



HYDRODYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DU MOYEN DELTA FLEUVE OUEME EN CONTEXTE DES INONDATIONS ACTUELLES

HYDRODYNAMIC SEDIMENTARY OF THE MIDDLE DELTA OF THE OUEMÉ RIVER IN THE CONTEXT OF THE CURRENT FLOODS

ADECHINA A.R.M.A, KELOME C.N., HOUNKPE J.B.

Département des Sciences de la Terre, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 526
Cotonou (Bénin);

radechina@yahoo.fr

ABSTRACT

Inter-annual fluctuations in rainfall over the last three decades have been associated with the recurrent floods in Ouémé estuary. The purpose of this work is to analyze the water and sediment flows and their conditions for remobilization of sedimentary deposits during floods. In September 2016, the characteristics of the water were measured with multipara meter and turbid meter, liquid flow rates with the aDcp current meter. Suspended sediment (MES) and bottom sediment were collected for particle size analysis. Water sampling was resumed in March 2017 and the MES of all waters was analyzed by spectrophotometer. The water flow in September was 617 m³/s in Bonou and 572 m³/s in Adjohoun. MES, turbidity, and shear rate are higher in September, more importantly in Adjohoun than Bonou. The aforementioned flows were sufficient to remobilize sediments having a median d₅₀ less than 0.1 mm. This remobilization is indicated by an increase in sediment flows from 46.3 Kg/s in Bonou to 55.6 Kg/s in Adjohoun.

Keywords: Ouémé, flood, water flow, sediment flow, remobilization.

RESUME

Les fluctuations pluviométriques interannuelles des trois dernières décennies ont été associées à la récurrence des inondations dans l'estuaire de l'Ouémé. Le but de ce travail est d'analyser les flux d'eau et des sédiments ainsi que les conditions de remobilisation des dépôts lors des inondations. En septembre 2016, les caractéristiques des eaux ont été mesurées à l'aide d'un multi paramètre et d'un turbidimètre; les débits liquides ont été mesurés au courantomètre aDcp. Les sédiments en suspension (MES) et les sédiments du fond ont été recueillis pour des analyses granulométriques. L'échantillonnage d'eau a été repris en mars 2017 et les MES de toutes les eaux ont été analysés par spectrophotométrie. Le débit d'eau en septembre était de $617 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bonou contre $572 \text{ m}^3/\text{s}$ à Adjohoun. Le MES, la turbidité et le taux de cisaillement ont été plus élevés en septembre et plus importants à Adjohoun qu'à Bonou. Les débits indiqués ont été suffisants pour remobiliser des sédiments ayant une médiane d_{50} inférieure à $0,1 \text{ mm}$. Cette remobilisation s'est traduite par une augmentation des flux de sédiments de $46,3 \text{ Kg/s}$ à Bonou à $55,6 \text{ Kg/s}$ à Adjohoun.

Mots-clés : Ouémé, inondation, flux d'eau, flux de sédiments, remobilisation

INTRODUCTION

La compréhension de la relation entre les fluctuations climatiques et les processus sédimentaire est une démarche importante dans les environnements aquatiques. Les conséquences des fluctuations climatiques de ces dernières décennies sont manifestées par des irrégularités pluviométriques, des inondations, la déforestation, la hausse des températures de surface des eaux... (IPCC, 2014; Guo *et al.*, 2015). S'agissant des processus de transfert solides et liquides, il est signalé une augmentation des flux solides pendant les inondations. A titre illustratif, à Rio Solimões, dans le bassin amazonien, le ratio du taux de matières en suspension entre le fond et la surface a montré un maximum de 2,8 pendant l'inondation et un minimum de 1,7 pendant la décrue (Filizola, 2003). Dans l'estuaire du Konkouré (République de Guinée), il est aussi remarqué que, le ratio des débits liquides entre les périodes d'inondation et les périodes de récession est d'environ 28,57 (Capo, 2006). Par ailleurs, Church (2015) a montré que le taux de sédiments en transit est fonction du débit d'eau et des caractéristiques du chenal, notamment la morphologie, la pente, Ainsi, pour mieux comprendre les processus d'approvisionnement

sédimentaires, la contrainte de cisaillement dont la valeur critique θ_{cr} est proportionnelle au diamètre de la particule est l'un des paramètres utilisés (Shields, 1936, Parker *et al.*, 2003). Bunte *et al.* (2013) ont noté une augmentation de la valeur critique θ_{cr} avec la pente. Par contre, Martin (2003) ; Moraes Franklin (2008) ont signalé la diversité des méthodes expérimentales, des conditions du site et des valeurs du seuil de mouvement des particules sédimentaires.

Au Bénin, la pluviométrie est caractérisée par une fluctuation annuelle et les années 2003, 2007, 2008, 2009 et 2010 sont les plus humides avec les inondations associées (Zannou et Vodounou, 2014). Pour l'inondation de 2010, le Bénin a été le pays le plus touché d'Afrique de l'Ouest avec des précipitations journalières maximales de 953 mm. En termes d'évaluation des débits, en 1956, les apports solides de la crue de l'Ouémé dans la plaine sont de 19500 kg/ha. Ces apports ont quadruplé en 1957 et sont de 64 000 kg/ha. Les mesures des flux de matières en suspension lors de la crue du 29 août 1966 à Adjohoun dans le bassin versant de l'Ouémé, ont révélé un débit de 106 kg/s (Colombani *et al.*, 1972). A l'étape actuelle, les données sur l'apport en sédiments sont très anciennes et loin de refléter la charge transportée dans le contexte actuel des inondations. Malgré la diversité des conditions expérimentales et des sites pour lesquels elles sont définies, les contraintes de cisaillement du fond fluvial demeurent une variable largement utilisée pour renseigner sur les processus de mise en mouvement et donc d'approvisionnement sédimentaire. Or, les recherches menées dans Ouémé n'ont jamais quantifié ces différentes forces hydrauliques. C'est la raison pour laquelle cette étude analyse les flux d'eau et de sédiments ainsi que les dépôts sédimentaires de fond du chenal Ouémé. Plus précisément, il détermine les variations de la qualité physico-chimique de l'eau, détermine les seuils de remobilisation des sédiments pendant les inondations actuelles.

