1903-2010
Figure	31: Evolution des durées de crues et d'étiages du Congo à Beach Brazzaville 1903-
	2010
Figure	32: Evolution des volumes d'eau écoulée de crues et d'étiages du Congo à Beach
	Brazzaville 1948-2010
Figure	33: Hydrogrammes journaliers moyen et extrêmes de l'Oubangui à Bangui 1936-2010
	et tendances durant le cycle hydrologique
Figure	34: Comparaison des hydrogrammes moyens journaliers des différentes périodes
	d'écoulements homogènes de l'Oubangui à Bangui 1936-2010 30
Figure	35: Principaux types morphologiques de la crue de l'Oubangui à Bangui 1936-2010,
	classés par familles (1=pointue, 2=arrondie, 3=en plateau)
Figure	36: Principaux types morphologiques de l'étiage de l'Oubangui à Bangui 1936-2010,
	classés par familles (0=pas d'irrégularité, 1=irrégularité dans la décrue, 2=fond
	irrégulier, 3=irrégularité dans la crue)
Figure	37: Evolution du rapport des amplitudes sur les durées des crues et des étiages de
	l'Oubangui à Bangui 1936-2010

Figure	38: Evolution des amplitudes des crues et des étiages de l'Oubangui à Bangui 1936- 2010 32
Figure	39: Evolution des durées des crues et des étiages de l'Oubangui à Bangui 1936-2010 32
Figure	40: Evolution des volumes d'eau écoulée des crues et des étiages de l'Oubangui à Bangui 1936-2010
Figure	41: Hydrogrammes journaliers moyen et extrêmes de la Sangha à Ouesso 1948-2010 et tendances durant le cycle hydrologique
Figure	42: Comparaison des hydrogrammes moyens journaliers des différentes périodes d'écoulements homogènes de la Sangha à Ouesso 1948-2010
Figure	43: Principaux types morphologiques de la crue de la Sangha à Ouesso 1948-2010, classés par familles (1=pointue, 2=arrondie, 3=en plateau)
Figure	44: Evolution du rapport des amplitudes sur les durées des crues et des étiages de la Sangha à Ouesso 1948-2010
Figure	45: Evolution des amplitudes des crues et des étiages de la Sangha à Ouesso 1948- 2010
Figure	46: Evolution des durées des crues et des étiages de la Sangha à Ouesso 1948-201035
Figure	47: Evolution des volumes d'eau écoulée des crues et des étiages de la Sangha à Ouesso 1948-2010
Figure	48: Hydrogrammes journaliers moyen et extrêmes de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010 et tendances durant le cycle hydrologique
Figure	49: Principaux types morphologiques de la crue de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010, classés par familles (1=pointue, 2=arrondie, 3=en plateau)
Figure	50: Principaux types morphologiques de l'étiage de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010, classés par familles (1=V décalé vers la droite, 2=arrondi, 3=trapèze inversé)
Figure	51: Evolution du rapport des amplitudes sur les durées des crues et des étiages de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010
Figure	52: Evolution des amplitudes des crues et des étiages de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010
Figure	53: Evolution des durées des crues et des étiages de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010
Figure	54: Evolution des volumes écoulés des crues et des étiages de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010

Remerciements :

Je remercie tout particulièrement Alain Laraque, mon maître de stage, chargé de recherche à l'IRD de Montpellier, qui m'a beaucoup appris sur la Recherche durant ces quatre mois de stage.

Je remercie les personnes qui m'ont appris à me servir des logiciels spécifiques à cette étude.

Je remercie l'ensemble du personnel pour m'avoir permis de réaliser ce stage dans de très bonnes conditions et dans la bonne humeur.

Je remercie également toutes les personnes qui ont contribué à l'obtention des données, les observateurs et opérateurs de terrain ainsi que les techniciens des bureaux.

INTRODUCTION ET OBJECTIFS

L'Institut de Recherche pour le Développement réalise des recherches scientifiques, principalement dans la bande intertropicale de la planète pour favoriser le développement des pays concernés. Ceci en améliorant les conditions de vie des populations locales, en comprenant les sociétés, tout en préservant l'environnement.

Les débits du fleuve Congo en Afrique centrale représentent la moitié des eaux africaines déversées dans l'Océan Atlantique et l'Orénoque en Amérique du Sud est le troisième fleuve du monde en termes de débits. Ces grands fleuves sont très importants pour les populations car ils constituent de grandes ressources en eau pour des usages variés (domestiques, transports, hydroélectricité, agriculture, tourisme, etc.). Ainsi les populations sont dépendantes de ces fleuves et de leurs comportements. Il est donc nécessaire de les comprendre pour pouvoir les exploiter au mieux sans épuiser leurs ressources.

La mission des chercheurs de l'unité de recherche que j'ai intégrée au sein du stage, est donc d'étudier et de comprendre les comportements hydrologiques, hydrodynamiques, hydrochimiques, etc. des grands bassins intertropicaux.

Notre objectif a été d'étudier des séries de débits, aux pas de temps journaliers, mensuels et annuels, du bassin du Congo et de l'Orénoque qui sont des grands bassins intertropicaux aux débits comparables, afin de mieux comprendre leurs comportements hydrologiques. Nous avons également fait cette étude sur deux des sous bassins du Congo : la Sangha à Ouesso et l'Oubangui à Bangui, qui sont les seules stations à posséder des chroniques de débits pluri-décennales ce qui est indispensable pour comprendre les comportements et tendances hydrologiques de ces fleuves dans le temps.

Dans un premier temps nous avons fait des recherches sur les zones d'études. Puis nous avons exploité les données et pour finir nous les avons triées et analysées.

CHAPITRE I : DESCRIPTION DU CADRE DE L'ENTREPRISE

L'IRD, Institut de recherche pour le développement, répond avec ses partenaires, aux enjeux internationaux du développement. Cet organisme effectue des recherches visant à l'amélioration des conditions sanitaires, à la préservation de l'environnement et des ressources et à la compréhension de l'évolution des sociétés.

L'IRD est sous la tutelle conjointe des ministères chargés de la Recherche et des Affaires étrangères. Il conduit des activités de recherche à l'international, en partenariat avec plusieurs pays du Sud. Son siège est situé à Marseille.

Il intervient dans plus de cinquante pays en Afrique, en Asie, en Amérique latine et en Outre-mer francophone. Les projets menés par l'IRD sont essentiels pour les pays du Sud, comme par exemple dans les domaines des maladies tropicales, de la relation entre la santé et l'environnement, des ressources en eau, des risques naturels et de la vulnérabilité et de l'inégalité sociale, etc.

Les études réalisées ici se situent dans le cadre de l'observatoire ORE-HYBAM (*www.ore-hybam.org*), qui concerne les études géodynamiques, hydrologiques et biogéochimiques dans les grands bassins intertropicaux péri-atlantiques (Amazone, Congo et Orénoque).

