



HAL
open science

Evolution sédimentologique et dynamique des charges solides dans l'hydrosystème fluvio-lagunaire du sud-ouest du Bénin

Amoussou Ernest, Totin V S Henri, Kaki Christophe, Houessou Sotelle, Houndénou Constant, Gil Mahe, Marc Lucien, Blivi Adoté Blim

► **To cite this version:**

Amoussou Ernest, Totin V S Henri, Kaki Christophe, Houessou Sotelle, Houndénou Constant, et al.. Evolution sédimentologique et dynamique des charges solides dans l'hydrosystème fluvio-lagunaire du sud-ouest du Bénin. Conférence Internationale sur l'Hydrologie des Grands Bassins Fluviaux de l'Afrique, Oct 2015, Hammamet, Tunisie. hal-02146325

HAL Id: hal-02146325

<https://hal.umontpellier.fr/hal-02146325>

Submitted on 3 Jun 2019

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

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

Evolution sédimentologique et dynamique des charges solides dans l'hydrosystème fluvio-lagunaire du sud-ouest du Bénin

**Amoussou Ernest^{a&b}, Totin V. S. Henri^{a&b}, Kaki Christophe^c, Houessou Sotelle^d,
Houndénou Constant^b, Mahé Gil^e, Oyédé Marc Lucien^c et Blivi Adoté Blim^f**

^a *Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, BP 123 Parakou, Bénin.*
ajernest@yahoo.fr, ernestamoussou@gmail.com, sourouhenri@yahoo.fr

^b *Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin, 03 BP1122 Cotonou (Bénin).* bokomichel@gmail.com

^c *Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences Techniques Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin.*

^d *Chef service environnement, Communauté Electrique du Bénin (CEB), BP 1368 Lomé (Togo).*
shouessou@cebnet.org

^e *IRD, Laboratoire HydroSciences de Montpellier, Université de Montpellier 2, Case courrier MSE, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5-France.* gil.mahe@ird.fr, jean-emmanuel.paturel@ird.fr

^f *Centre de Gestion Intégrée du Littoral et de l'Environnement (CGILE), de l'Université de Lomé en République du Togo, BP 1515 / 60047 Bè, Lomé Togo.* cgileul@gmail.com, bliviadoteblim@gmail.com

Résumé

Les bassins-versants des milieux tropicaux humides sont de plus en plus marqués par une dégradation des terres et des eaux, liée aux multiples activités qu'ils offrent à la population riveraine. L'objectif de cette étude est d'évaluer les superficies de comblement et de creusement des lits et les apports solides au complexe fluvio-lagunaire à partir des charges turbides avant et après la mise en eau barrage de Nangbéto.

Les données de précipitations, débits, MES, turbidité, charges solides, bathymétrie et d'occupation du sol issus des images landsat TM de 1985 et 2000 ont été utilisées. Les données de MES et de turbidité, très peu disponibles ont permis néanmoins d'évaluer les charges solides drainées par les lames d'eau écoulées et précipitées dans le complexe. Le calcul du taux de dénudation et de l'agressivité climatique de Fournier (1962) a permis d'appréhender les effets des précipitations sur l'érosivité des terres. A tout cela s'ajoute l'évaluation bathymétrique du lit de l'hydrosystème pour apprécier la dynamique sédimentaire.

Les résultats montrent que la dégradation du couvert végétal associée aux maxima pluviométriques soutient *a priori* une forte érosivité des sols et donc un fort taux de dénudation. Ainsi, les transports des charges solides de l'amont vers l'aval s'intensifient après la mise en eau du barrage et les dépôts s'opèrent prioritairement dans la partie aval, favorisés par la réduction de la profondeur du système lagunaire. Les plus importantes quantités de MES dans le bassin ne sont enregistrées en moyenne que pendant 8 % du temps des hautes eaux, plus que ne l'avait estimé Fournier (2004) à 5 %. Cette différence pourrait provenir de la taille et aussi du régime pluviométrique du bassin.

Mots clés : *Bénin, complexe fluvio-lagunaire, charges solides, MES, évolution sédimentologique*

Abstract : *Sedimentological and dynamic evolution of sediment loads in the river-lagoon complex south-western Benin*

Watersheds wet tropical environments are increasingly marked by degradation of land and water, related to multiple activities they offer to the riparian population. This anarchic occupation facilitated high erodibility of land and by corollary high turbidity of water courses and water bodies and therefore a reduction in the depth of the bed of the river-lagoon complex. The objective of this study is to evaluate the filling areas and digging beds and solid contributions to

river-lagoon complex from turbid expenses before and after the impoundment dam Nangbéto because it plays a role significant changes in terrigenous flows.

The data are rainfall, flow rates, TSS, turbidity, sediment loading, bathymetry, land use land cover Landsat TM 1985 and 2000. TSS and turbidity of existing water, little masters available nevertheless assessed the sediment loads of water drained by the blades passed and precipitated in the complex. Bathymetry in turn, allows to analyze the evolution of complex sedimentological. The calculation of denudation rates and the climate of aggression Fournier (1962) allows also enjoy the effects of precipitation on land erosivity. To all this is added the field observation data. The results show that the degradation of the vegetation cover combined with maximum rainfall supports a priori a strong erosive soils and thus a high rate of denudation. Thus, transport of sediment loads from upstream to downstream intensified after the impoundment of the dam and deposits primarily operate in the downstream part, favored by reducing the depth of the lagoon system. Increased sediment loads to the bottom surface as late March, which is the beginning of the rainy season in the subequatorial area is recorded. The largest amounts of MES in the basin are recorded on average for 8% of the time of high water, more than previously estimated Fournier (2004) to 5%. This difference could be due to the size and also the rainfall regime in the basin river.

Keywords: Benin, river-lagoon complex, solid fillers, MES, sedimentological changes

1. Introduction

La dynamique sédimentaire d'un cours d'eau est régie par leur comportement hydrologique et de leur lobe deltaïque (Rey, 2010). Lorsque l'équilibre entre apports fluviaux et progradation littorale est rompu, le système deltaïque s'ajuste et se renouvelle notamment par le biais des avulsions, qui sont un élément essentiel dans la construction des deltas (Fisk, 1952 ; Smith *et al.*,

1989; Roberts, 1997; Stouthamer & Berendsen, 2000). Mais, le changement du régime hydrologique et sédimentologique due à la construction des grands barrages hydroélectriques bouleverse constamment la dynamique des charges solides des hydrosystèmes comme c'est le cas dans le complexe fluvio-lagunaire du sud-ouest du Bénin.

Le bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire a subi les effets de plusieurs facteurs de changements importants telles que la construction du barrage de Nangbéto en 1985, les variations pluviométriques sensibles (forte récession pluviométrique suivie d'une légère reprise des pluies) ; enfin l'accentuation de la pression anthropique. L'augmentation pluviométrique des années 1990 a entraîné un écoulement à la hausse et le débit d'étiage du Mono a été soutenu par les lâchers d'eau du barrage (Rossi, 1996 ; Blivi, 2000 ; Amoussou *et al.*, 2012 ; Amoussou *et al.*, 2014). Cette variation pluvio-hydrologique couplée avec la dégradation continue du couvert végétal accentuent le volume des lames d'eau ruisselée et l'érodibilité des sols. A cet effet, l'objectif de cette étude est d'analyser les facteurs pluviohydrologiques et d'occupation des terres dans l'évolution des charges sédimentaires afin d'évaluer les superficies de comblement et de creusement des lits et les apports solides au complexe fluvio-lagunaire à partir des charges turbides avant et après la mise en eau barrage de Nangbéto.