MATERIELS AND METHODES

Cadre d'étude

L'estuaire de l'Ouémé est une portion du delta de l'Ouémé, lequel est localisé dans la partie méridionale du Bénin, un des pays ouest-africains. Les formations géologiques sont constituées de dépôts quaternaires qui reposent sur une épaisse couche de grès, d'argiles, de calcaire... dont les âges remontent jusqu'au Cénomaniens. La lithologie des dépôts quaternaires est composée d'argiles, de sables, de vases, de tourbe (Laibi, 2011). Le delta de l'Ouémé est subdivisé en

trois secteurs (Moniod, 1973). Le haut-delta commence à la confluence de l'Ouémé avec le Zou jusqu'à la limite de Bonou. Le moyen-delta va de Bonou à Azowlissè (Adjohoun). Le bas-delta s'étend de Azowlissè jusqu'au nord du complexe lac Nokoué-lagune de Porto-Novo. D'un point de vue hydrologique, lorsque la cote à Bonou est inférieur à 7,50 m, l'écoulement de fleuve Ouémé vers Sô ne sont pas significatifs (Le Barbé *et al.*, 1993). Les affluents que sont *Ouovi* et *Zouvi* dans le moyen-delta peuvent s'écouler vers la Sô, lorsque la cote dépasse 5,50 m à Bonou. Dans le bas delta, les débordements commencent dès que le niveau d'eau à Bonou dépasse environ 6,00 m. A la station de Bonou, la moyenne mensuelle des débits de 1970 à 2010 montre un minimum de 5,49 m³/s en mars et un maximum de 621,42 m³/s en septembre. À Bonou, après une période de récession qui dure de janvier à mai, l'onde d'inondation arrive en juin et la récession commence en novembre. La salinité de septembre à novembre est d'environ 0,1%. En décrue, la salinité est proche de 2% à l'embouchure du Sô et ne dépasse pas 1% pour l'Ouémé. Au cours de cette dernière période, il se produit une remontée des eaux lagunaire jusqu'à environ 25 km dans l'Ouémé. Afin de minimiser l'influence de la marée ressentie jusqu'à la hauteur de Hétin Sôta (Le Barbé *et al.*, 1993), les mesures hydrodynamiques ont été limitées dans le delta moyen entre les latitudes 6 ° 42'57.455 " et 6 ° 54 ' 35.251 ".

Echantillonnage et mesure in situ dans l'estuaire de l'Ouémé

Les mesures in situ ont été effectuées sur une section transversale des stations hydrométriques de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau) notamment à Adjohoun et à Bonou (Figure 2). Du 3 au 4 septembre 2016, les débits d'eau ont été mesurés à l'aide d'un courantomètre acoustique à effet Doppler (RD Instruments Riogrande, 600 kHz) de l'Institut de Recherche pour le Développement. Toutes les mesures ont été effectuées en position mobile sur des transects qui ont consisté aux allers retours du dispositif équipé à l'aDcp sur les sections transversales. Le débit moyen des transects effectués sur la même section correspond au débit moyen de la station. Deux types d'échantillonnage ont été réalisés. D'abord les eaux puis les sédiments. En ce qui concerne les eaux, quatorze (14) échantillons d'eau ont été prélevés à 0; 1 et 3 m de profondeur, notamment à l'extrémité et au milieu des sections transversales.

