APPORT DES SÉRIES D'IMAGES LANDSAT DANS L'ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE L'EMBOUCHURE DE L'ESTUAIRE DES FLEUVES MONO ET COUFFO AU BÉNIN, AVANT ET APRÈS LA CONSTRUCTION DU BARRAGE DE NANGBÉTO SUR LE MONO

LAÏBI Raoul A.[1, 3], GARDEL Antoine[1*], ANTHONY Edward J.[2], OYEDE Lucien-Marc[3]

[1] Université du Littoral Côte d'Opale, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR CNRS 8187, 32 avenue Foch, BP 80 62930 Wimereux, France, Tél : 03.21.99.64.08, Fax : 03.21.99.64.01, E-mail*: antoine.gardel@univ-littoral.fr, E-mail : raoulaibi@yahoo.fr*
[2] Aix Marseille Université, Institut Universitaire de France, CEREGE, UMR CNRS 6635, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, B.P. 80, 13545, Aix en Provence Cedex, France, E-mail : anthony@cerege.fr
[3]Laboratoire de Géologie, Mines et Environnement, Département des Sciences de la Terre, Université d'Abomey-Calavi, 01 B. P. 526 Cotonou, République du Bénin, Tél. 00229 21 36 00 74, Fax. : 00229 21 36 00 28, E-mail : oyede_marc@yahoo.fr

Soumis le 15 février 2011 ; accepté le 7 janvier 2012 - © *Revue Télédétection*, 2012, vol. 10, n° 4, p. 179-188

Résumé :

La"Bouche du Roi" dans le milieu littoral du Bénin, est un exemple d'embouchure de système estuarien dominé par la houle. Avant la mise en service du barrage hydroélectrique de Nangbéto sur le fleuve Mono, la Bouche du Roi était contrainte à des phases d'ouverture et de fermeture, sur une période de temps très courte, sous l'effet de la dérive littorale et de l'hydrodynamisme saisonnier du Mono. Après la construction du barrage en 1987, la régularisation des écoulements du Mono a rendu permanente l'ouverture de cette embouchure. L'analyse des images Landsat révèle qu'avant et après le barrage de Nangbéto, l'ouverture de l'embouchure est toujours accompagnée d'une migration qui s'effectue par édification d'une flèche sableuse à l'amont-dérive puis érosion de la plage en aval-dérive. La vitesse moyenne de la migration est de 700 m/an. Avant la construction du barrage, les phénomènes d'accrétion de flèche et de migration d'embouchure étaient limités dans l'espace et dans le temps en raison de la courte durée de la phase d'ouverture de la Bouche du Roi. A la suite de la mise en service du barrage, ces phénomènes sont devenus permanents avec la persistance de l'embouchure ; ce qui entraîne la destruction de proche en proche de la plage aval et la ruine progressive des infrastructures socio-écononomiques. Après plus de 20 ans de fonctionnement du barrage, le bilan des évolutions enregistrées se traduit par une avancée du rivage essentiellement imputable, non pas aux apports solides du fleuve Mono, mais à la charge sédimentaire mobilisée depuis l'ouest par la dérive littorale.

***Mots-clés** : embouchure fluviale, barrage de Nangbéto, dérive littorale, migration d'embouchure, flèche sableuse, érosion littorale.*

CONTRIBUTION OF LANDSAT IMAGERY TO THE ANALYSIS OF THE SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF THE ESTUARY MOUTH OF THE MONO RIVER IN BENIN, BEFORE AND AFTER CONSTRUCTION OF THE NANGBETO DAM.

Abstract :

The "Bouche du Roi" inlet in the coastal environment of Benin is an example of a wave-dominated estuary-mouth system.

Before the contruction of the hydroelectric dam of Nangbeto on the Mono river, the main tributary of the estuary, the Bouche du Roi inlet was forced into successive opening and closing over a very short period of time, under the effect of longshore drift and the seasonal discharge of the Mono river. Following construction of the dam in 1987, stabilization of the discharge of the Mono river has resulted in permanent opening of the inlet.

Analysis of a series of Landsat images shows that before and after the Nangbeto dam was built, the opening and downdrift of the inlet was associated with updrift spit elongation and downdrift beach erosion. The average speed of migration is of the order of 700 m/year. Before the dam, the spit accretion and mouth migration were limited in space and time due to the short duration of the opening phase of the inlet. Following the implementation of the dam, the inlet opening and downdrift migration have become persistent, resulting in gradual downdrift beach erosion and the destruction of socio-economic infrastructure installed along the coast.