Le complexe fluvio-lagunaire, situé dans la région du golfe de Guinée est partagé entre le Bénin et le Togo et dont les parties hautes et moyennes du bassin sont en grande partie sur le territoire togolais (figure 1). Il s'étend précisément entre 06°16' et 09°20'N et 0°42' et 2°25'E avec une superficie de 27 870 km². Ce complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo regroupe les sous-bassins-versants du Mono et du Couffo et le système lagunaire constitué de la lagune côtière, du chenal Ahô et le lac Ahémé. Dans ce système, existent d'importants échanges lagune-mer, par l'intermédiaire de la « Bouche du Roi ». Le bassin porte le fleuve Mono sur 560 km avant d'aboutir à l'océan Atlantique par le biais du système lagunaire (Amoussou, 2010).

Figure 1 : Situation du complexe fluvio-lagunaire du sud-ouest du Bénin

Le bassin-versant comporte un bassin sédimentaire côtier au sud, modelé en plaine littorale et plateaux et des plus hauts reliefs au nord comprenant les monts Atacora et leurs prolongements méridionaux, les monts du Togo (Klassou, 1996 ; Amoussou, 2010). Trois grandes unités morphologiques sont identifiées sur le bassin versant du complexe Mono-Ahémé-Couffo : le bassin sédimentaire côtier, les unités internes des Dahoméyides et la chaîne de l'Atacora/monts du Togo où les fleuves Mono et Couffo prennent leur source, qui ne sont pas sans conséquence sur la dynamique sédimentaire du bassin.

A l'échelle régionale, de nombreuses études ont montré que les précipitations au Togo-Bénin sont contraintes par l'organisation de la circulation atmosphérique ouest-africaine dans son ensemble, à la fois celle des basses couches et celles de moyenne et haute atmosphère. Ainsi, la convergence des flux d'humidité au niveau des basses pressions équatoriales ou équateur météorologique (EM) marque le fondement de la climatologie ouest-africaine. Mais, à l'échelle locale du bassin du complexe Mono-Ahémé-Couffo, les lames d'eau précipitées dépendent fortement des gradients d'énergie entre la plaine côtière et le golfe de Guinée ou encore entre les reliefs du nord-ouest et les zones plus basses (Amoussou, 2010 ; Amoussou *et al.*, 2012). C'est ce qui influence la variabilité spatio-temporelle des lames d'eau précipitées. Ainsi, le complexe est sous l'influence de deux domaines climatiques : le domaine subéquatorial et le domaine tropical humide (figure 2) caractérisés par trois types de régime (figure 3). Cette figure 3 présente les deux régimes bimodaux et le seul régime unimodal qui gouvernent le complexe.

Figure 2 : Cartographie des différents domaines climatiques du bassin (*source* : Amoussou, 2010).

Figure 3 : Classification hiérarchique ascendante des précipitations de 1961-2000 des stations du bassin-versant du complexe en trois types de classes (*source* : Amoussou, 2010)

2. Données et méthodes

Les données utilisées sont : les précipitations régionalisées du bassin-versant du complexe (Amoussou, 2010), les débits, les MES, la turbidité des eaux, les charges solides et la bathymétrie (2002-2006/1991-1999). Les données de MES et de turbidité, très peu disponibles ont permis néanmoins d'évaluer les charges solides drainées par les lames d'eau écoulées et précipitées dans le complexe. La période d'étude (1961-2010) est très peu documentée en ce qui concerne les données de charges solides. Ainsi, les seules données journalières de MES et de TSS, disponibles en 1966 et 1967 (Colombani, 1967a et 1967b) et en 1999 (Roche International, 1999), sachant toutefois que ce sont des années hydrologiquement humides qui ont enregistré des débits maxima respectivement en septembre et en octobre.

Le calcul de l'agressivité climatique de Fournier (1962) et du taux de dénudation a permis d'analyser les effets des précipitations sur l'érosivité des terres. A tout cela s'ajoute l'analyse de l'évolution du couvert végétal à partir des cartes d'occupation de 1985 et 2000 obtenues des images Landsat TM 1985 et 2000 (Amoussou, 2010). Sur la base des données pluviométriques mensuelles, une estimation à partir des indices d'agressivité climatique de Fournier (1962) cité par Lamouroux (1969), Gnongbo (1996) et Amoussou (2010) est faite, afin de déterminer la

capacité érosive du climat. L'équation donne $F = \frac{P^2}{P}$, avec p , la pluviométrie mensuelle la plus élevée, et P , la moyenne pluviométrique annuelle. Les données calculées sur les trente-deux (32) stations ont été krigées sous le logiciel Sufer 8.1 pour cartographier l'agressivité érosive de l'hydrosystème Mono-Ahémé-Couffo.

Le calcul du taux de dénudation (D), exprimé en t.km².an⁻¹, s'écrit :

$$D = \frac{C_{MES} \times Q}{S} \times 31536 \quad \text{avec } C_{MES} : \text{concentration ou turbidité (g/l), } Q = \text{débit liquide (m}^3/\text{s) et}$$

S : la superficie (km²) du bassin-versant.

Ces variables permettent d'évaluer approximativement à partir du débit liquide et des concentrations de matières en suspension (MES), les charges solides transitant dans l'hydrosystème. L'analyse bathymétrique permet de confirmer la dynamique sédimentaire du fond du lit suite aux différents facteurs physiques et humains qui impactent le système lagunaire.

3. Résultats et discussion

3.1. Evolution des précipitations dans le complexe

Les moyennes annuelles de précipitations varient dans l'espace ; elles oscillent de 876 à 1 600 mm. Elles diminuent légèrement du nord au sud du bassin (4). Cette répartition est plus accentuée au nord-ouest et pourrait s'expliquer par les effets orographiques car les sommets varient ici entre 300 et 960 m, alors qu'au sud les altitudes varient de 5 à 150 m (Amoussou, 2010). Ainsi, dans les secteurs du bassin dominés par le mont Atacora/monts du Togo (nord-ouest) et par les collines de Kouma-Konda (centre-ouest) par exemple, les précipitations sont les plus abondantes (Amoussou, 2010). Ces reliefs élevés jouent un rôle d'amplificateur de la pluviogenèse, car les vents océaniques, chargés de vapeur d'eau, déversent leur humidité en abordant ces reliefs et créent ainsi un gradient vertical de précipitations (Amoussou *et al.*, 2012).

Figure 4 : Précipitations moyennes annuelles (1961-2000) sur le bassin-versant du Mono-Ahémé-Couffo.

Source : Amoussou (2010)

Sur la côte, on observe une diminution pluviométrique d'est en ouest, comme l'ont déjà montré de nombreux chercheurs (Boko, 1975 et 1988 ; Bokonon-Ganta, 1987 ; Klassou, 1996 ; Houndénou, 1999 ; Amoussou *et al.*, 2012).

L'évolution interannuelle des pluies moyennes représentée par la figure 5 présente une légère baisse sur la période 1961-2000. Cette baisse est relative d'une décennie à l'autre. Ainsi, on observe une évolution pluviométrique à la baisse nette à partir de 1970 suivie d'une légère augmentation à la fin des années 1990 comme l'avaient déjà souligné Amoussou *et al.* (2012 et 2014). Cette légère reprise des précipitations a été marquée par des inondations récurrentes des années 1999, 2007, 2009 et 2010 dans le bassin (Becuwe, 2005 ; Amoussou *et al.*, 2011 ; Houndénou *et al.*, 2011 ; Amoussou *et al.*, 2013).

Figure 5: Variabilité des précipitations journalières du bassin-versant du Mono-Ahémé-Couffo de 1961 à 2010

Cette baisse des précipitations depuis les années 1970 s'est poursuivie en s'amplifiant au début de la décennie 1980, avec des sécheresses sensibles, surtout de 1982 à 1987. Les anomalies standardisées positives sont observées majoritairement avant les années 1970 (1962, 1963, 1966, 1967, 1968) et après 1990 (1991, 1995, 1999) comme l'a signalé Amoussou (2010). La dominance des anomalies négatives entre 1970 et 1990 traduit la péjoration climatique qui a alors affecté la région (Houndénou, 1999).