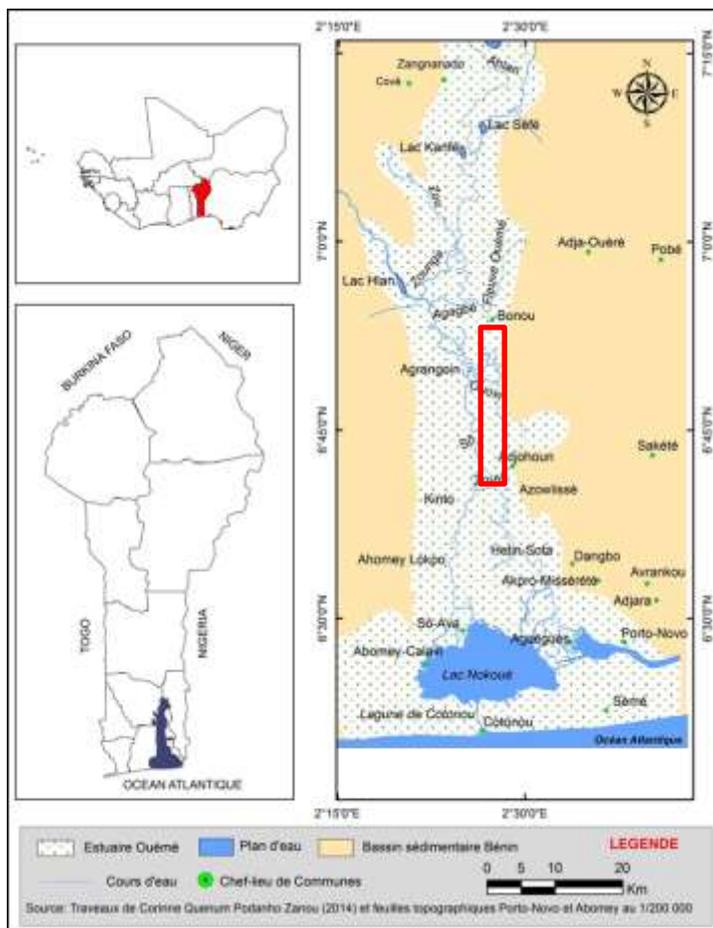


Figure 1 : Situation de l'estuaire de l'Ouémé

La conductivité électrique, les solides dissous totaux (TDS) et la salinité ont été immédiatement mesurés au multiparamètre 340 i / SET et la turbidité au turbidimètre Wagatech. Les matières en suspension (MES) ont été analysées au spectrophotomètre d'absorption moléculaire (DR 2800; $\lambda = 810 \text{ nm}$) au laboratoire de contrôle de la qualité de l'eau et des aliments. Des échantillons de sédiments en suspension ont été piégés à 1 et 3 m de profondeur et ceux du fond également ont été prélevés. Les sédiments de fond recueillis à Bonou sont codés de Bon-a à Bon-f et ceux de Adjohoun sont codés Adj-a, Adj-b et Adj-c (Figure 2 et 3). Les sédiments Bon-e et Bon-f ont été recueillis sur la même berge inondée mais sub verticale. La position géographique des trois sédiments de

fond recueillis à Adjohoun est la même que celle des eaux. À Bonou, les eaux ont été prélevées aux points de prélèvement des sédiments Bon-b, Bon-c et Bon-d. Pour le piégeage des sédiments, le piège était positionné au même endroit que le sédiment Adj-a, avec une marge d'erreur de 4 m. Celui de Bonou a été installé au point de prélèvement des sédiments Bon-b (Figure 2).



Figure 2 : Positionnement des transects de mesures des paramètres hydrodynamiques à Bonou et d'Adjohoun

Les sédiments sont également codés selon la profondeur de piégeage, soit Adj-1m, Adj-3m (à Adjohoun) et Bon-1m, Bon-3m (Bonou). Pendant la décrue du 4 mars 2017, des échantillons d'eau ont été prélevés sur les positions géographiques des stations de la saison précédente. Seuls cinq échantillons du milieu des sections ont pu être prélevés en raison de la diminution significative de la profondeur de l'eau (4 m à Adjohoun et 6 m à Bonou). L'analyse quantitative des classes dimensionnelles est basée sur la norme AFNOR NFX 11504. Les coefficients de corrélation de Pearson ont été utilisés pour tester les différences significatives avec un niveau de confiance de 95% au logiciel R 3.3.2. La classification de la qualité des eaux a été basée sur celle proposée par

le système d'évaluation de la qualité des cours (SEQ-Eau) pour le MES ; le Réseau Francophone sur l'Eau et l'Assainissement (RéFEA) pour la turbidité ; et celle de Rodier *et al.* (2009) pour la conductivité (Tableau 1)

Tableau 1 : Classification de la qualité physico-chimique des eaux

Paramètre	Classification
Conductivité	0.05µS/cm: eau déminéralisée ; 10 à 80 µS/cm: eau de pluie; 80 à 100 µS/cm : eau peu minéralisée; 300 à 500 µS/cm: eau moyennement minéralisée ; 1000 à 3000 µS/cm : eau saline ; supérieure à 3000 µS/cm: eade mer (Rodier <i>et al.</i> , 2009)
MES	< 5 mg/l : Très bonne qualité ; 5 à 25 mg/l : bonne qualité ; 25 à 38 mg/l : passable ; 38 à 50 mg/l: mauvaise ; supérieure à 50 mg/l : Très mauvaise (SEQ-EAU)
Turbidité	< 5 NTU : Eau claire ; 5 à 30 NTU : Eau légèrement trouble ; supérieure à 50 : Eau trouble (ReFEA)

Evaluation des conditions hydrodynamiques de mise en mouvement des sédiments et de la capacité de transport de l'Ouémé

Les conditions hydrodynamiques de mise en mouvement des sédiments sont étudiées à partir du diagramme de Hjulstrom (Hjulström, 1935) et du paramètre de Shields θ_{cr} modifié par Soulsby (1997). Le diagramme de Hjulström permet de relier la vitesse du courant dans un cours d'eau à son action sur des matériaux de granulométrie variée. Il délimite les plages d'érosion-entraînement, de transport et de sédimentation des particules (Bravard et Petit, 1997). Ce diagramme a été une première approche d'étude des seuils de mise en mouvement des particules. Il exprime la vitesse de cisaillement (u^*) en fonction de la médiane. L'expression de la vitesse de cisaillement (u^*) est donnée par:

$$u^* = \sqrt{\tau/\rho_w} \quad (1)$$

Avec ρ_w la masse volumique de l'eau (998 kg/m³ à 20 °C) et τ la contrainte tractrice. τ est utilisée pour évaluer la capacité d'érosion du flux hydrique (Bravard et Petit, 1997). Elle est exprimée par la formule ci-après:

$$\tau = \rho_w g R_h S_e = \gamma_w R_h S_e \quad (\text{N.m}^{-2}) \quad (2)$$

Avec g l'accélération de la pesanteur (9,81 m.s⁻²), R_h le rayon hydraulique correspondant ici à la profondeur maximale du chenal, S_e la pente de la ligne d'énergie ou de l'écoulement égale à 0,045 m.km⁻¹), $\gamma_w=10 \text{ KN/ m}^3$ et $\gamma_s=27 \text{ KN/ m}^3$.