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DES ZONES D'ÉTUDE

2.1 LE BASSIN DU CONGO

L'ensemble de ce bassin est contrôlé par la station hydrologique de Brazzaville dont les chroniques de débits seront étudiées dans ce rapport, ainsi que celles de deux de ses sous bassins, l'Oubangui à Bangui et la Sangha à Ouesso, car ces trois stations sont les seules à posséder des chroniques hydrologiques pluri-décennales. Nous allons donc présenter successivement chacun de ces bassins avec leurs principales stations hydrologiques.

2.1.1 Caractéristiques générales du bassin du Congo

Le bassin versant du Congo est situé en Afrique centrale entre les parallèles 9°N et 14°S et entre les méridiens 11°E et 31°E (voir Fig. 1). Celui-ci a une superficie totale de 3 700 000 km².

Le fleuve du Congo, long de 4700 km, avec un débit moyen de 41 000 m³/s, forme une large courbe qui traverse en deux endroits l'équateur. Le fleuve du Congo est le plus important du continent africain et le second du monde en termes de débits et de superficie de son bassin versant (Laraque et al., 1998).

Les variations des débits du Congo à sa principale station de Brazzaville sont dues, essentiellement, à la distribution de ses affluents et à l'alternance de leurs régimes de part et d'autre de l'équateur. Le cycle hydrologique du Congo a donc deux minima, l'un en mars et l'autre en juillet, car lorsqu'un hémisphère est en saison des pluies, l'autre est en saison sèche et vice versa. Les débits du Congo sont très réguliers car les apports des affluents se succèdent et se complètent (Griès, 1996).

Les précipitations annuelles varient suivant les régions mais l'ensemble du bassin a une faible variation interannuelle, car il est soumis à un climat équatorial.

Le bassin est caractérisé géologiquement par trois types de roches : -les roches cristallines et métamorphiques du complexe basal précambrien, -les roches calcaires et dolomitiques du précambrien supérieur, -les grès et sables du mésozoïque au quaternaire (au centre du bassin) (Griès, 1996).

La forme du bassin, son relief, sa géologie, son climat et sa végétation sont approximativement distribués d'une manière concentrique autour de la cuvette centrale.



Figure 1: Présentation du bassin du Congo, de ses sous bassins et situation des stations étudiées (Beach Brazzaville, Bangui, Ouesso) (Griès, 1996)

Le bassin versant du Congo est divisé en quatre zones physiographiquement distinctes : les plateaux cuirassés au Nord et au Sud, la grande forêt pluviale au centre, les plateaux Tékés à l'Ouest et les volcans du rift Est-Africain (Laraque et al., soumis).

<u>Les plateaux ferrugineux cuirassés</u>

Ils sont soumis à un climat tropical humide de transition (1600-1800 mm.an⁻¹).

Dans la partie septentrional du bassin du Congo, ces plateaux sont couverts du Nord au Sud de steppes, de savanes arbustives à arborées et de forêts (Laraque et al, 2001). Cette région du bassin du Congo est traversée par l'affluent Oubangui. Au Sud du bassin du Congo, se trouve d'autres plateaux qui constituent la principale source d'eau du Sud de l'Afrique (Laraque et al., soumis).

– <u>La cuvette congolaise :</u>

Elle correspond à la dépression centrale du bassin du Congo dont le point le plus bas est à environ 400 m d'altitude. Les formations recouvrant cette zone sont des alluvions fluviatiles argileux ou sableux du quaternaire. La cuvette congolaise est recouverte par des marécages, des prairies et des forêts équatoriales denses et humides, inondées en partie durant la période des crues (Laraque et al., 1998).

Le climat est équatorial (2000-2300 mm.an⁻¹). Les cours d'eau traversant cette plaine inondable sont très sinueux. Le coefficient d'écoulement est d'environ 25% et la variabilité saisonnière des débits est de 2,5 à 5,5 (Griès, 1996).

<u>Les plateaux Tékés :</u>

Ils se trouvent au Nord de Brazzaville et dans la partie occidentale du bassin. Les roches présentes sur ces plateaux sont des grès et sables et constituent donc un puissant aquifère, dû à leur perméabilité et à leur forte épaisseur (de 200 à 400 m). Les eaux météoriques s'infiltrant complètement, la végétation des plateaux Tékés se limite à une savane plus ou moins arbustive (Laraque et al., 1998).

Le climat est équatorial (1800 à 2000 mm.an⁻¹). Le coefficient d'écoulement est d'environ 50% et la variabilité saisonnière des débits est de 1,1 à 1,5. Le régime hydrologique y est très régulier (Griès, 1996). C'est dans ces plateaux Tékés que nous observons des records de débits spécifiques qui peuvent atteindre 30 l.s⁻¹.km⁻², alors que la moyenne de ces débits sur le bassin versant est de 11 l.s⁻¹.km⁻² (Laraque et al., 1998).

– <u>Volcans du rift Est-Africain :</u>

A l'Est du bassin se trouve des montagnes volcaniques du rift Est-Africain. Ces montagnes ont des altitudes comprise entre 2000 à 4500 m pour la chaine des Virunga et jusqu'à 5000 m pour le volcan Rwenzori.

Les précipitations sont les plus fortes du bassin avec des pluies allant de 2000 à 2500 mm.an⁻¹ (Laraque et al., soumis).

2.1.2 Station hydrologique de Beach Brazzaville

Nous nous sommes intéressés aux valeurs de la station de Brazzaville qui contrôle 95% de la superficie du bassin du Congo. Cette station est située à la latitude 4.27° S et à la longitude 15.32° E (UNESCO). La superficie du bassin à Brazzaville y est de 3 500 000 km² et le débit moyen est d'environ 41 000 m³/s (Griès, 1996).

2.2 LE BASSIN DE L'OUBANGUI

2.2.1 Caractéristiques générales du bassin de l'Oubangui

Le bassin de l'Oubangui est situé en grande partie dans l'hémisphère Nord, entre les latitudes 00°30'S et 09°16'N et entre les longitudes 15°35'E et 30°57'E (voir Fig. 1). La superficie totale du bassin est de 514 600 km².

Ce bassin versant est une vaste pénéplaine érodée. Les plateaux de 500 à 900 m d'altitude couvrent 70% de la superficie du bassin, la plaine oubanguienne, 25% de la superficie, et pour finir quelques hauts reliefs, situés au Nord et Nord-Ouest, dépassants rarement 1100 m d'altitude représente seulement 5% de la superficie (Orange et al., 1995).

Le fleuve Oubangui, long de 1170 km, a un coefficient d'écoulement de 18% (Olivry, 1989). Ce fleuve est le second affluent le plus important du Congo, il se situe après la rivière Kassaï (8000 m^3/s). La fluctuation des débits est plus importante que celle du Congo (Griès, 1996).

2.2.2 Géologie et végétation

La géologie du bassin de l'Oubangui est définie principalement par le socle précambrien (avec des roches cristallines et métamorphiques) environ 60% de la superficie du bassin excepté deux formations gréseuses du mésozoïque, couvrant 10% du bassin, présentes au Nord et à l'Est (Orange et al., 1995). Les sols sont indurés par une cuirasse latéritique ou ferrugineuse. Ceux-ci sont d'autant plus indurés sur les roches acides que sur les roches basiques.