Toutefois, la variation des lames d'eau précipitées dans le bassin ne présente aucune persistance d'une année à l'autre, et une année arrosée n'est pas forcément suivie par une année excédentaire. Cette baisse des précipitations plus marquée au sud s'explique par la réduction manifeste de la petite saison pluvieuse en milieu béninien (Houndénou, 1999) et par une tendance, certaines

années, à l'unification des deux saisons pluviométriques. Ainsi, selon Houndénou (1999), le régime subéquatorial tend à se transformer lentement pour être remplacé par un régime de type soudanien dans la mesure où on ne note plus de transition pluviométrique. Toutefois, la dynamique sédimentaire est l'action conjuguée des lames d'eau écoulées dépendant des précipitations et de l'état du couvert végétal.

3.2. Analyse de l'état des couvertures végétales

La figure 6, réalisée à partir des images satellitales LANDSAT TM de 1985 et 2000 à l'échelle de 1/100 000e, obtenue au CENATEL, présente les cartes d'occupation du sol de 1985 et 2000.

Figure 6 : État d'occupation du sol dans le bassin-versant de l'hydrosystème Mono-Ahémé-Couffo de 1985 et 2000
(*Source : Amoussou, 2010*)

De l'analyse comparée des deux cartes d'occupation des sols de 1985 et 2000 (figure 6), il ressort qu'une forte pression humaine s'exerce sur les écosystèmes et en particulier sur les formations végétales du bassin. Ainsi, les superficies occupées par les forêts-galeries et les forêts denses ont connu une diminution. Elles passent de 5 % en 1985 à 4 % en 2000, soit une évolution de -11 % entre 1985 et 2000. De même, la forêt claire et les savanes boisées, arborées et arbustives ont vu leur superficie diminuée de 13 % entre 1985 et 2000.

Entre 1985 et 2000, la régression des formations naturelles est plus marquée, liée à l'augmentation de 83 % (Mono), 112 % (Couffo) et 91 % (lagunaire) des superficies construites. Les besoins de la population s'accroissent avec la régression des formations naturelles. Cette réduction de la couverture végétale naturelle, due à la récession pluviométrique (pour la première période) et à l'emprise humaine conduit à une « savanisation », amplifie les effets érosifs, le

ruissellement et les apports de charges solides dans le lit des cours d'eau du complexe (Amoussou, 2010). Ceci est renforcé par des pratiques agricoles (culture itinérante sur brûlis, défrichage, dessouchement, billons perpendiculaires aux cours d'eau) susceptibles d'augmenter le ruissellement (qui subit déjà l'effet de légère reprise pluviométrique des années 1990) et le charriage des sédiments dans le lit.

En revanche, entre 1985 et 2000, les plans d'eau de ces sous-bassins ont diminué : de 4 % aux plans d'eau du Mono et de 6 % pour ceux du système lagunaire. On est alors plutôt dans un contexte d'augmentation de température, de forte évaporation malgré la reprise pluviométrique des années 1990 et le comblement partiel par les sédiments peut aussi avoir joué un rôle avec un système d'érosion stimulé par le ruissellement superficiel et favorisé par une forte emprise humaine (Amoussou, 2010).

Cette évolution régressive du couvert végétal serait liée à l'augmentation de la population et à la reconversion des pêcheurs en agriculteurs pour la production cotonnière et alimentaire, surtout dans le cours inférieur du bassin. Ces pratiques sont autant de valeurs qui ont modifié le paysage de la partie sud du bassin et rendent ainsi le milieu vulnérable au ruissellement et à l'érosion.

3.3. Agressivité climatique dans le bassin versant de l'hydrosystème

La variation des précipitations dans le bassin et l'existence de séquences pluvieuses intenses modulent la sédimentation (Rey, 2010 ; Amoussou, 2010). Avec la légère reprise pluviométrique des années 1990, la dégradation du couvert végétal constatée sur la période 1985-2000 et l'augmentation des lames d'eau ruisselée, les pertes de terre n'ont pu que s'accroître. Mais, elles varient dans l'espace et dépendent de la structure et texture des sols.

La figure 7 présente une carte d'indice d'agressivité climatique spatialisé de 1961-2010 sur l'hydrosystème calculé en pourcentage à partir de la formule de Fournier (1962) repris par Gnongbo (1996) et Amoussou (2010).

Figure 7: Indice d'agressivité climatique du bassin-versant calculé en pourcentage à partir de la formule de Fournier (1962). Moyenne de 1961 à 2010.

Il ressort de l'analyse que dans la zone littorale du bassin, l'agressivité climatique est plus forte que dans les autres parties (figure 7). Cette forte agressivité (plus de 50 %) au sud du bassin montre l'importance des maxima pluviométriques de juin. Cette intensité de pluie, en absence de couvert végétal (mangrove menacée), occasionne un charriage des sédiments dans le plan d'eau (Domingo, 1996 ; Amoussou *et al.*, 2007). Dans les autres secteurs du bassin, en plus de la régression soutenue des formations végétales naturelles et de la dégradation des terres suite aux techniques agricoles traditionnelles, s'ajoute localement les fortes pentes. Ces facteurs associés aux maxima pluviométriques soutiennent *a priori* une forte érosivité des sols et donc un fort taux de dénudation. Ainsi, les transports des charges solides de l'amont vers l'aval s'intensifient et les dépôts s'opèrent prioritairement dans la partie aval, favorisés par la réduction de la profondeur du système lagunaire. Les résultats du calcul d'indice agressivité donnés par la figure 7 dans le l'hydrosystème Mono-Ahémé-Couffo sont conformes à ceux obtenus par Amoussou (2010) sur la période 1961-2000, par Gnongbo (1996) pour le Togo méridional, par Azontondé (1981) pour le Bénin en général et Fournier (1960, 1962, 1969) pour le Togo et la Côte d'Ivoire.

3.4. Taux de dénudation

Dans le cas de cette étude, les données des années 1966-1967 sont considérées comme celles des années avant la mise en eau du barrage et celle de l'année 1999, celle après le barrage. Le taux de dénudation avant et après la mise en eau du barrage est déterminé à partir de la turbidité de l'eau, ce qui permet d'avoir une idée des pertes de terre par érosion dans le bassin. Le tableau 1 montre que le taux de dénudation est plus élevé dans le système lagunaire après la construction du barrage ($43 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$), du fait de l'érosion accrue des berges et de la dégradation du couvert végétal au cours des années 1990.

Tableau 1 : Évaluation du taux de dénudation de la période concernée dans le bassin-versant du complexe

L'augmentation du fort taux de dénudation entre 1966-1967 et 1999 montre que deux tiers environ des apports sont enregistrés au cours des périodes de hautes eaux. Ainsi, de juin à octobre 1966, le taux est de $71 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ contre $0,19 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ du 1^{er} novembre 1966 au 20 février 1967 (Amoussou, 2010). Dans le sous-bassin du Couffo, le taux de dénudation est comparativement très faible ($2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$), ce qui est à l'origine de son faible apport spécifique à l'exutoire. Ceci est aussi lié à la distance existant entre la station de Lanta et son exutoire Couffonou, une distance importante, avec un lit de forme sinueuse et un courant faible. Ces résultats confirment ceux de Oyédé (1991) et Amoussou (2010), qui soulignent que les particules drainées par le cours du Couffo ne se retrouvent pas à l'exutoire.