After more than 20 years of dam operation, the net shoreline advance observed updrift of the inlet is due to sand mobilized from the west by longshore drift.

***Keywords**: wave-dominated inlet, Mono river, Nangbeto dam, inlet migration, longshore drift, sand spit, coastal erosion.*

1. INTRODUCTION

En milieu tropical humide et particulièrement en Afrique de l'Ouest au sud du Sahara, la dynamique hydro-sédimentaire au sein des domaines littoraux associe souvent des systèmes d'estuaires et de deltas avec des embouchures de formes variées. Ces embouchures connaissent des modifications de structures et de fonctionnement sous l'influence des facteurs naturels et anthropiques.

La*"Bouche du Roi"* dans le milieu margino-littoral du Bénin est un exemple d'embouchure de système estuarien situé dans le golfe de Guinée en Afrique de l'Ouest (figure1). L'estuaire auquel se rapporte l'embouchure est constitué par les basses vallées des fleuves Mono et Couffo, le lac Ahémé, le chenal Ahô et la lagune côtière (figure 1). On parle de l'estuaire du Mono-Couffo. Les caractéristiques naturelles du domaine littoral dans lequel s'inscrit l'estuaire se résument en une puissante dérive littorale dans un contexte climatique (pluviométrique) saisonnier bimodal (figure1B).

En juillet 1987, un barrage hydroélectrique a été construit sur le fleuve Mono, principal tributaire de l'estuaire, à la latitude du village de Nangbéto au Togo (figure1B). Avant la construction de ce barrage, la *Bouche du Roi* était caractérisée par des phases d'ouverture et de fermeture, à un emplacement originel connu sous le nom de Kouéta. Après la mise en service du barrage, l'ouverture de la *Bouche du Roi* est devenue permanente. Son nouveau fonctionnement se traduit dès lors par une mobilité persistante d'Ouest en Est, dans le sens de la dérive littorale. Cette mobilité est accompagnée d'importants phénomènes d'érosion qui entraînent la déstabilisation des plages et la destruction des infrastructures installées le long de la côte. Cependant, les modèles de simulations réalisées en 1992 prévoyaient une relative stabilité/engraissement de la zone de la *Bouche du Roi* pendant 25 ans après la construction du barrage (c'est-à-dire jusqu'en 2012) alors que la fourniture des sédiments à la dérive littorale par le fleuve Mono passerait de 100 000 m³/an à 25 000 m³/an (Rossi et Blivi, 1995). Les observations de terrain sont donc loin de s'accorder avec une véritable stabilité dans le secteur et le blocage des sédiments du fleuve Mono par le barrage de Nangbéto ne semble pas être principalement mis en cause. C'est ce qui justifie la conduite de cette étude qui se base sur l'analyse d'une série chronologique d'images satellitaires Landsat pour caractériser la dynamique de la *Bouche du Roi* et ses plages adjacentes, avant et après le barrage de Nangbéto. Cet objectif constitue un préalable nécessaire à la compréhension des bouleversements observés dans ce secteur et à la recherche d'une solution d'aménagement judicieuse.

2. PRÉSENTATION DU MILIEU D'ÉTUDE

La marée océanique affectant le littoral béninois est de type semi-diurne et microtidal avec des marnages extrêmes de +1,95 m et -0,20 m, mais l'amplitude tourne généralement autour du mètre.