Le bassin de l'Oubangui est essentiellement couvert d'une savane arbustive ou arborée qui fait la transition entre forêt dense et humide sur les zones méridionales du bassin et la steppe à l'extrême Nord de celui-ci (Orange et al., 1995).

2.2.3 Climat

Le climat est tropical humide (1000 mm.an⁻¹ au Nord à 1700 mm.an⁻¹ au Sud). Il y a une saison sèche débutant en octobre au Nord-Est qui se généralise sur l'ensemble du bassin en janvier. Ensuite une intersaison commence en mars au Sud et arrive au Nord en avril – mai. Pour finir une saison de pluie touche l'ensemble du bassin de juin à septembre (durant 4 à 9 mois du Nord au Sud) (Orange et al., 1995).

2.2.4 Station hydrologique de Bangui

Bangui se situe en République Centrafricaine, à 600 km de la confluence avec le Congo (Orange et al., 1996). Cette station se situe à la latitude 4.37° N et à la longitude 18.58°E (UNESCO). La superficie du bassin à Bangui est de 500 000 km² soit 97% de la superficie totale du bassin et le débit moyen annuel est d'environ 5000 m³/s (Orange et al., 1996).

La station de Bangui présente des relevés limnimétriques journaliers sans lacune depuis 1936 (Orange et al., 1996).

2.3 LE BASSIN DE LA SANGHA

2.3.1 Caractéristiques générales du bassin de la Sangha

Le bassin de la Sangha est réparti entre les républiques du Congo, de Centrafrique et le Cameroun (voir Fig. 1). Ce bassin versant a une superficie totale de 165 500 km².

La Sangha parcoure 781 km. Si on considère que Kadei est la branche supérieure de la Sangha, alors la rivière a une longueur totale de 1 333 km et donc constitue après l'Oubangui le deuxième principal tributaire de rive droite du fleuve du Congo. Le D'Ja est le principal affluent de la Sangha (Censier, 1995).

2.3.2 Géologie et végétation

En amont d'Ouesso, le bassin est constitué du complexe schisto-quartzitique précambrien avec des intrusions de nature variée (dolerites intrusives, complexes tillitiques, etc.) (Censier, 1995). Le Nord –Est du bassin est situé sur des grès de Carnot. Les sols sont

ferralitiques. Les roches présentent en aval d'Ouesso sont les alluvions quaternaires de la Cuvette congolaise.

Le bassin versant de la Sangha est principalement recouvert d'une forêt équatoriale dense et humide, excepté au Nord du bassin où les savanes arborées couvrent cette zone (Pouyaud et al., 1971).

2.3.3 Climat

Le climat est équatorial, les précipitations varient de 2000 à 2300 mm par an (Laraque et al., 1998).

2.3.4 Station hydrologique d'Ouesso

Ouesso se situe dans la république du Congo à la latitude 1.62°N et à la longitude 16.05°E. Cette station hydrologique contrôle 158 500 km² soit 96% de la superficie du bassin versant (UNESCO).

2.4 LE BASSIN DE L'ORENOQUE

De même que pour les stations choisies dans le bassin du Congo, celle de Ciudad Bolivar sur l'Orénoque possède des chroniques hydrologiques pluri-décennales.

2.4.1 Caractéristiques générales du bassin de l'Orénoque

Le bassin de l'Orénoque, situé entre les parallèles 2°N et 9°N et entre les méridiens 75° et 62°W, au Nord de l'Amérique du Sud (voir Fig. 2). Ce bassin versant couvre une superficie totale d'environ 1 100 000 km². Il est situé dans une zone de convergence intertropicale (ZCIT) responsable de fortes pluies avec une grande variabilité.

L'Orénoque, long d'environ 2100 km a en moyenne un débit de 37 000 m^3/s à l'embouchure dans l'océan (Al-Kattan, 2011).

Le bassin est constitué de trois zones : Le Bouclier Guyanais situé sur la rive droite au Sud couvre 35% du bassin. Les plaines alluviales nommées « Llanos » sont situées au Nord et à l'Ouest et couvrent 50% du bassin. Enfin le secteur montagneux des Andes et des chaînes côtières à l'Ouest et au Nord-Ouest qui sont situées sur la rive gauche couvre 15% de la superficie du bassin (Warne et al., 2002).



Figure 2: Présentation du bassin de l'Orénoque et situation de la station étudiée (Ciudad Bolivar) (d'après Warne et al., 2002)

2.4.2 Géologie et végétation

Le Bouclier Guyanais présente des reliefs doux avec quelques mesetas appelés Tepuys qui peuvent atteindre 3000m d'altitude. Les roches présentes sur le Bouclier Guyanais sont essentiellement des roches felsiques et plutoniques avec quelques gneiss couramment recouverts par des quartzites massifs (Warne et al., 2002). Cette zone est principalement recouverte d'une forêt tropicale humide, avec certaines zones de savanes (Avila Serrano, 2007).

Les Andes forment une chaîne de montagnes qui peuvent dépasser les 5000m d'altitude, avec des pentes souvent très abruptes. Les roches présentes dans cette zone sont des schistes argileux, des calcaires, des grès, des conglomérats, des roches plutoniques, felsiques et mafiques (Warne et al., 2002). La région est recouverte d'une flore de type alpin et par des forêts de prémontagne (Sanchez, 1993).

La région des Llanos est une vaste plaine alluviale couverte de sédiments fluviolacustres, datant du Quaternaire, et provenant de l'érosion des Andes. Celle-ci est partiellement inondée lors des crues des affluents de l'Orénoque (Avila Serrano, 2007). La plaine alluviale est recouverte d'herbes de savanes avec quelques forêts en « galeries » le long des rives (Sanchez, 1993).

2.4.3 Climat

Le bassin versant de l'Orénoque est caractérisé par un climat tropical. La pluie marque la différence entre les saisons et les zones. Il y a deux saisons, une saison sèche de février à mars et une saison humide de juillet à août (Avila Serrano, 2007).

La cordillère des Andes reçoit de 2000 à 2500 mm de précipitations par an, avec une période sèche durant 2 mois.

La région des Llanos dispose d'une pluviosité variant de 1500 à 2000 mm.an⁻¹ durant la saison des pluies. Cette région a une saison sèche qui dure de 5 à 6 mois.

Le Bouclier Guyanais reçoit une pluviosité de 2500 à 3000 mm.an⁻¹, et n'a pas de saison sèche définie (Avila Serrano, 2007). Les plus hauts reliefs situés au Sud reçoivent 6000 à 8000 mm.an⁻¹ (Al-Kattan, 2011).

2.4.4 Station hydrologique de Ciudad Bolivar

Ciudad Bolivar se situe au Venezuela à 385 km de l'Atlantique, à une latitude de $08^{\circ}08'38''$ N et une longitude de $63^{\circ}36'28''$ E. Cette station hydrologique contrôle 83% de sa superficie, soit 836 000 km². Le module moyen est de 33 000 m³/s (Laraque et al., 2009).

CHAPITRE III : DONNÉES ET MÉTHODES

3.1 PROTOCOLE DE TERRAIN

Nous nous sommes servis pour cette étude des débits disponibles récoltés par Alain Laraque auprès des services vénézuéliens concernés (UCV, INAMEH) et de Cordova (1999).