Le figure 8, quant à elle montre l'évolution journalière des charges solides (mesurées par les TSS) et des MES dans le bassin versant de l'hydrosystème avant et après la mise en eau du

barrage hydroélectrique de Nangbéto. Les plus forts débits solides (TSS) sont enregistrés logiquement pendant la période des débits maxima à l'état naturel (figure 8). Après la mise en eau du barrage, on assiste à une évolution à la hausse des MES et TSS, même en période d'étiage, car les lâchers d'eau ne cessent d'éroder les berges du cours d'eau et de transporter les particules lors des lâchers de l'amont vers l'aval. Ceci corrobore avec les résultats de Rossi (1996), Amoussou (2010) et Amoussou et al (2012).

Figure 8: Variation des TSS, MES, débits journaliers dans système fluvio-lagunaire d'octobre à décembre 1966 et 1999. (*Source : Colombani, 1967 ; Roche International, 1999 ; Amoussou, 2010*)

Toutefois, la plus importante quantité de TSS mesurée (figure 8) est enregistrée durant le même mois (octobre) que celui des plus forts débits. Ainsi, les plus importantes quantités de TSS dans le bassin avant et après le barrage ne sont enregistrées en moyenne que pendant 8 % du temps de hautes eaux, plus que ne l'avait estimé Fournier (2004) avec 5 %. Cette différence pourrait provenir de la taille du bassin et aussi le fait que le bassin est arrosé par deux domaines climatiques (subéquatorial et tropical humide). Ceci témoigne aussi de la disponibilité en eau dans le bassin et de l'abondance des activités socio-économiques développées.

Le tableau 2 donne la quantité de matières solides apportées d'octobre à décembre 1966 par le Mono, ceux d'octobre à décembre 1999 par le Couffo et ceux enregistrés à Guézin (d'origine diverse). Les apports enregistrés à Guézin en 1999 sont huit fois plus importants que ceux enregistrés à Athiémé en 1966.

Tableau 2 : Apports solides estimés sur trois mois sur la base de mesures de débits solides pour le Mono à Athiémé et le Couffo à Lanta.

Cette différence montre la réelle modification du fonctionnement hydrologique dans le système lagunaire. Ainsi, les apports solides du Mono à Athiéme étaient de 11 434 m³ au cours des trois mois (octobre-décembre) en 1966 et de 87 738,38 m³ à Guézin d'octobre à décembre 1999. Cette augmentation est très forte par rapport aux apports du Couffo qui ne sont en moyenne que de 436,40 m³ en 1999.

L'augmentation de la charge solide en 1999 paraît paradoxale compte tenu du piégeage des sédiments par la retenue de Nangbéto. Cela provient ainsi sans doute du fort taux de dénudation et de la forte érosion des berges et des fonds induite par les forts « courants de chasse » du fleuve Mono juste en aval du barrage ; on peut aussi l'expliquer par l'utilisation des engins prohibés (acadja et xa) pour la pêche et par la mauvaise gestion des ordures ménagères le long des berges dans le système lagunaire. Ces résultats en partie sont conformes à ceux trouvés par Rollet (2007) sur la basse vallée de l'Ain, en ce sens que le bilan sédimentaire est excédentaire dans certains secteurs et par contre déficitaire dans d'autres en aval d'un barrage hydroélectrique au gré des sédiments déposés ou repris. Comme l'a déjà signalé Rossi (1996), on peut ainsi craindre à l'avenir, une érosion des berges, des recoupements des méandres, un recreusement du lit pouvant entraîner l'affouillement des ouvrages (ponts), le comblement de certains secteurs du lit et l'abaissement du niveau des nappes phréatiques comme ce fut le cas, vingt ans après la mise en service, du barrage d'Akossombo en 1963 au Ghana. La capacité érosive va s'accroître vers l'aval et le cordon littoral deviendra plus sensible aux crues et aux ruptures périodiques du littoral entre Grand-Popo et Djondji.

3.5. Impacts de la sédimentation sur l'hydrosystème

Le tableau 3 présente la dynamique sédimentaire du bassin. Il s'agit d'apprécier les secteurs érodés (-), comblés (+) et stables (0) du bassin suite aux facteurs physiques et humains qui gouvernent les flux terrigènes dans le système lagunaire du complexe. La superficie est calculée à

partir de la profondeur (m) et de la largeur mesurée (m) de la section mouillée. Ainsi, la diminution ou l'augmentation de la superficie de section est liée à la profondeur, car d'une année à l'autre selon la même saison, la largeur varie très peu (Amoussou, 2010)

De l'analyse du tableau 3, il ressort une diminution générale de la superficie des sections et, par là, de la profondeur du lit du système entre 2002 et 2006. Toutefois, cette évolution doit être nuancée selon les sites et les périodes.

Tableau 3 : Evolution de la sédimentation en certains secteurs du système lagunaire.

Entre 2002 et 2005, tous les sites de mesures ont connu un rehaussement de leur fond. À Affoglindji, les apports de sédiments ont été très importants entre 2002 et 2005 et plus de deux fois plus importants à Nazoumè entre 2002-2006. De 2005 à 2006, les sites de Gbèzoumè et Gogotinkponmè ont connu un apport non négligeable, alors que Nazoumè a vu sa section inchangée pendant cette période ; Affoglindji a connu un creusement (une érosion) sur une superficie de 16,2 m². Le comblement est plus important à Gbèzoumè qu'à Gogotinkponmè, ce qui pourrait s'expliquer du fait que Gbèzoumè est plus proche du fleuve Mono et peut donc recevoir d'importantes charges solides surtout en période d'inondation. Quant à Gogotinkponmè, il est plus proche de l'exutoire du Couffo qui n'apporte que de faibles quantités de charges solides au système lagunaire.

Il est intéressant de comparer ces résultats avec ceux provenant d'études antérieures. Les données de 1991 et 1999, traitées par Oyédé *et al.* (2007), ont permis par exemple de constater également la diminution des profondeurs dans certains secteurs du lac Ahémé. Ainsi, l'étude comparée des profondeurs entre 1991 et 1999 de quelques secteurs du lac, notamment du nord (Bopa kpindji et

Bopa-Centre) et du sud (Sègbohòuè et Agatogbo) a permis d'observer un comblement (tableau 4) dans les secteurs sud du lac Ahémé, de la rive est à la rive ouest. Au nord du lac, l'auteur a constaté également un relèvement du fond devant Bopa-Centre de 1991 à 1999, avec, conjointement un creusement à Bopa Kindji, surtout sur la rive est.

Tableau 4 : Etat d'évolution de la sédimentation dans certains secteurs du lac Ahémé de 1991 à 1999.

Le sapement permanent des berges est l'un des facteurs de la dégradation continue du système et qui influe sur les processus de sédimentation. Les différentes structures paysagiques (la supraplexion, la métaplexion et la pédoplexion) qui feront l'objet du prochain projet d'article vont permettre d'avoir une connaissance de la nature du milieu-support (géologie, géomorphologie, sol) afin de mieux cerner les dépôts de sédiments et leur origine.

Conclusion

Il ressort de cette étude une baisse des précipitations des années 1961 à 1990 suivie d'une légère reprise à la fin des années 1990. Cette légère reprise des précipitations à la hausse (Amoussou, 2010) associée à la mise en eau du barrage impacte fondamentalement l'écoulement des eaux de surface. La modification du régime du fleuve Mono sous l'effet du barrage ajoutée à la forte dégradation de la formation naturelle au profit des formations anthropiques de 68 % a une forte influence remarquable sur la variation du volume des charges solides (TSS) et donc sur la sédimentation, en particulier dans le système lagunaire. Les apports transités par le fleuve Mono sont largement supérieurs à ceux du fleuve Couffo. Les importants flux terrigènes enregistrés dans le système lagunaire seraient liés non seulement aux apports fluviaux, mais aussi aux activités anthropiques développés dans le chenal Ahô et le lac Ahémé, sur les versants et les

berges. Ainsi, majoritairement on assiste à un comblement du lit de l'hydrosystème justifiant de l'importance des charges solides. Cependant, quelques secteurs restent se recreusent davantage.