A partir des expériences sur un chenal à fond plat et soumises à un écoulement permanent, Shields (1936) a pu établir une équation de mise en mouvement des

particules. Ce seuil de mise en mouvement est appelé nombre de Shields critique θ_c . L'expression de θ_c est donnée par :

$$\theta_c = \tau[gcD50]^{-1} = \theta_c(Re^*) \quad (3)$$

D50 = médiane (en mm) et Re^* est le nombre Reynolds

Shields (1936) a utilisé une plage de Re^* comprise entre 6 et 220 et a renseigné que l'initiation du mouvement est possible dès que le seuil critique θ_c avoisine 0,056. Pour améliorer l'expérience de Shields du fait de la grande dispersion des données expérimentales, Soulsby (1997) a proposé une formule analytique dans laquelle un diamètre adimensionnel d_* a été défini et s'exprime par :

$$d_* = \left[\frac{Re_*^2}{1} \right]^{1/3} = D50 \left[\frac{(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1)g}{g^2} \right]^{1/3} \quad (4)$$

Le seuil θ_{cr} de mise en mouvement des sédiments est donc :

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1+1.2d_*} + 0.055(1 - e^{-0.020d_*}) \quad (5).$$

L'évaluation de l'hydrodynamisme d'un cours d'eau est généralement basée sur sa puissance spécifique (ω) car ce paramètre permet de prédire la capacité de transport du cours d'eau. (ω) s'exprime par la formule suivante (Bagnold 1966).

$$\omega = \Omega/w \text{ (W.m-2)} \quad (6)$$

Avec w la largeur du chenal et Ω la puissance fluviale qui s'exprime par :

$$\Omega = \rho_w g Q S \text{ (W.m-1)} \quad (7)$$

Où ρ_w est la masse volumique du fluide (1000 kg.m^{-3}), Q le débit (m^3s^{-1}), S la pente de la ligne d'eau (ici $S = 0,01 \%$).

RESULTATS ET DISCUSSION

Paramètres physiques des eaux du fleuve Ouémé

La salinité de la tranche des trois premiers mètres est inférieure à 0,1‰ aux mois de septembre 2016 et de mars 2017. Pendant les mesures de septembre 2016, la conductivité moyenne de l'eau est égale à $72 \mu\text{S/cm}$ à Adjohoun et $75 \mu\text{S/cm}$ à Bonou. En mars 2017, les valeurs ont augmenté avec une moyenne de $108,33 \mu\text{S/cm}$ à Adjohoun contre $100 \mu\text{S/cm}$ à Bonou. En référence à la classification de Roddier *et al.* (2009), l'Ouémé est principalement alimenté par

les eaux pluviales en septembre mais les eaux sont faiblement minéralisées en mars. Concernant les TDS, à Adjohoun, les valeurs obtenues sont en moyenne 36,14 mg/l contre 37,5 mg/l à Bonou. Comme la conductivité, les TDS de mars 2017 ont augmenté. Elles sont en moyen 54,33 mg/l à Adjohoun et 43,5 mg/l à Adjohoun. Les variations en MES des eaux sont plus considérables. En septembre 2016, la moyenne est égale à 97,68 mg/l à Adjohoun et 75,71 mg/l à Bonou . En mars 2017, les teneurs en MES des eaux ont diminué pour une moyenne de 15,56 mg/l à Adjohoun et 39 mg/l à Bonou. Selon la classification du SEQ-Eau, les eaux sont de très mauvaise qualité en septembre. La qualité de l'eau est bonne à Adjohoun en mars mais mauvaise à Bonou. Les turbidités des eaux des eaux à Adjohoun en septembre 2016 ont une moyenne de 120,48 NTU. Celles de Bonou ont une moyenne de 98,43 NTU. Comme les MES, les turbidités de mars 2017 ont diminué. A Adjohoun la moyenne est égale à 13,57 NTU contre 34,95 NTU à Bonou. D'après la classification du RÉFEA les eaux sont troubles en septembre et légèrement troubles en mars. Pendant les mesures de septembre 2016, le niveau d'eau a atteint la cote 6,94 m à Bonou et 4,28 m à Adjohoun. Le débit moyen est de 616,984 m³/s à Bonou. Une légère diminution est remarquée vers Adjohoun où le débit moyen évalué est 571,61 m³/s dans une section de 719,11 m².

Hydrologie de l'estuaire de l'Ouémé

Les variations de la conductivité montrent une influence remarquable des eaux pluviales en septembre et une faible minéralisation en mars. La variation de la qualité des eaux s'explique par le phénomène de dilution des eaux de l'Ouémé en période de crue. Rodier et *al.* (2005) a signalé que la conductivité est induite par la présence des ions mobiles dans un champ électrique. Elle augmente avec la concentration des ions calcium (Ca²⁺), sodium (Na⁺), chlorure (Cl⁻), bicarbonates (HCO³⁻) mais aussi avec la température (Merghem et *al.*, 2016). La faible minéralisation de l'eau au mois de mars peut être due à une légère augmentation de la température des eaux qui a engendré une légère évaporation. Au Sud du Bénin, le mois mars enregistre des températures journalières chaudes atteignant 31-33°C. Par ailleurs, selon Atto Yapi (2016), l'augmentation de la minéralisation de l'eau peut être favorisée par le processus de la minéralisation de la charge organique apportée en saison pluvieuse, lequel atteint son maximum en saison sèche. Les TDS montrent une variation saisonnière similaire à la conductivité. La légère augmentation des TDS en mars, peut s'expliquer par une légère augmentation des teneurs en sels dissous (exemple de NaCl, MgCl₂) dans les eaux analysées. Ladite augmentation en sels ne doit pas être significative, vu la salinité inférieure à 0,1‰ et la qualité faiblement