3.1.1 Mesures de Débits (Q)

Les jaugeages (mesure de débit) sont effectués soit par des méthodes traditionnelles (moulinet), pour le Congo et ses affluents ; soit par des technologies de dernières générations fonctionnant par effet Doppler (ADCP) pour l'Orénoque (Laraque et al, soumis). L'ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) fourni en temps réel les informations suivantes pour la section étudiée de la rivière : l'intensité et la direction de la vitesse de l'eau, le débit ainsi que la bathymétrie de la section étudiée.

3.2 DONNÉES DISPONIBLES

Les données hydrologiques sont stockées, depuis 2003, dans une base, qui est celle de l'Observatoire de Recherche en Environnement (*ORE*) HYBAM (*www.ore-hybam.org*), qui concerne les études géodynamiques, hydrologiques et biogéochimiques dans les grands bassins intertropicaux péri-atlantiques (Amazone, Congo et Orénoque).

Dans le cadre des études des quatre chroniques du Congo à Beach Brazzaville, de l'Oubangui à Bangui, de la Sangha à Ouesso, et de l'Orénoque à Ciudad Bolivar, nous avons porté notre attention sur, d'une part :

1) les valeurs des débits journaliers disponibles, qui sont :

- de 1948 à 2010, pour le Congo à Beach Brazzaville, soit 63 années de données dont 59 ans sans lacunes,

- de 1936 à 2010, pour l'Oubangui à Bangui ce qui correspond à 75 ans de données sans lacunes,

- de 1948 à 2010, pour la Sangha à Ouesso soit 63 années de données dont 50 sans lacunes,

- de 1926 à 2010, pour l'Orénoque à Ciudad Bolivar soit 85 ans de données dont 83 années sans lacunes,

et d'autre part :

2) les données de débits mensuels,

où les chroniques correspondent aux mêmes dates, excepté pour le Congo à Beach Brazzaville. La chronique des débits mensuels du Congo à Beach Brazzaville commence en 1903, ce qui correspond à 108 années de données dont 104 sans lacunes. Par conséquent, nous avons utilisé les débits mensuels pour la période de 1903 à 1948. Il faudra donc en tenir compte pour l'interprétation de la morphologie des hydrogrammes des crues durant cette période, pour les dates de début et fin de crues, etc.

3.3 PROTOCOLES D'EXPLOITATION DES DONNEES

3.3.1 Comparaison des données

Nous avons d'abord comparé les débits du Congo à Beach Brazzaville de la base de données HYBAM avec celles du Congo à Kinshasa de l'UNESCO de 1903 à 1983. Les débits étant relativement les mêmes, nous n'avons fait aucune correction.

3.3.2 Logiciel Khronostat

Les débits issus d'Hydraccess sont traités immédiatement par Khronostat (*http://www.hydrosciences.org/spip.php?article239*) qui a été créé par Hélène Lubès-Niel (Lubès-Niel et al., 1998). Ce logiciel regroupe différents tests statistiques qui permettent de constater s'il y a un changement de comportement d'une variable dans le temps. Ces changements sont soulignés par une rupture isolant des périodes d'écoulements homogènes.

Nous avons fait tourner trois tests avec la moyenne, le maximum et le minimum annuels des débits journaliers. Excepté pour le Congo à Beach Brazzaville, nous avons pris les débits mensuels de 1903 à 1947, car les débits journaliers ne commençaient qu'en 1948 :

Le *test de corrélation sur le rang* nous permet de constater si la série a tendance à augmenter ou diminuer.

- La *méthode non paramétrique de Pettit* nous donne l'année de la plus importante rupture de la série (s'il y a rupture).

 La segmentation de Hubert nous donne l'année des différentes ruptures constatées sur la série avec les moyennes et écarts-types des différents « segments ».

3.3.3 Logiciel Hydraccess

Hydraccess (*www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess.htm*) a été créé par Philippe Vauchel en 2008. Ce logiciel permet d'importer et de stocker différents types de données hydrologiques dans une base au format Microsoft Access. A partir des données initiales (cote, débit, MES, concentrations dissoutes, caractéristiques physico-chimiques des eaux), il crée en sortie des fichiers Excel avec des tableaux de données organisées et des graphiques élaborés, facilitant leurs interprétations.

Pour cette étude, nous avons traité les débits. Après avoir rentré certains critères, ce logiciel nous a permis de définir les débuts et fins de crues (ou étiages) automatiquement.

3.3.4 Traitement des données (Excel)

Les données issues d'Hydraccess, ont ensuite été utilisées avec le tableur Excel pour les exploiter au maximum en créant un grand nombre de graphiques, ou tableaux, classés suivant différents critères ou différentes familles : par fleuves, par périodes d'homogénéisation des débits, etc.

De plus nous avons calculé les volumes d'eau écoulée des crues et étiages pour chaque station hydrologique. Nous avons pour cela appliqué la méthode des trapèzes

Nous multiplions la différence de temps entre deux valeurs par la demi-somme des débits des deux valeurs. Nous totalisons le tout pour avoir un volume et nous multiplions par 86400 (ce qui correspond au nombre de secondes dans un jour). Nous avons mis les résultats dans un graphique vu dans le chapitre 4 (étude des caractéristiques morphologiques des régimes hydrologiques par Stations avec Excel).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 RECHERCHE DES RUPTURES DANS LES CHRONIQUES DE DÉBITS AVEC KHRONOSTAT

Les tests statistiques de Khronostat nous ont permis de constater que certains fleuves étudiés ont des ruptures de débits.

4.1.1 Le Congo à Beach Brazzaville

Le Congo, à Beach Brazzaville présente quatre « ruptures » : en 1959, en 1970, en 1981, et une dernière en 1994 que nous avons mis en évidence. Le Congo a donc cinq périodes de débits homogènes :

- une phase de stabilité dite normale de 1903 à 1959,
- une phase humide de 1960 à 1970,
- un retour à la phase de stabilité de 1971 à 1981,
- une phase sèche de 1982 à 1994,
- un autre retour à la phase de stabilité de 1995 à 2010.

La période actuelle est une phase de stabilité qui rejoint parfaitement la moyenne interannuelle des débits du Congo (41000 m^3/s) (voir Fig. 3).



Figure 3: Séquençage de la chronique de débits annuels du Congo à Brazzaville de 1903 à 2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs moyennes interannuelles correspondantes

4.1.2 L'Oubangui à Bangui

L'Oubangui à Bangui présente trois ruptures : en 1959, en 1970 et en 1981 (voir Fig.4). Ces ruptures rejoignent celles du Congo à Beach Brazzaville.



Figure 4: Séquençage de la chronique de débits annuels de l'Oubangui à Bangui de 1936 à 2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs moyennes interannuelles correspondantes

4.1.3 La Sangha à Ouesso

La Sangha à Ouesso a une rupture en 1970 qui sépare une phase humide de 1953 à 1970 d'une phase sèche de 1971 à 2010 (voir Fig. 5).