Références bibliographiques

Amoussou E., 2010. *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de drologie Doctorat unique, Université de Bourgogne, Dijon, CRC – CNRS- UMR5210, 313 p.

Amoussou E., Boko M., Camberlin P., et Mahé G., 2012. Variation spatio-temporelle des flux sédimentaires dans la basse vallée Mono-Couffo (Golfe de Guinée). In « *Les climats régionaux : observation et modélisation* ». XXVème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Grenoble, France, pp 69-74.

Amoussou E., Camberlin P. et Mahé G., 2012. Impact de la variabilité climatique et du barrage de Nangbéto sur l'hy du système Mono-Couffo au Bénin. *Hydrological Sciences Journal*, Vol.57, Issue 4, pp 805-817.

Amoussou E., Oyédé L. M. et Boko M., 2007. Variabilité pluviométrique et flux de turbidité dans le complexe Chenal Ahô-lac Ahémé au Bénin (Afrique de l'Ouest). Actes du XX ème colloque AIC. In « *Climat, Tourisme et Environnement* » de Carthage, Tunisie, pp 81-86.

Amoussou E., Totin V. S. H., Camberlin P. et Pérard J., 2011. Evénements hydro climatiques et risque d'inondation au sud-ouest du Bénin. In « *Climat Montagnard et Risques* ». XXIV ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Mart-Rovereto, Italie, pp 39-44.

Amoussou E., Totin Vodounon S. H., Trambly Y., Houndénou C., Camberlin P., Houessou S., Mahé G., Oyédé L. M. et Boko M., 2013. Impact de la variabilité pluviométrique et du barrage de Nangbéto sur les écoulements de surface dans la basse vallée Mono-Couffo (Golfe de Guinée). In

« *Climat, Agriculture et Ressources en eau d'hier à demain* ». XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Cotonou, Bénin, pp 63-68.

Amoussou E., Tramblay Y., Totin V. S.H., Mahé G. et Camberlin P., 2014. Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo/Bénin). *Hydrological Sciences Journal*, Volume 59, Issue 11, November 2014, pp 2060-2071

Azontondé H. A., 1981. Synthèse des travaux conduits sur l'érosion hydrique en R.P.B. de 1960 à 1980. *Projet d'Agro-pédologie, Etude 237*, CENAP. Cotonou, 8 p.

Becuwe M., 2005. *Risques hydrologiques et territoire : cas de la lagune de Grand-Popo (Bénin, Afrique de l'Ouest)*. Mémoire de maîtrise, Université Paris I Panthéon Sorbonne, UFR 08 Géographie, 146 p.

Blivi A. B., 2000. Effet du barrage de Nangbéto sur l'évolution du trait de côte : une analyse prévisionnelle sédimentologique. *J. Rech. SCi*; Univ. Bénin (Togo), 4(1), pp 29-41.

Boko M., 1975. *La plaine côtière du Dahomey à l'Ouest de Cotonou*. Thèse de Doctorat de 3ème cycle de Géographie Tropicale, Université de Dijon, 231 p.

Boko M., 1988. *Climats et communautés rurales du Bénin : rythmes climatiques et rythmes de développement*. Thèse d'état ès-lettres. Uni. de Bourgogne. 2 tomes. 608p.

Bokonon-Ganta E., 1987. *Les climats de la région du Golfe du Bénin*. Thèse de 3ème cycle soutenue à Dijon, 250p + Annexes.

Colombani J., 1967a. *Note sur les mesures de transport solide en solution et de qualité des eaux effectuées au Togo de 1965 à 1967*. Centre ORSTOM de Lomé, 37p + annexes.

Colombani J., 1967b. *Note sur les instruments et les méthodes utilisées pour la mesure de débits solides en suspension du Mono au Togo*. Centre ORSTOM de Lomé, 10 p.

Domingo E., 1996. "Pression agricole et risque d'érosion dans le bassin versant du Lomon, affluent du Mono (département du Mono - Bénin)". In « *réseau érosion Bull.* » 16. ORSTOM, Montpellier, pp 181- 194.

Fisk H.N., 1952. *Geological investigation of the Atchafalaya basin and the problem of the Mississippi River Diversion*. Vicksburg, Mississippi, Waterways Experiment Station, 145 p.

Fournier F., 1960. *Climat et érosion*. Thèse de Doctorat, PUF, Paris, 201p.

Fournier F., 1962. Mesure de l'érosion, principes de base et incidence de l'instrumentation nouvelle sur l'établissement des réseaux de mesure. Directeur du Bureau Interafricain des sols. *Président de la commission d'Erosion Continentale de l'AIHS*, 57 rue Cuvier, Paris (5ème), France, pp 343-356.

Fournier F., 1969. L'érosion hydrique et le climat. Bulletin technique d'information. *Météorologie et agriculture*, n° 237, pp 111-115.

Fournier L., 2004. *Modélisation de la production des apports sédimentaires dans le bassin de la Durance*. Mémoire de DEA, LNHE, CRD-EDF, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France 56

Gnongbo T. Y., 1996. *Le Togo méridional: étude de géographie physique*. Thèse de Doctorat de l'Université Bordeaux III. Option géographie tropicale. Institut de Géographie, Louis Papy, Bordeaux, France, 306 p.

Houndénou C., 1999. *Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : L'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon. 390 p.

Houndénou C., Amoussou E. et Boko M., 2011. Analyse des événements hydrocatastrophiques au Bénin en 2009-2010. In « *Climat Montagnard et Risques* ». XXIV ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Mart-Rovereto, Italie, pp 321-326.

Klassou S. D., 1996. *Evolution climato-hydrologique récente et conséquences sur l'environnement : l'exemple du bassin versant du fleuve Mono (Togo-Bénin)*. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux III, 472 p.

Lamouroux M., 1969. *Notice explicative sur la carte pédologique du Togo au 1/1000 000, n° 34*, ORSTOM, Paris.

Oyédé L. M., 1991. *Dynamique sédimentaire actuelle et messages enregistrés dans les séquences quaternaires et néogènes du domaine margino littoral du Bénin (l'Afrique de l'Ouest)*. Thèse présentée pour l'obtention du doctorat en géologie sédimentaire, nouveau régime. Université de Bourgogne, Paris ; 302 p.

Oyédé L. M., Kaki C. et Laïbi R., 2007. Environnement sédimentaire, morphologie et faciès du lac Ahémé dans le complexe lagunaire sud-ouest béninois. *Annales des Sciences agronomiques du Bénin*. Volume 9, Numéro 1, pp 75-98.

Rey T., 2010. Modalités du remblaiement sédimentaire des paléochenaux holocènes identifiés dans la partie occidentale du delta du Rhône (Petite Camargue, France). In *Quaternaire*, 21, (1), pp 101-111.

Roberts H.H., 1997. Dynamics changes of Holocene Mississippi river delta plain : the delta cycle. *Journal of Coastal Research*, 13 (3), pp 605-627.

Roche International, 1999. *Etude de projet d'aménagement des plans d'eau du Sud-Bénin*. Volume III, Tome III. Rapport final, 101 p + annexes.

Rollet A.-J., 2007. *Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain*. Thèse de Doctorat. Université Jean Moulin Lyon 3, France, 305 p.

Rossi G., 1996. L'impact des barrages de la vallée du Mono (Togo-Benin). La gestion de l'incertitude. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Vol 2, n° 2, pp 55-68 (<http://www.persee.fr>).

Smith N.D., Cross T.A., Dufficy J.P. & Clough S.R., 1989. Anatomy of an avulsion. *Sedimentology*, 36 (1), pp1-23.

Stouthamer E. & Berendsen H., 2000. Factors controlling the Holocene avulsion history of the Rhine-Meuse delta (The Netherlands). *Journal of Sedimentary Research*, 5, pp 1051-1064.