minéralisée des eaux. Les teneurs en matières en suspension renseignent que les eaux ont une très mauvaise qualité en septembre. Les valeurs élevées de MES en septembre sont sans doute liées aux apports des eaux de ruissellement chargées en particules provenant du nord pays ou des plateaux du "Continental terminal". Les teneurs élevées dans les eaux de Adjohoun (aval) par rapport à Bonou (amont) peuvent traduire un remaniement du terrain sédimentaire dans ce tronçon fluvial. En mars, la qualité de l'eau étant bonne à Adjohoun et mauvaise à Bonou peut s'expliquer soit par une inversion du sens de courant d'eau, soit par une décantation des particules en suspension, soit par une réduction de l'érosion des terrains. Le débit moyen mesuré en septembre 2016 a été de 616,984 m³/s à Bonou et 571,61 m³/s à Adjohoun. Les mesures hydrologiques antérieures ont révélé que, à la station de Bonou où le module annuel reflète l'évolution du débit du bassin (Le Barbé *et al.*, 1993), la moyenne mensuelle maximale obtenue en septembre est de 621,42 m³/s pour la période de 1970 à 2010. Comparativement au débit mesuré ponctuellement en novembre 2015 (110,288 m³/s) par la Direction Générale des Ressources en Eau, il est noté une baisse remarquable probablement liée à la période de jaugeage (DGEau, 2015).

Caractérisation granulométrique des sédiments

Les analyses granulométriques des sédiments du fond des deux sections ont attesté que la lithologie est essentiellement constituée de sables moyens à grossiers, de sables moyens argileux, de sables fins argilo-silteux et des argiles silto-sableuses. Les sables moyens à grossiers sont représentés par les sédiments Bon-a, Bon-c, Bon-e, Adj-a et Adj-c dans lesquels le pourcentage de sable (fraction entre 2 à 0,063 mm) varient entre 98-99,61 % (Figure 3). Les sables moyens argilo-silteux représentés par le sédiment Bon-b renferment 59 % de sable. Les sables fins argilo-silteux représentés par Adj-b et Bon-d renferment 68,20 % de sable. Les argiles silto-sableuses représentées par le sédiment Bon-f contiennent 27,24 % de sable. Quant aux sédiments en suspension, à Bonou, le transport montre une suspension graduée avec des argilo-silto-sableux près de la surface et des sables très fins argilo-silteux dans les trois derniers mètres. Le pourcentage de sable contenu passe ainsi de 48 % à 59 %. A Adjohoun, bien qu'il n'existe pas une différence faciologique dans la colonne étudiée, le pourcentage de sable passant de 23 à 36 % confirme également une graduation dans le transport. A la baisse du niveau d'eau suivant (mars 2017), la granulométrie des sédiments constitués d'argiles a varié très faiblement entre les deux stations. Les pourcentages de sables contenus sont de 15,58 % à Bonou et de 17 à 20 % à Adjohoun.

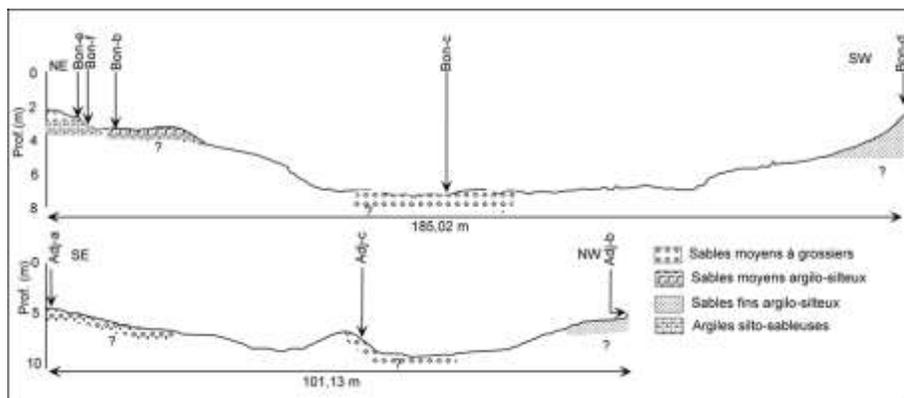


Figure 3 : Coupe montrant les points de prélèvement des sédiments du fond

Conditions hydrodynamiques de mise en mouvement des sédiments

Diagramme de Hjulström

Sur ce diagramme, les sédiments piégés sont situés dans la zone de transport pendant la crue de septembre (Figure 4). Les sédiments du fond du lit mineur (Bon-c, Adj-c), des berges (Bon-a, Bon-e, Adj-a) sont situés dans la zone de dépôt. Paradoxalement, quelques sédiments du fond des berges concaves (Bon-f, Bon-b et Adj-b) et de berge convexe (Bon-d) sont situés dans la zone des sédiments transportés. Ils sont logiquement déposés, mais en raison de leur pourcentage en fine particule et du fait qu'ils sont encore parcourus par un courant tractif pendant la période de crue (u^* égale à 0,059 – 0,0647) contredit leur appartenance dans la zone de sédimentation. Ce diagramme confirme que certains sédiments du fond des berges peuvent alimenter la charge en suspension. Il établit ainsi une relation entre les fortes valeurs de la MES, la turbidité et la vitesse de cisaillement qui sont plus élevées en septembre. Bien que la baisse du niveau d'eau ait été accompagnée par une diminution de la vitesse de cisaillement, l'influence des courants tractifs sur la charge de la décrue n'est pas négligeable.