La direction et le régime des houles sont liés à des tempêtes dans l'Atlantique sud, notamment, celles générées par l'anticyclone de Saint Hélène (Sitarz, 1960, Anthony et Blivi, 1999) et, accessoirement, à des vents locaux. Elles font apparaître deux saisons de houle : l'une, avec des houles de faibles hauteurs (0,4 à 0,5 m en moyenne) d'octobre/novembre à mai ; l'autre, où, durant l'été boréal, de juin à septembre, les hauteurs peuvent atteignent et dépassent 2 m (Rossi, 1989). Les directions de houles sont constantes et montrent une prédominance des directions S à SSO pour les premières houles et SSO à SO pour les secondes (Sitarz, 1960, Rossi, 1989). On peut considérer que la houle, facteur essentiel du transport des sédiments sur le littoral béninois, a une période comprise entre 10 et 15 s avec une fréquence moyenne de 11 - 12 s. Au déferlement, l'obliquité de la houle par rapport au rivage varie entre 4° et 9°, avec une moyenne autour de 6°-7° (Rossi, 1989). Elle entraîne un courant de dérive littorale dirigée d'Ouest en Est et dont la vitesse mesurée à Cotonou est de l'ordre de 0,3 à 1 m/s (Sitarz, 1960). Ce courant est responsable du transit annuel de 1,2 à 1,5 million de m^3 de sables le long de la côte du golfe de Guinée (Sitarz, 1960 ; NEDECO, 1975 ; LACKNER, 1983 et LCHF, 1984). Les relevés effectués par l'Université Nationale du Togo en 1994 montrent que le volume de sable mobilisé par la dérive n'est plus que de 1 million de m³/an entre Lomé et Cotonou, en raison du blocage des sédiments en transit par le Port de Lomé et par du beachrock exposé par l'érosion de la plage à l'aval du port de Lomé (Blivi, 1993b).