Liste des figures

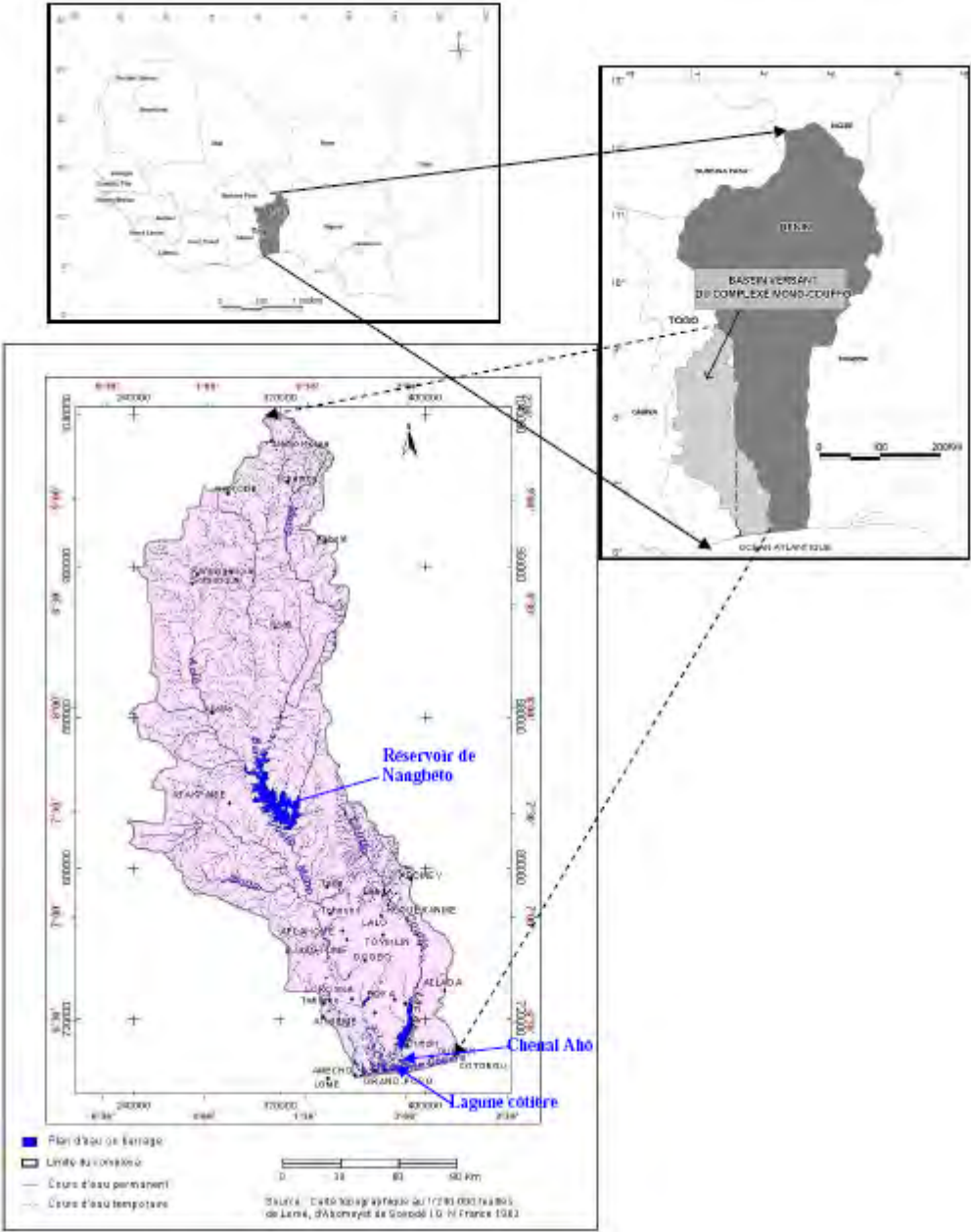


Figure 1 : Situation du complexe fluvio-lagunaire du sud-ouest du Bénin

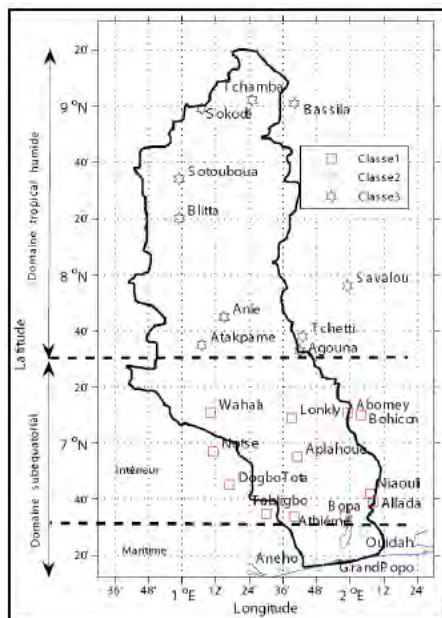


Figure 2 : Cartographie des différents domaines climatiques du bassin (*source : Amoussou, 2010*).

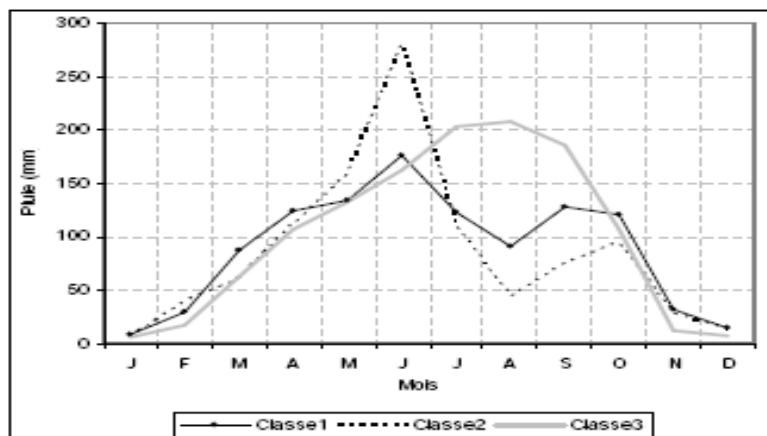


Figure 3 : Classification hiérarchique ascendante des précipitations de 1961-2000 des stations du bassin-versant du complexe en trois types de classes (*source : Amoussou, 2010*).

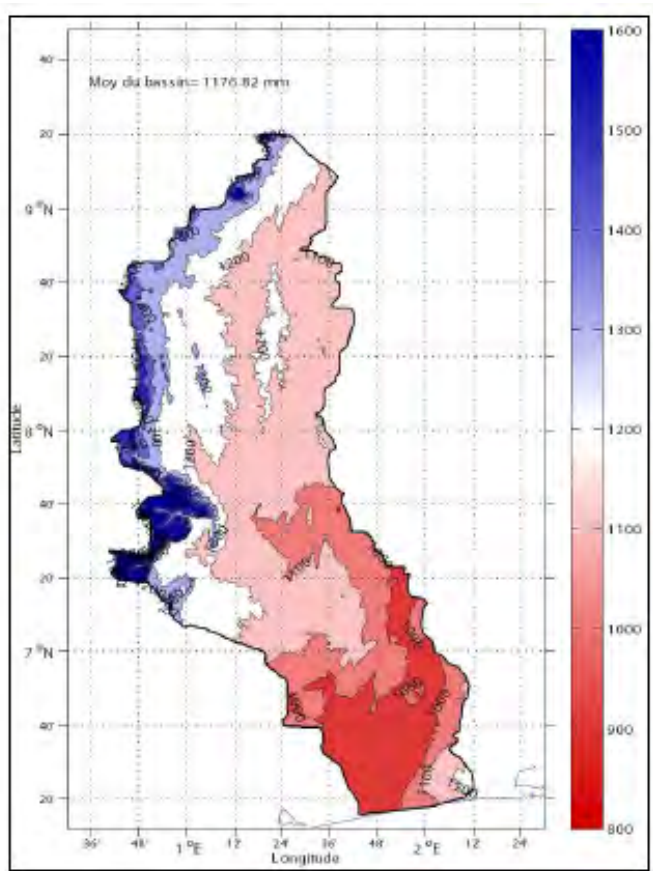


Figure 4 : Précipitations moyennes annuelles (1961-2000) sur le bassin-versant du Mono-Ahémé-Couffo.