Figure 5: Séquençage de la chronique de débits annuels de la Sangha à Ouesso de 1948 à 2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs moyennes interannuelles correspondantes

4.1.4 L'Orénoque à Ciudad Bolivar

L'Orénoque à Ciudad Bolivar est un fleuve caractérisé par sa stabilité, en effet nous n'avons constaté aucune rupture de 1926 à 2010 sur ses débits annuels (voir Fig. 6). Par contre, nous pouvons observer pour les débits minimum mensuels, une petite rupture en 1980 (voir Fig. 7).



Figure 6: Débits annuels de l'Orénoque à Ciudad Bolivar de 1926 à 2010



Figure 7: Séquençage de la chronique de débits minimums mensuels de l'Orénoque à Ciudad Bolivar de 1926 à 2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs moyennes mensuelles respectives

Nous constatons plusieurs périodes de débits homogènes. Nous allons donc rechercher des tendances dans l'ensemble de la chronique puis dans chaque période de débits homogènes, ceci pour les quatre stations étudiées.

4.2 RECHERCHE DES TENDANCES DANS LES CHRONIQUES DE DÉBITS AVEC EXCEL

4.2.1 Le Congo à Beach Brazzaville

Nous avons noté que les débits du Congo à Beach Brazzaville ont tendance à augmenter sur toute la chronique (voir Fig. 8 et 9), excepté les débits minimums qui ont une tendance à la diminution (voir Fig. 9). La variabilité interannuelle (Qannuels max/Qannuels min sur la chronique d'étude) des débits est de 1,66.



Figure 8: Evolution du module avec sa tendance pour le Congo à Beach Brazzaville 1903-2010



Figure 9: Evolution des débits minimums et maximums mensuels avec leurs tendances respectives pour le Congo à Beach Brazzaville 1903-2010

Au cours de la première phase de stabilité (1903-1959), tous les débits du Congo ont tendance à augmenter (voir Fig. 10 et 11).

Durant la phase humide (1960-1970), les débits moyens et minimums ont tendance à rester stables. Par contre les débits maximums ont tendance à s'amoindrir (voir Fig. 10 et 11).

Pendant la phase des débits stables (1971-1981), les débits moyens et minimums augmentent alors que les débits maximums se stabilisent (voir Fig. 10 et 11).

Durant la phase sèche (1982-1994), les débits minimums ont tendance à légèrement augmenter alors que les débits moyens et maximums ont tendance à rester stables (voir Fig. 10 et 11).

Au cours de la phase actuelle (1995-2010), les débits moyens et minimums ont tendance à être stables alors que les débits maximums ont tendance à diminuer (voir Fig. 10 et 11).



Figure 10: Evolution des modules par périodes de débits homogènes avec leurs tendances respectives pour le Congo à Beach Brazzaville 1903-2010



Figure 11: Evolution des débits minimums et maximums mensuels par périodes de débits homogènes avec leurs tendances respectives pour le Congo à Beach Brazzaville 1903-2010

La différence entre les débits maximums et minimums a tendance à être stable sur la chronique du Congo (voir Fig. 9). En séparant les débits par périodes homogènes, nous constatons que durant la première période (1903-1959) et la quatrième (1982-1994) cette différence de débits est relativement stable, par contre dans les trois autres périodes (1960-1970; 1971-1981; 1995-2010), l'écart entre les débits maximums et minimums a tendance à diminuer (voir Fig. 12).



Figure 12: Evolution de la différence des débits maximums et minimums mensuels par périodes de débits homogènes avec leurs tendances respectives pour le Congo à Beach Brazzaville 1903-2010

4.2.2 L'Oubangui à Bangui

Les débits de l'Oubangui à Bangui ont tendance à diminuer depuis 1936 (voir Fig. 13 et 14). Mais en séparant les débits par périodes homogènes nous avons constaté que ceux-ci ont tendance à augmenter durant les périodes de débits homogènes (1971-1981 ; 1982-2010) depuis 1971 (voir Fig. 15 et 16). La variabilité interannuelle des écoulements est assez élevée (2,9).



Figure 13: Evolution du module avec sa tendance pour l'Oubangui à Bangui 1936-2010



Figure 14: Evolution des débits minimums et maximums mensuels avec leurs tendances respectives pour l'Oubangui à Bangui 1936-2010



Figure 15: Evolutions des modules par périodes homogènes avec leurs tendances respectives pour l'Oubangui à Bangui 1936-2010



Figure 16: Evolution des débits minimums et maximums mensuels par périodes de débits homogènes avec leurs tendances respectives pour l'Oubangui à Bangui 1936-2010

Les tendances de la différence entre les débits maximums et les débits minimums rejoignent celles des débits maximums (voir Fig. 16 et 17). Ces derniers sont bien plus importants que les minimums (16 fois en moyenne) ceci se caractérisent par une diminution lente mais continue sur toute la série (voir Fig. 14).



Figure 17: Evolution de la différence des débits maximums et minimums mensuels par périodes de débits homogènes avec leurs tendances respectives pour l'Oubangui à Bangui 1936-2010

4.2.3 La Sangha à Ouesso

Nous constatons, sur la chronique des débits de la Sangha à Ouesso, que tous les débits ont tendance à diminuer ainsi que l'écart entre les débits maximum et minimum (voir Fig. 18 et 19). La variabilité interannuelle des débits est de 1,93.



Figure 18: Evolution du module avec sa tendance pour la Sangha à Ouesso 1948-2010



Figure 19: Evolution des débits minimums et maximums mensuels avec leurs tendances respectives pour la Sangha à Ouesso 1948-2010

Durant la première période (1948-1970), les débits ont tendance à augmenter. Ainsi que la différence entre les débits maximums et minimums.

Au cours de la seconde période (1971-2010), les débits ont tendance à rester stables voire à baisser. La différence entre les débits maximums et minimum a tendance à rester stable (voir Fig. 20, 21 et 22).



Figure 20: Evolution des modules par périodes de débits homogènes avec leurs tendances respectives pour la Sangha à Ouesso 1948-2010



Figure 21: Evolution des débits minimums et maximums mensuels par périodes de débits homogènes avec leurs tendances respectives pour la Sangha à Ouesso 1948-2010



Figure 22: Evolution de la différence des débits maximums et minimums mensuels par périodes de débits homogènes avec leurs tendances respectives pour la Sangha à Ouesso 1948-2010

4.2.4 L'Orénoque à Ciudad Bolivar

Tous les débits de l'Orénoque à Ciudad Bolivar ont tendance à rester stables. La différence entre les débits maximums et minimums a donc tendance également à être stable (voir Fig. 23 et 24). La variabilité interannuelle est de 1,69.



Figure 23: Evolution du module avec sa tendance pour l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010



Figure 24: Evolution des débits minimums et maximums mensuels avec leurs tendances respectives pour l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010

4.3 ETUDE DES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES REGIMES HYDROLOGIQUES PAR STATIONS AVEC EXCEL

Pour l'étude des régimes hydrologiques des quatre stations, nous avons étudié la morphologie des crues et des étiages. Nous avons donc calculé le module interannuel et défini une crue comme commençant quand les débits dépassent le module interannuel et se termine quand les débits reviennent à des valeurs inférieurs à ce module. À l'inverse un étiage commence quand les débits sont inférieurs au module interannuel et se termine quand les débits dépassent le module interannuel et se termine quand les débits dépassent le module interannuel et se termine quand les débits dépassent le module interannuel et se termine quand les débits dépassent le module interannuel et se termine quand les débits dépassent le module interannuel.