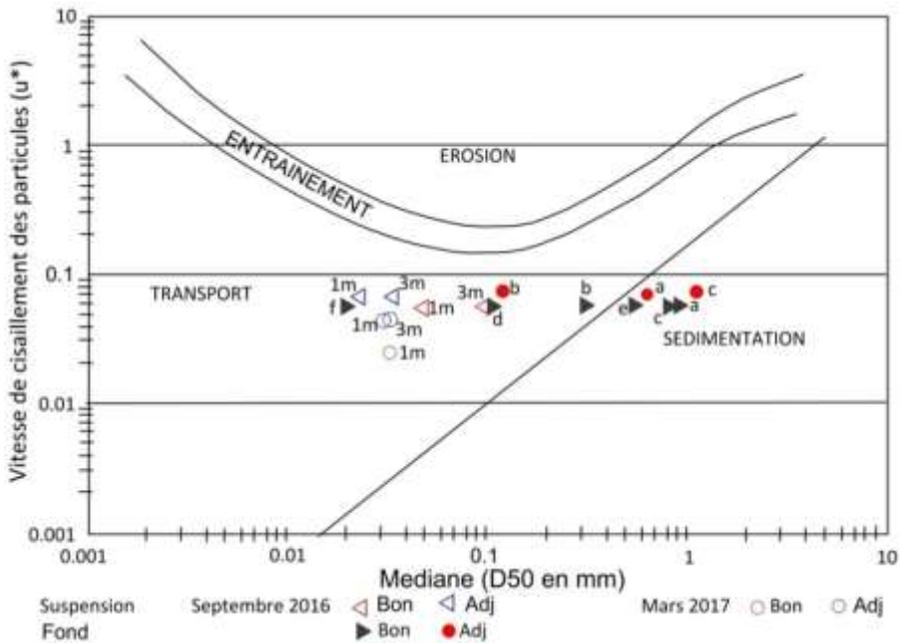


Figure 4 : Positionnement des échantillons de sédiments de fond et ceux en suspension sur le diagramme de Hjulstrôm

Contrainte critique d'entrainement des particules

Le diagramme de Shields (1936) modifié par Soulsby (1997) renseigne que les sédiments Bon-a, Bon-b, Bon-c et Bon-e, Adj-a et Adj-c ont des θ_{cr} compris entre 0,03 et 0,04 (Figure 5). Ils sont proches de l'enveloppe de Shields et ne sont manifestement pas érodés. Il peut y avoir une apparition des tous premiers mouvements mais ces derniers ne sont pas assez pour générer un débit solide à partir de ces dépôts. Les sédiments Bon-d, Bon-f, Adj-b ont des θ_{cr} compris entre 0,07 et 0,2 et se retrouvent soit sur l'enveloppe ou du côté des particules érodées (cas de Adj-b). Ces sédiments en érosion sont susceptibles d'alimenter la charge sédimentaire en transit. Les sédiments en suspension pendant la crue de septembre sont tous en mouvement. La position de ceux piégés en mars 2017 dans la zone non érodée est en contradiction au diagramme de Hjulstrôm. Dans les deux cas, les θ_{cr} sont compris entre 0,08 et 0,17.

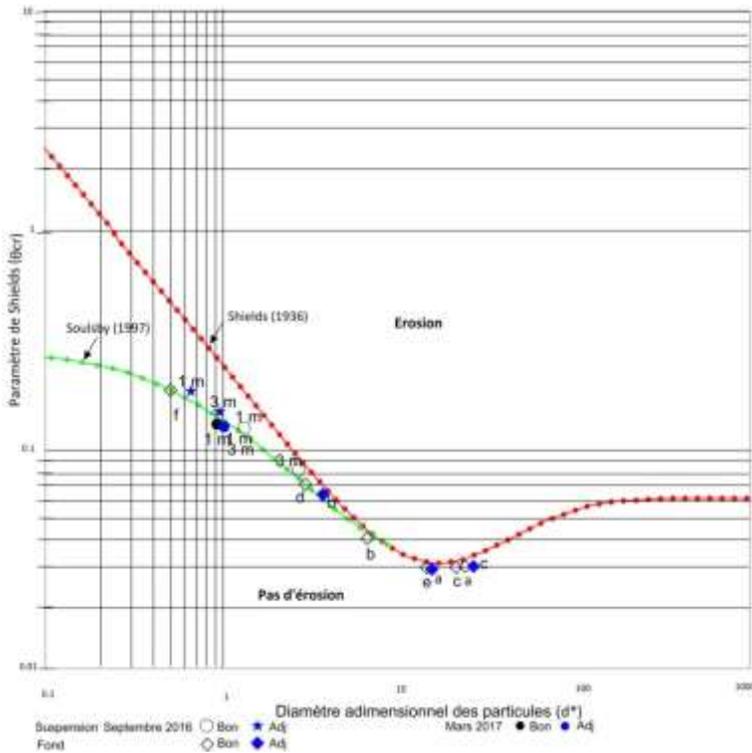


Figure 5 : Positionnement des échantillons de sédiment de l'Ouémé sur le diagramme de Shields modifié par Soulsby (1997)

Facteurs influençant la mise en mouvement des sédiments

Les sédiments Adj-b, Bon-f situés dans la zone d'érosion ont été prélevés sur des rives concaves où les plus fortes vitesses ont été mesurées. Leur localisation sur ces berges est sans doute le reflet de la distribution des vitesses de courant d'eau. La distribution des vitesses d'eau dans un fleuve a montré que les courants de surface les plus rapides ont un angle d'attaque vers la berge concave contrairement aux courants de fond plus lents et orientés tangentiellement vers la berge convexe (Reineck *et al.*, 1973). En outre, la présente étude montre que les sédiments des lits mineurs n'ont pas une importante contribution dans la charge en suspension. Ce constat rejoint les travaux de Ferguson et Rennie (2017) à Ontario et Québec (Canada) qui ont montré que, en section transversale, l'ajustement d'un chenal à substratum sédimentaire est réalisé grâce à l'érosion latérale des berges et non du fond. Les sédiments de l'Ouémé situés dans la zone d'érosion ont des valeurs de Shields θ_{cr} de 0,07 et 0,2. Ces