Source : Amoussou (2010)

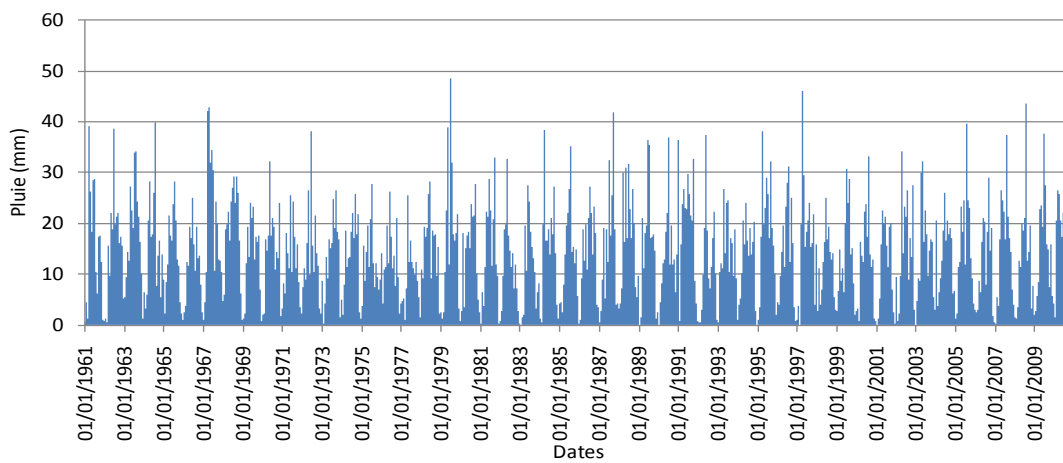


Figure 5: Variabilité des précipitations journalières du bassin-versant du Mono-Ahémé-Couffo de 1961 à 2010

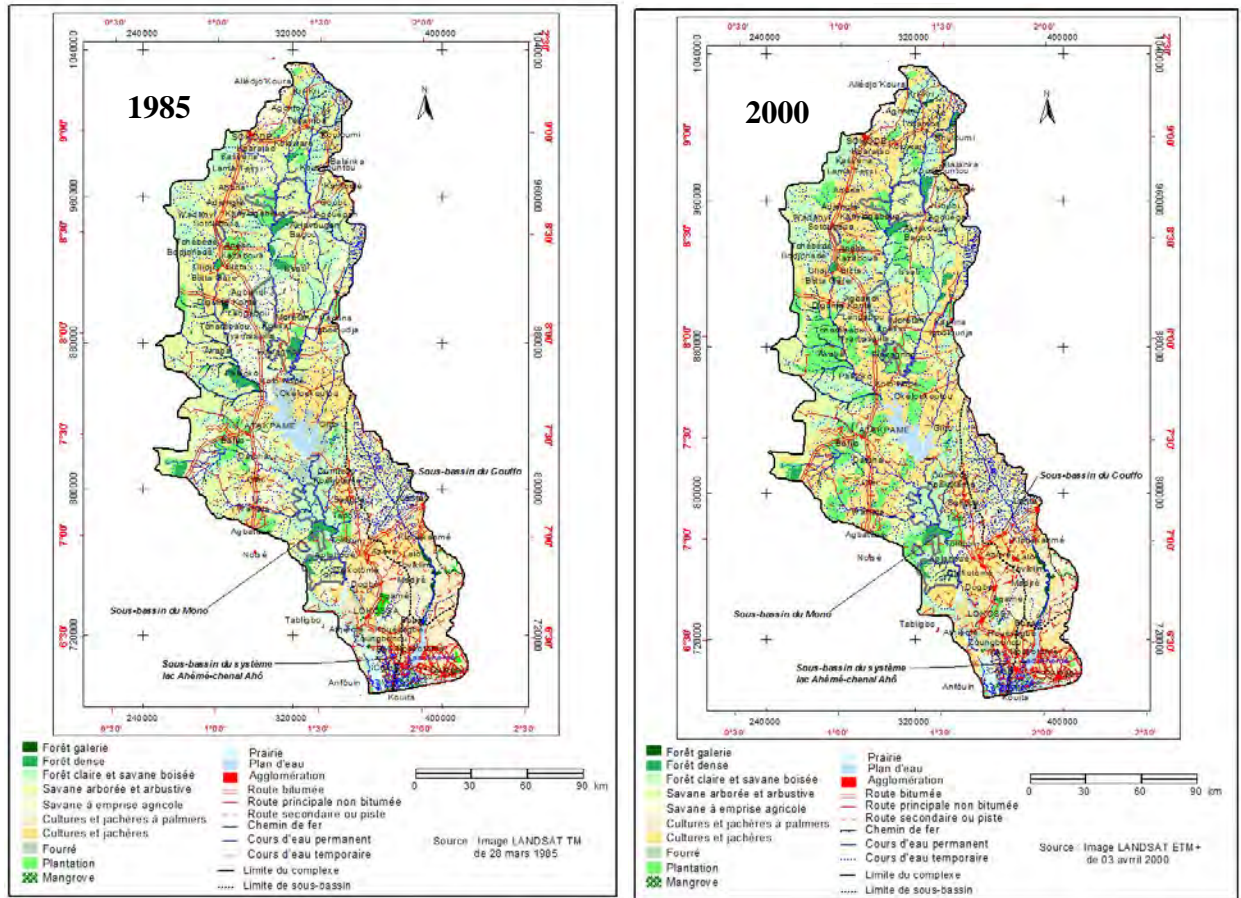


Figure 6 : État d’occupation du sol dans le bassin-versant de l’hydrosystème Mono-Ahémé-Couffo de 1985 et 2000 (*Source : Amoussou, 2010*)