4.3.1 Le Congo à Beach Brazzaville

- Etude des cycles hydrologiques par période d'écoulement homogène

Nous constatons que la crue principale du Congo à Beach Brazzaville commence en général en octobre et se finit pour la plupart du temps en février. Ensuite un grand étiage commence donc en février et se termine en octobre. Durant l'étiage une crue secondaire apparaît avec son pic de crue généralement en mai (voir Fig. 25). Parfois cette crue dépasse le module interannuel.



Figure 25: Hydrogrammes journaliers moyen et extrêmes du Congo à Beach Brazzaville 1947-2010 et tendances durant le cycle hydrologique

L'hydrogramme moyen pour la période humide 1960 à 1970, montre que la crue secondaire dépasse le module interannuel (voir Fig. 26). Nous voyons distinctement la phase humide de 1960 à 1970 et la phase plus sèche de 1982 à 1994. Par contre, les trois phases de stabilité se confondent avec l'hydrogramme journalier moyen de 1947 à 2010 (voir Fig. 26).



Figure 26: Comparaison des hydrogrammes moyens journaliers des différentes périodes d'écoulements homogènes du Congo à Beach Brazzaville 1947-2010

- <u>Etude de la morphologie des crues et étiages</u>

Nous avons classé les crues principales du Congo à Brazzaville de 1903 à 2010 en quatre catégories : 50% des crues sont pointues, 27% sont arrondies, 16% sont des plateaux et pour finir 7% présentent une montée de crue quasiment linéaire et une décrue arrondie.

Comme l'étude de la morphologie des crues a été faite avec les débits au pas de temps mensuel de 1903 à 1947, les formes des hydrogrammes ne sont pas aussi précises qu'avec le pas de temps journalier (disponible de 1948 à 2010), et le résultat peut être faussé (surtout pour les crues pointues ou arrondies). Par conséquent nous avons re-effectué cette analyse avec les données journalières disponibles pour cette dernière période.

Il y a donc 25% de crues pointues, 43% arrondies, 21% en formes de plateaux et 11% avec une montée de crue quasiment linéaire et une décrue arrondie (voir Fig. 27).

Nous n'avons pas décelé de tendances dans l'évolution des morphologies des crues en fonction du temps.



Figure 27: Principaux types morphologiques de la crue principale du Congo à Beach Brazzaville 1948-2010, classés par familles (1=pointue, 2=arrondie, 3=en plateau, 4=dissymétrique)

Les étiages ont été également classés en quatre catégories, de 1903 à 2010, grâce à la morphologie de la crue secondaire. 17% des étiages n'ont pas de crue secondaire mais ont une sorte de marche, 36% des crues secondaires sont pointues, 32% sont arrondies et seulement 15% sont des plateaux.

De 1948 à 2010, 13% des étiages n'ont pas de crue secondaire, 23% des crues secondaires sont pointues, 42% sont arrondies et 22% sont des plateaux (voir Fig. 28). Nous n'avons pas trouvé de tendance de la morphologie des étiages en fonction du temps.



Figure 28: Principaux types morphologiques de l'étiage du Congo à Beach Brazzaville 1948-2010, classés par familles de crues secondaires (0=pas de crue secondaire, 1=pointue, 2=arrondie, 3=en plateau)

D'après les courbes de tendances, nous observons, pour le Congo à Beach Brazzaville, de 1903 à 2010, que le rapport « amplitude sur durée des crues » a tendance à augmenter fortement (voir Fig. 29). Ceci étant dû à l'augmentation de l'amplitude des crues (voir Fig. 30) et la diminution de leurs durées au cours du temps (voir Fig. 31). Par contre, le rapport « amplitude sur durée des étiages » a tendance à rester stable, alors qu'il y a une légère augmentation de l'amplitude des étiages et de leurs durées.



Figure 29: Evolution du rapport des amplitudes sur les durées des crues et des étiages du Congo à Beach Brazzaville 1903-2010



Figure 30: Evolution des amplitudes de crues et d'étiages du Congo à Beach Brazzaville 1903-2010



Figure 31: Evolution des durées de crues et d'étiages du Congo à Beach Brazzaville 1903-2010

Lorsque nous observons les volumes d'eau écoulés des crues et des étiages du Congo à Beach Brazzaville, nous constatons que les volumes d'eau écoulés des étiages sont souvent plus importants que ceux des crues (voir Fig. 32). La présence de la crue secondaire et l'étiage durant 7 mois peut y contribuer.

Le volume d'eau écoulé des crues du Congo à Beach Brazzaville, de 1948 à 2010, a tendance à rester stable par contre le volume d'eau écoulé des étiages a tendance à diminuer.



Figure 32: Evolution des volumes d'eau écoulés de crues et d'étiages du Congo à Beach Brazzaville 1948-2010

4.3.2 L'Oubangui à Bangui

- Etude des cycles hydrologiques par période d'écoulement homogène

La crue de l'Oubangui à Bangui commence habituellement en mi-juillet et se finit généralement en mi-décembre. Donc l'étiage durant 7 mois occupe le restant de l'année (voir Fig. 33). Le fleuve a quatre périodes de débits homogènes. L'écart des débits se situe principalement durant la crue (voir Fig. 34). Nous voyons que l'hydrogramme de la période de 1971 à 1981 rejoint l'hydrogramme journalier moyen de 1936 à 2010 (voir Fig. 34).



Figure 33: Hydrogrammes journaliers moyen et extrêmes de l'Oubangui à Bangui 1936-2010 et tendances durant le cycle hydrologique



Figure 34: Comparaison des hydrogrammes moyens journaliers des différentes périodes d'écoulements homogènes de l'Oubangui à Bangui 1936-2010

- Etude de la morphologie des crues et étiages

De 1936 à 2010, 56% des crues de l'Oubangui à Bangui sont en forme de plateaux, 37% sont pointues, et seulement 7% sont arrondies (voir Fig. 35). Nous n'avons pas observé de tendance dans l'évolution des morphologies des crues en fonction du temps.



Figure 35: Principaux types morphologiques de la crue de l'Oubangui à Bangui 1936-2010, classés par familles (1=pointue, 2=arrondie, 3=en plateau)

De 1936 à 2010, les étiages sont de formes arrondies, 52% présentent de petites crues irrégulières annonçant la crue annuelle, 33% ont un fond irrégulier, 11% seulement des étiages sont arrondis sans irrégularité, et 4% ont des irrégularités dans la décrue (voir Fig. 36). Nous n'avons pas trouvé de tendance dans la morphologie des étiages en fonction du temps.