valeurs critiques sont au-delà des limites de 0,03 définies à partir des échantillons de cours d'eau de faible stabilité et où la pente est de 0,1 (Bunte *et al.*, 2013). Les présentes valeurs de Shields se rapprochent mieux de la gamme comprise entre 0,03 et 0,5 révélée par Zimmermann *et al.* (2010) ; Comiti *et al.* (2012). En se référant aux conclusions (Bunte *et al.*, 2013) qui stipulent que les valeurs de Shields sont proportionnelles à la pente du lit du cours d'eau, on s'attend aux θ_{cr} du fleuve Ouémé (où la pente du secteur étudié est de 0,045) plus inférieures à celles établies par ces auteurs. La présente étude n'a pas permis de mieux élucider l'influence des facteurs influençant le θ_{cr} , mais il est très probable que des facteurs locaux aient influencé θ_{cr} . Un facteur auquel s'accordent tous ces auteurs est lié à la diversité des méthodes de calcul, des méthodes expérimentales et de terrain. D'autres auteurs ont signalé l'influence de la diagenèse des particules (Bathurst, 2013), la forme des grains (Martin, 2003), la morphologie des rivières (Church *et al.*, 2015).

Puissances spécifiques

Pendant la crue de septembre 2016, les puissances spécifiques de l'Ouémé ont une moyenne de $3,59 \text{ W.m}^{-2}$ à Bonou contre $5,08 \text{ W.m}^{-2}$ à Adjohoun. Une forte corrélation linéaire positive est établie entre la contrainte tangentielle exercée par la colonne d'eau sur les parois (τ) et la puissance spécifique ($r = 0.93$). L'Ouémé à la hauteur de Adjohoun affiche une compétition plus élevée pour le transport de la charge solide, bien que le débit liquide soit en dessous de celui mesuré à Bonou. La forte corrélation qui a été ainsi notée entre la puissance spécifique et la MES ($r = 0.92$), exprime les concentrations plus élevées de MES (97 mg/l) à Adjohoun pendant cette période de l'année. En termes de la capacité érosive, la contrainte tractrice τ de l'Ouémé est en moyenne $3,57 \text{ N.m}^{-2}$ à Bonou et $4,18 \text{ N.m}^{-2}$ à Adjohoun. Une comparaison avec d'autres cours du monde montre la faible capacité érosive de l'Ouémé. C'est l'exemple du fleuve Malekhu Kholu au Népal dans l'Himalaya dont les contraintes tractrices sont de l'ordre de 0,153 et 0,629 KN.m^{-2} (Tamang *et al.*, 2015). Ces valeurs ont été interprétées comme influencées par la pente et le modèle du cours d'eau.

Estimation des flux solides

Les flux solides par section ont été évalués en multipliant la concentration moyenne des matières en suspension dans l'eau par le débit liquide. Dans la colonne des trois mètres 46,292 Kg/s de sédiments passent à la hauteur de Bonou et 55,5719 Kg/s en ressortent. Ce gain s'explique par une légère augmentation de la vitesse de cisaillement u^* qui passe de 0,0597 (Bonou) à

0,0647 (Adjohoun). Les flux solides lors des mesures de terrains ont été 46,292 Kg/s à la hauteur de Bonou et 55,5719 Kg/s à Adjohoun. Ces présentes estimations sont inférieures à celle évaluée à 106 kg/s le 29 August 1966 à la hauteur de Adjohoun (Colombani *et al.*, 1972). Le contexte climatique humide qui a caractérisé la période de 1950-1970 (Zannou *et al.*, 2011) semble avoir été favorable à la dégradation des roches en amont et à la prolifération des plantes avec un apport important de particules organiques et minérales vers Adjohoun. Bien que les présentes valeurs soient plus basses, elles pourraient l'être d'avantage, si les effets de remise en suspension sont énormes pendant les mesures de terrain. Les remises en suspension du fond sont possibles lors du déplacement de la pirogue motorisée sur l'eau et pendant le prélèvement des eaux par le contact du plongeur avec le fond.

CONCLUSION

La qualité physique des eaux de l'Ouémé est étroitement liée à son hydrodynamisme. Les eaux sont chargées en MES et sont plus troubles en période de crue que pendant la période de décrue. Par contre la conductivité et les TDS sont bas pendant la crue mais augmente en période de décrue. L'implication de l'hydrodynamisme actuel du fleuve Ouémé sur les processus sédimentaires montre que certains sédiments nouvellement déposés sont susceptibles d'alimenter la charge en suspension tout comme ceux en cours de transit. Le processus de la remise en suspension des dépôts et donc de l'érosion des berges s'est exprimé par un surplus ou une augmentation du flux solide entre Bonou en amont et Adjohoun à l'aval. Cette augmentation du flux à la sortie de Adjohoun devra contribuer au volume de matériaux qui parviennent au nord du lac Nokoué et qui progressivement le comblent.

RÉFÉRENCES

- ATTO YAPI D.S.R, KOUAME AKA F., AKA N., MONDE S., AKA K. (2016). Hydrologie et qualité environnementale des eaux de la retenue d'Adaou (Abengourou, Côte d'Ivoire), BIOTERRE, revue internationale des sciences de la vie et de la terre, Vol. 16, Issue 0, pp.7-20.
- BAGNOLD R.A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. *U.S.*, Geological Survey Professional Paper, Vol. 422, Issue 1, pp.1-37.
- BATHURST J.C. (2013). Critical conditions for particle motion in coarse bed materials of nonuniform size distribution, *Geomorphology*, Vol.197, Issue 1, pp.170-184.