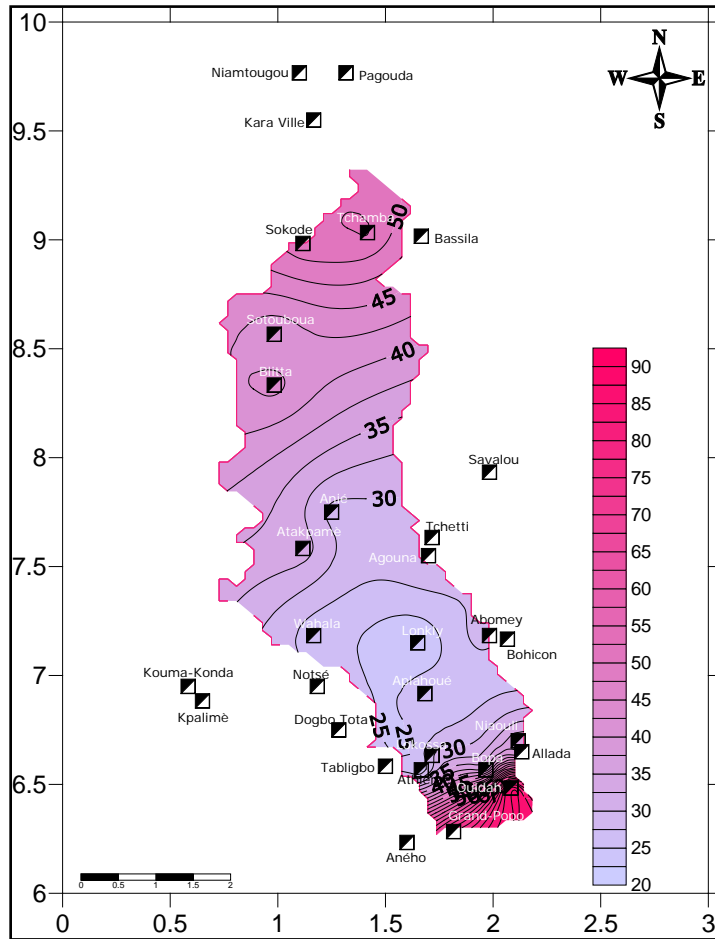
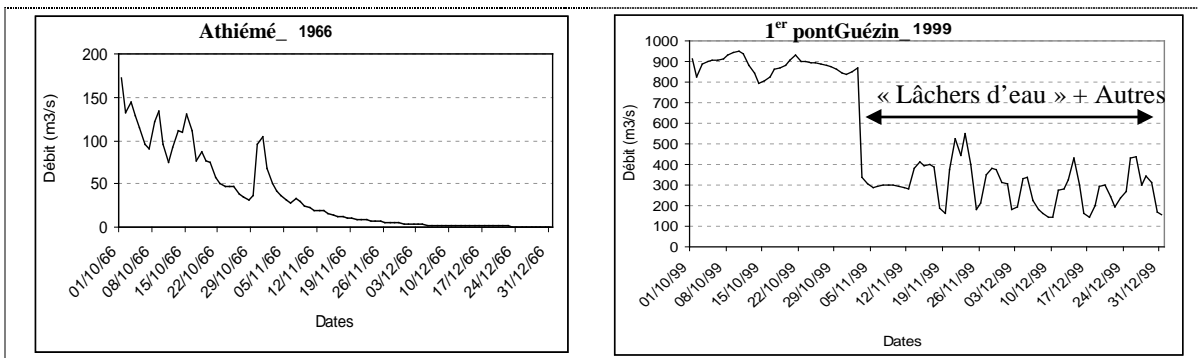


Figure 7: Indice d'agressivité climatique du bassin-versant calculé en pourcentage à partir de la formule de Fournier (1962). Moyenne de 1961 à 2010.



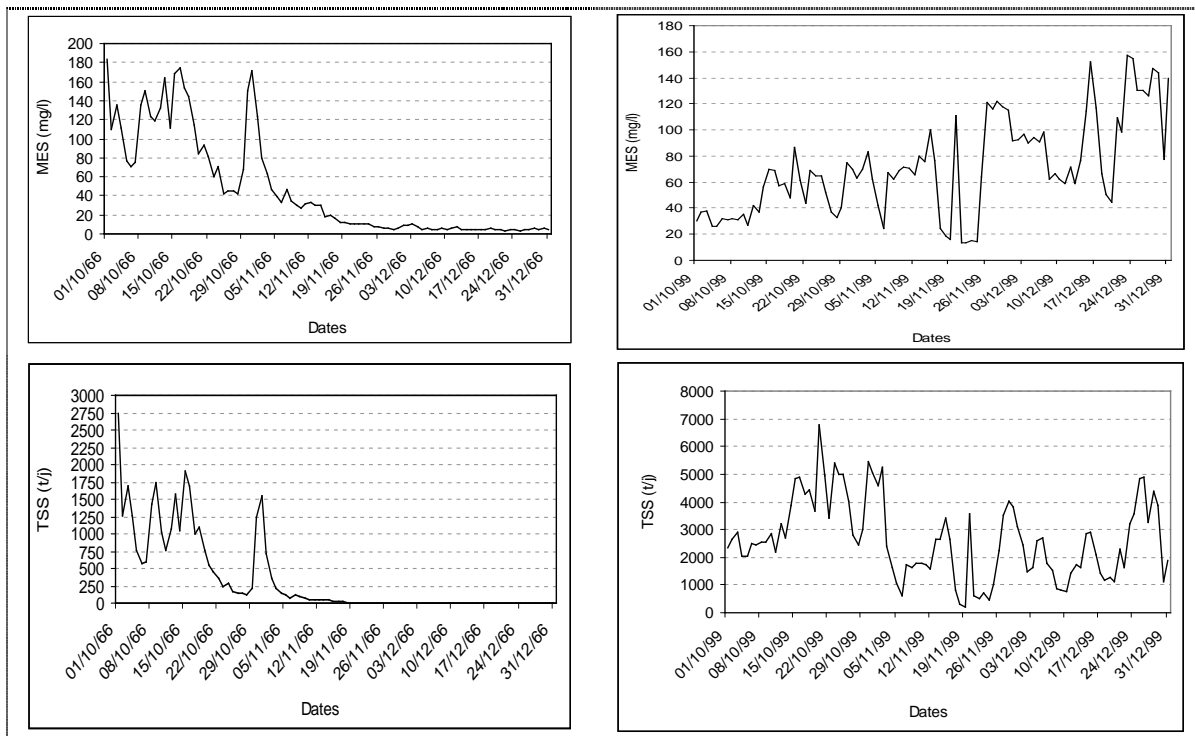


Figure 8: Variation des TSS, MES, débits journaliers dans système fluviolagunaire d'octobre à décembre 1966 et 1999. (Source : Colombani, 1967 ; Roche International, 1999 ; Amoussou, 2010)

Liste des tableaux

Tableau 1 : Évaluation du taux de dénudation de la période concernée dans le bassin-versant du complexe

Périodes	Taux de dénudation (t.km ⁻² .an ⁻¹)
30/05/1966 au 20/02/1967 (Mono)	41
01/10/1966 au 31/12/1966 (Mono)	16
01/10/1999 au 31/12/1999 (Guézin)	43
01/10/1999 au 31/12/1999 (Couffo)	2

Source : Amoussou, 2010

Tableau 2 : Apports solides estimés sur trois mois sur la base de mesures de débits solides pour le Mono à Athiéme et le Couffo à Lanta.

Période de mesure	Apports solides (kg)	Apports solides (m ³)	Volume de dépôt correspondant (m ³)	Apport spécifique (m ³ .km ⁻² .an ⁻¹)
Sous-bassin du Mono				
01/10/1966 31/12/1966	31 785 781	11 433,73	18 920,11	0,88
Système lagunaire (1^{er} pont Guézin)				
01/10/1999 31/12/1999	243 912 684	87 738,38	145 186,12	6,75
Sous-bassin du Couffo				
01/10/1966 31/12/1966	-	-	-	-
01/10/1999 31/12/1999	1 213 190	436,40	722,14	0,24

- Pas de données. Source : Colombani, 1967a et Roche International, 1999

Densité des particules $\rho_s = 2\,780\text{ kg.m}^{-3}$, densité apparente des dépôts $\rho_d = 1\,680\text{ kg.m}^{-3}$; Superficies : Mono, 21500 km² et Couffo, 3000 km².

Tableau 3 : Evolution de la sédimentation en certains secteurs du système lagunaire.

Superficie (m ²)/ Sites	S1 (2002)-S2 (2005)	S1 (2002)-S3 (2006)	S2 (2005)-S3 (2006)
Gogotinkponmè	+10,8	+32,4	+21,6
Nazoumè	+16,5	+16,5	0
Affoglindji	+32,4	+16,2	-16,2
Gbèzoumè	+8,82	+71,82	+63

Données de terrain, 2002 à 2006 ; Amoussou, 2010

Tableau 4 : Etat d'évolution de la sédimentation dans certains secteurs du lac Ahémé de 1991 à 1999.

Superficie (m ²)/ sites	S (1991)	S (1999)	S (1991) – S (1999)
Bopa Kpindji	2405	2499	-94
Bopa centre	5164	4919	+245
Sègbohouè	2899	2744	+155
Agatogbo	2453	1805	+648

Source : Oyédé et al., 2007.