Figure 36: Principaux types morphologiques de l'étiage de l'Oubangui à Bangui 1936-2010, classés par familles (0=pas d'irrégularité, 1=irrégularité dans la décrue, 2=fond irrégulier, 3=irrégularité dans la crue)

D'après les courbes de tendances de l'Oubangui à Bangui, les rapports « amplitude sur durée des crues et étiages » diminuent sur la chronique (voir Fig. 37), or les durées des crues et étiages ont tendance à rester constantes (voir Fig. 39). Cette diminution est donc due aux amplitudes des crues et étiages qui ont tendance à diminuer également (voir Fig. 38).



Figure 37: Evolution du rapport des amplitudes sur les durées des crues et des étiages de l'Oubangui à Bangui 1936-2010



Figure 38: Evolution des amplitudes des crues et des étiages de l'Oubangui à Bangui 1936-2010



Figure 39: Evolution des durées des crues et des étiages de l'Oubangui à Bangui 1936-2010

Les volumes d'eau écoulés des crues de l'Oubangui à Bangui sont pratiquement deux fois supérieurs à ceux des étiages. Ces volumes ont tendance à fortement diminuer de 1936 à 2010 (voir Fig. 40).



Figure 40: Evolution des volumes d'eau écoulés des crues et des étiages de l'Oubangui à Bangui 1936-2010

4.3.3 La Sangha à Ouesso

- Etude des cycles hydrologiques par période d'écoulement homogène

La crue de la Sangha à Ouesso commence ordinairement fin août et se termine à midécembre. L'étiage occupant le restant de l'année dure donc à peu près 9 mois. L'étiage de la Sangha à Ouesso est particulier. En effet, il montre souvent la présence d'une multitude de petites crues, qui apparaissent avec une fréquence plus élevée vers sa fin et qui annoncent la montée de la crue principale. Nous le voyons en regardant un hydrogramme quelconque, ou les hydrogrammes des débits maximums ou minimums. Par contre, l'hydrogramme des débits moyens lisse le tout et forme un palier (voir Fig. 41).



Figure 41: Hydrogrammes journaliers moyen et extrêmes de la Sangha à Ouesso 1948-2010 et tendances durant le cycle hydrologique

Nous constatons que de 1948 à 1970 les petites crues situées à la fin de l'étiage sont beaucoup plus fortes que celles de la deuxième période (de 1971 à 2010). En effet nous observons que durant la première période les petites crues dépassent le module interannuel de la chronique (voir Fig. 42).



Figure 42: Comparaison des hydrogrammes moyens journaliers des différentes périodes d'écoulements homogènes de la Sangha à Ouesso 1948-2010

- Etude de la morphologie des crues et étiages

Nous avons classé les formes des hydrogrammes de crues de la Sangha à Ouesso de 1948 à 2010 en trois catégories qui sont réparties quasiment identiquement 39% des crues sont des plateaux, 31% sont arrondies et 30% sont pointues (voir Fig. 43). La morphologie des crues ne présente aucune tendance dans le temps.



Figure 43: Principaux types morphologiques de la crue de la Sangha à Ouesso 1948-2010, classés par familles (1=pointue, 2=arrondie, 3=en plateau)

Quant aux étiages de la Sangha à Ouesso, aucune forme particulière n'apparait car ils présentent de petites crues.

De 1948 à 2010, le rapport « amplitude sur durée des crues » a tendance à diminuer (voir Fig. 44). Ceci est la conséquence de la baisse des amplitudes des crues (voir Fig. 45) et la hausse de leurs durées (voir Fig. 46). Par contre le rapport « amplitude sur durée des étiages » a tendance à rester stable (voir Fig. 44). Ceci est dû à la stabilité des amplitudes et des durées des étiages (voir Fig. 45 et 46).



Figure 44: Evolution du rapport des amplitudes sur les durées des crues et des étiages de la Sangha à Ouesso 1948-2010



Figure 45: Evolution des amplitudes des crues et des étiages de la Sangha à Ouesso 1948-2010



Figure 46: Evolution des durées des crues et des étiages de la Sangha à Ouesso 1948-2010

Nous constatons que pendant la phase humide de 1948 à 1970 les volumes d'eau écoulés des étiages de la Sangha à Ouesso sont plus importants que les volumes d'eau écoulés de ses crues et ceci s'inverse par la suite (voir Fig. 47). Ces volumes ont tendance à diminuer sur la chronique. Les volumes d'eau écoulés des étiages diminuent beaucoup plus vite que ceux des crues.



Figure 47: Evolution des volumes d'eau écoulés des crues et des étiages de la Sangha à Ouesso 1948-2010

4.3.4 L'Orénoque à Ciudad Bolivar

- Etude des cycles hydrologiques

La crue de l'Orénoque à Ciudad Bolivar commence généralement début juin et se termine 5 mois et demi plus tard en mi-novembre, l'étiage occupe l'autre partie de l'année (voir Fig. 48)



Figure 48: Hydrogrammes journaliers moyen et extrêmes de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010 et tendances durant le cycle hydrologique

- <u>Etude de la morphologie des crues et étiages</u>

La plupart des crues de l'Orénoque à Ciudad Bolivar depuis 1926 sont arrondies (59%), certaines sont plus des plateaux (27%), et une petite partie de ces crues (14%) sont plus pointues (voir Fig. 49). 50% des étiages sont arrondis, 16% sont en forme de V décalé vers la droite et 34% ont la forme d'un trapèze inversé (voir Fig. 50). La morphologie des crues et des étiages n'a aucune tendance dans le temps.



Figure 49: Principaux types morphologiques de la crue de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010, classés par familles (1=pointue, 2=arrondie, 3=en plateau)



Figure 50: Principaux types morphologiques de l'étiage de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010, classés par familles (1=V décalé vers la droite, 2=arrondi, 3=trapèze inversé)

D'après les courbes de tendances de l'Orénoque à Ciudad Bolivar, nous constatons que les amplitudes et les durées des étiages ont tendance à rester stables ainsi le rapport « amplitude sur durée des étiages » a lui aussi tendance à être stable (voir Fig. 51, 52 et 53). Par contre la durée des crues augmente, leurs amplitudes étant invariable, ceci fait légèrement diminuer le rapport « amplitude sur durée des crues ».



Figure 51: Evolution du rapport des amplitudes sur les durées des crues et des étiages de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010



Figure 52: Evolution des amplitudes des crues et des étiages de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010



Figure 53: Evolution des durées des crues et des étiages de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010

Les volumes d'eau écoulés des crues de l'Orénoque à Ciudad Bolivar sont à peu près 3 fois plus importants que les volumes d'eau écoulés des étiages. Ces volumes ont tendance à rester stables (voir Fig. 54).



Figure 54: Evolution des volumes d'eau écoulés des crues et des étiages de l'Orénoque à Ciudad Bolivar 1926-2010

CONCLUSION

Le Congo et l'Orénoque ont des débits moyens annuels similaires, respectivement 41 000 m³.s⁻¹ et 33 000 m³.s⁻¹ à leurs principales stations hydrométriques. Leurs variabilités interannuelles des débits sont semblables, aux alentours de 1,7.