- BRAVARD J.P., PETIT F. (1997). Les cours d'eau, dynamique du système fluvial, Armand Collin / masson, Paris, 222p.
- BUNTE K., ABT, S.R., SWINGLE K.W., CENDERELLI D.A., SCHNEIDER, J. M. (2013). Critical Shields values in coarse-bedded steep streams, *Water Resources Research*, Vol. 49, Issue 11, pp. 7427–7447.
- CAPO M.S. (2006). Hydrodynamique et dynamique sédimentaire en milieu tropical de mangrove, Observations et modélisation de l'estuaire du Konkouré, République de Guinée, Thèse de Doctorat, Géologie Marine, Océanographie, Université Bordeaux I, France, 260 p.
- CHURCH M., FERGUSON R.I. (2015). Morphodynamics: Rivers beyond steady state, *Water Resources Research*, Issue 4, Vol.51, pp. 1883–1897.
- COLOMBANI J., SIRCOULON J., MONIOD F. et RODIER J. (1972). Monographie du delta de l'Ouémé, Rapport ORSTOM, Service hydrologie, Paris, Inédit, 488 p.
- COMITI F., and MAO L. (2012). Recent advances in the dynamics of steep channels, in *Gravel Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, edited by CHURCH M., BIRON P.M., and ROY A.G., WILEY J., HOBOKEN, N. J; Chapter 26, pp.353–377.
- DIRECTION GENERALE des RESSOURCES en EAU. (2015). Rapport de mission de jaugeages dans le bassin de l'Ouémé (Zone sud). Projet SAP-Bénin, 6 p.
- FERGUSON S.P., RENNIE C.D. (2017). Influence of alluvial cover and lithology on the adjustment characteristics of semi-alluvial bedrock channels, *Geomorphology*, Vol. 285, Issue 1, pp. 260–271.
- FILIZOLA N. (2003). Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III - Paul Sabatier U.F.R. Sciences de la Vie et de la Terre, France, 283p.
- GUO H.-D., ZHANG L., ZHU L.-W. (2015). Earth observation big data for climate change research, *Advances in Climate Change Research*, Vol. 6, Issue 2, pp.108-117.
- HJULSTRÖM F. (1935). Studies in the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris, *Bulletin of the Geological Institute of Uppsala*, Vol.25, Serie A, N°10, pp. 221-527.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL on CLIMATE CHANGE. (2014). *Climate Change .2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 169 p.*
- LAIBI R.A. (2011). Evolution Quaternaire et dynamique sédimentaire actuelle des cordons barrières de l'estuaire du Mono-Couffo dans le littoral du Bénin (Golfe de Guinée, Afrique de l'Ouest), Thèse de doctorat, UAC, Bénin/ ULCO, France, 307 p.

- LE BARBE L., ALE G., MILLET B., TEXIER H.Y., BOREL Y., GUALDE R. (1993). Les ressources en eaux superficielles de la république du Bénin. *ORSTOM*, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, collection monographies hydrologiques n° 11, Paris, 453 p.
- MARTIN Y. (2003). Evaluation of bed load transport formulae using field evidence from the Vedder River, British Columbia, *Geomorphology*, Vol. 53, Issues 1-2, pp. 75–95.
- MERGHEM K.A., EL HALOUANI H., ALNEDHARY A.A., DSSOULI K., GHARIBI E., ALANSI R.Q., AL NAHMI. (2016). Etude de l'impact des rejets d'eaux usées brutes et épurées sur la qualité de l'Oued Bani Houat (Bassin de Sanaa) : Etude spatio-temporelle, *Journal of Materials and Environmental Science*, Vol 7, Issue 5, pp.1516-1530.
- MONIOD F. (1973). Régime hydrologique de l'Ouémé (Dahomey), Cahier O.R.S.T.O.M., série Hydrologie, Vol. X, 171 p.
- OYEDE L.M. (1991). Dynamique sédimentaire actuelle et messages enregistrés dans les séquences quaternaires et néogène du domaine margino-littoral du Bénin (Afrique de l'ouest), Thèse de doctorat du troisième cycle, Université de Bourgogne, Dijon, France, 302p.
- PARKER G., TORO-ESCOBAR C.M., RAMEY M., BECK S. (2003). The effect of floodwater extraction on mountain stream morphology, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, Issue 11, pp.885–895.
- REINECK H.E., SINGH I.B. (1973). *Depositional sedimentary environments*; Springer-Verlag, Berlin, New York, 439 p.
- RESEAU FRANCOPHONE sur l'EAU et l'ASSAINISSEMENT. Available online <http://www.oieau.fr/ReFEA/fiches/An> (6/09/2017).
- RODIER J., LEGUBE B., MERLET N. (2009). *L'analyse de l'eau*, 10ème édition, Dunod, Paris, 78- 1368.
- SHIELDS A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Mitteilunger der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau*, Vol. 26, N° 167, pp 5–24.
- SOULSBY R. (1997). *Dynamics of marine sands*, Thomas Telford Publications, France, 249 p.
- SYSTEME d'EVALUATION de la QUALITE des cours d'EAU (SEQ-Eau). <http://www.ifremer.fr/cycleau/cycleau/reglementation/sequeau.htm#An>
- TAMANG N.B., TAMRAKAR N.K., MAGAR M. and RAUT M. (2015). Fluvial morphology and sediment transport of the Malekhu Khola, Central Nepal Lesser Himalaya, *Bulletin of the Department of Geology*, Vol. 18, pp. 35–48.
- ZANNOU A.B., VODOUNOU K.J.B. (2011). Evolution des crues annuelles liées aux changements climatiques et adaptation des populations de la basse vallée de l'Ouémé. *Mélange Mac*, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 16 p.

ZIMMERMANN A., CHURCH M. and HASSAN M.A. (2010). Step-pool stability: Testing the jammed state hypothesis, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 115, Issue F2, F02008.

REMERCIEMENTS

Ce rapport scientifique est le fruit d'une coopération entre le Département des sciences de la Terre (DST / UAC) et la Fondation Internationale pour la Science (IFS). A travers les résultats mentionnés ci-dessus, nous exprimons nos sincères remerciements et demeurons convaincus que ce partenariat a permis de renforcer les relations et les échanges entre les deux institutions.