Cette étude nous a permis de constater que les chroniques de débits moyens du Congo à Beach Brazzaville sont découpées en cinq segments. Une période humide de 1960 à 1970 et une période sèche de 1982 à 1994, entourées par trois périodes dites normales 1903 à 1959, de 1971 à 1981, et de 1995 à 2010.

Les chroniques de débits moyens de l'Oubangui à Bangui sont découpées en quatre segments (de 1936 à 1959, de 1960 à 1970, de 1971 à 1981 et de 1982 à 2010). Ces chroniques de débits rejoignent celles du Congo à Beach Brazzaville de 1936 à 1982. En effet, les années de ruptures sont les mêmes et les différentes phases (de stabilité, humide, et sèche) se situent aux mêmes endroits. De 1982 à 2010, l'Oubangui reste dans la phase sèche alors que le Congo revient à une phase de stabilité.

La Sangha à Ouesso présente deux périodes de débits homogènes. Ceux-ci sont supérieurs à la moyenne interannuelle de 1948 à 1970 et inférieurs à cette même moyenne de 1971 à 2010.

La chronique des débits moyens de l'Orénoque à Ciudad Bolivar est homogène de 1926 à 2010.

L'amplitude des crues du Congo a tendance à augmenter tandis que leurs durées diminuent, leurs volumes sont donc inchangés et restent ainsi stables. Par contre les volumes écoulés des étiages ont tendance à diminuer alors que leurs durées augmentent et que leurs amplitudes restent stables.

Les volumes écoulés de l'Oubangui diminuent pratiquement de moitié de 1936 à 2010. Ceci est dû à la baisse des amplitudes car la durée des crues et étiages ont tendance à rester stables.

Les volumes écoulés de la Sangha diminuent, ceci est la conséquence de la diminution des amplitudes pour les crues et de la durée pour les étiages.

Les volumes écoulés de l'Orénoque ont tendance à être stables.

Ce travail nous a permis d'analyser les variations interannuelles des écoulements de ces grands fleuves intertropicaux. Mais ces données ne nous permettent pas de dire si ces variations sont la conséquence d'impacts anthropiques et/ou climatiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- ALIVA SERRANO, V.R., (2007). « Etude bibliographique du fonctionnement hydrogéomorphique de la plaine alluviale d'un grand fleuve tropical : l'Orénoque, Venezuela. » Rapport de stage de l'Université Blaise Pascal, Faculté des Lettres et Sciences Humaines Clermont-Ferrand II, Centre national de la recherche scientifique. p. 11 – 15.
- AL-KATTAN, R., (2011). « Variabilité temporelle des flux géochimiques du bassin de l'Orénoque. » Rapport de stage de l'Université Paul Sabatier Toulouse III, Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse et Institut de Recherche pour le Développement, p. 2 - 5.
- CENSIER, C., (1995). « Dynamique sédimentaire de la charge de fond sableuse du cours moyen et inférieur de la Sangha (République du Congo) » *Grands bassins fluviaux péri-atlantiques : Congo, Niger, Amazone.* BOULEGUE, J., OLIVRY, J. C. Paris, ORSTOM : p.229 238.
- CORDOVA, J.R., (1999. « Caracterizacion del Funcionamiento Hidrologico e Hidraulico-Fluvial del delta del Rio Orinoco. » *PDVSA informe Desarrollo Armonico de Oriente DAO*, *FUNINDES*, *USB* : 254 p.
- GRIES, S., (1996). « Typologie géochimique des eaux de surface en Afrique Centrale. » Rapport de stage de l'Université Paris XI, Laboratoire d'hydrologie ORSTOM/Montpellier, p. 1 40.
- LARAQUE, A., ADELE, G., (2009). « Bassin de l'Orénoque stations étudiées : Orénoque à Ciudad Bolivar, Orénoque à Musinacio. » 58 p.
- LARAQUE, A., CASTELLANOS, B., STEIGER, J., LOPEZ, J.L., PANDI, A., RODRIGUEZ, M., ROSALES, J., ADELE, G., LAGANE, C., (soumis) « Solid and dissolved matter dynamics of two large intertropical rivers draining into the Atlantic Ocean : Congo v. Orinoco. » *Hydrological Processes* : 38 p.
- LARAQUE, A., MAHE, G. ORANGE, D., MARIEU, B., (2001). « Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. » Journal of Hydrology 245 : p. 104 – 117.
- LARAQUE, A., MAZIEZOULA, B., ORANGE, D., OLIVRY, J.C., (1998) « Origine des variations de débits du Congo à Brazzaville durant le XXème siècle. » Variabilité des ressources en eau en Afrique au XXème siècle. SERVAT, E., HUGHES, D., FRITSCH, J.M., HULME, M., Abidjan, Côte d'Ivoire, IAHS. 252 : p. 171 – 179.
- LARAQUE, A., MIETTON, M., OLIVRY, J.C., PANDI, A., (1998). « Influence des couvertures lithologiques et végétales sur les régimes et la qualité des eaux des affluents congolais du fleuve Congo. » *Revue des Sciences de l'Eau* **11** : p. 209 224.
- LUBES NIEL, H., MASSON, J.M., PATUREL, J.E., SERVAT, E., (1998). « Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. » *Revue des Sciences de l'Eau* **11** (3) : p. 383 408.

- OLIVRY, J.C., (1989). « Transports solides sur l'Oubangui. » Quatrièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier : physico-chimie des eaux continentales Paris, ORSTOM : p.147 – 161.
- ORANGE, D., OLIVRY, J.C., CENSIER, C., (1995). « Variations et bilans des flux de matières particulaires et dissoutes de l'Oubangui à Bangui. » *Grands bassins fluviaux périatlantiques : Congo, Niger, Amazone* BOULEGUE, J., OLIVRY, J.C. Paris, ORSTOM : p. 147 158.
- ORANGE, D., WESSELINK, A. J., FEIZOURE, C.T., (1996). « Les régimes hydroclimatiques et hydrologiques d'un bassin versant de type tropical humide: l'Oubangui (République Centrafricaine). » Journées Hydrologiques de l'ORSTOM : Conférence de Paris, 11. CHEVALIER, P., POUYAUD, B. : p. 179 – 194.
- POUYAUD, B., BARILLY, A., (1971). « Le bassin de la Sangha : la Sangha à Ouesso, le Dja à Fort-Soufflay. », Brazzaville, ORSTOM : 36 p.
- SANCHEZ, A.L., (1993). « Etude du phytoplancton des lacs d'inondation du bas Orénoque : relations avec les facteurs du milieu. » Thèse de l'Université Paul Sabatier Toulouse III, Travaux et Documents Microédités (FRA), Paris, 227 p.
- UNESCO, (1995). « Discharge of selected rivers of Africa. » *Studies and reports in hydrology* **52** : 166 p.
- WARNE, A.G., MEADE, R.H., WHITE, W.A., GUEVARA, E.H., GIBEAUT, J., SMYTH, R.C., ASLAN, A., TREMBLAY, T., (2002). « Regional controls on geomorphology, hydrology, and ecosystem integrity in the Orinoco Delta, Venezuela. » *Geomorphology* **44** (3 4): p. 273 307.