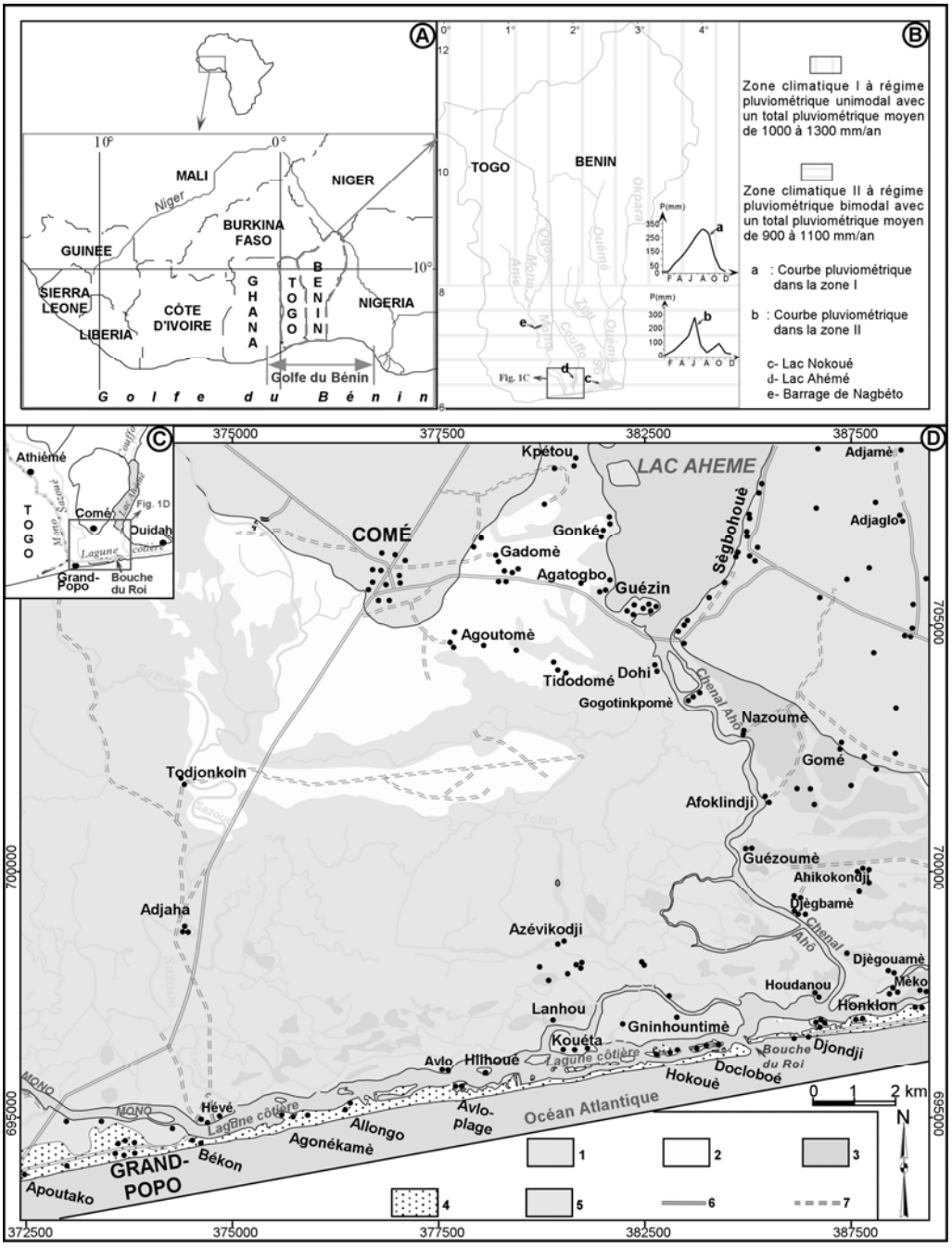


Figure 1 : Caractéristiques climatiques et unités géomorphologiques du domaine estuarien du Mono-Couffo. Situation du Bénin et du Togo dans le golfe du Bénin en Afrique de l'Ouest ; B- Zonation climatique (pluviométrique) globale du Togo et du Bénin ; C- Unités géomorphologiques du système estuarien du Mono-Couffo (Voir Figure 1B pour localisation) ; D- Unités géomorphologiques de la zone de l'embouchure de l'estuaire (Voir Figure 1C pour localisation).1- Plateaux de terre de barre ; 2- Cordon de sables jaunes ; 3- Cordon de sables gris ; 4- Cordon de sables bruns ; 5- Plaine marécageuse à mangroves ; 6- Routes principales ; 7- Routes secondaires.

Climatic features and geomorphological units of the Mono-Couffo estuary. A- Situation of Benin and Togo in West Africa; B- Global climatic zonation (rainfall) in Togo and Benin; C- Geomorphological units of the estuarine system (See figure 1B for localization); D-Geomorphological units of the estuary inlet zone (See figure 1C for localization). 1 - Plateau; 2 – Yellow sands (old beach); 3 - Grey beach sands; 4 – brown beach sands (actual beach); 5 - Mangrove plain; 6 – Main roads; 7 - secondary roads.

Le littoral est caractérisé par des cordons sableux (figure 1) constitués d'accumulation de sédiments granulaires marins actuels ou hérités de la dernière transgression holocène (Lang *et al*., 1988, Oyédé, 1991). On distingue du Nord au Sud, trois générations de cordons sableux (Oyédé, 1991) : *les cordons internes de sable jaune* généralement plaqués contre la bordure sud des plateaux de terre de barre ; *les cordons médians de sable gris* noyés par les débordements des eaux fluviales du Mono et *le cordon actuel et subactuel de sable brun* constituant la plage actuelle entre la lagune côtière et l'océan atlantique. Leurs altitudes sont de 5 à 8 m pour les sables jaunes, de 2 à 3 m pour les sables gris et moins de 2 m pour les sables gris.

Ces cordons renferment un complexe lagunaire constitué d'une lagune étroite et allongée parallèlement à la côte et d'une autre plus vaste, pénétrant à l'intérieur des terres (lac Ahémé). Les deux lagunes communiquent entre elles par l'intermédiaire du chenal Aho et sont en interaction avec la mer par le truchement de la *Bouche du Roi*. Elles sont associées à des zones humides sous forme de marais à eaux affleurantes ou subaffleurantes. Les profondeurs y sont assez faibles (1 à 3 m) et les fonds sont vaseux ou sablo-vaseux.

Le complexe lagunaire est alimenté par deux principaux cours d'eau : le Mono et le Couffo. Les fonds des deux cours d'eau sont constitués de sable dont la granulométrie décroît d'amont en aval ; les zones de débordements et les plaines inondables étant plus riches en silts (Blivi, 2000). Le fleuve Mono a un bassin versant de 30.000 km². Ce bassin s'étend sur deux zones géographiques à caractéristiques pluviométriques différentes (figure 1B) : la première au nord du 8ème parallèle, présente un climat tropical à deux saisons : l'une sèche et l'autre pluvieuse, avec un total pluviométrique moyen variant entre 1000 et 1300 mm/an ; la deuxième au sud de ce parallèle, a un climat de type subéquatorial à quatre saisons dont deux sèches alternant avec deux pluvieuses et totalisant en moyenne 900 à 1100 mm/an. Toutefois, dans la deuxième zone climatique, il faut signaler que le fleuve Mono, à l'entrée dans le domaine estuarien en étude, est soumis à une certaine anomalie climatique et ne bénéficie de ce fait, qu'entre 800 à 900 mm/an (Bokonon Ganta 1987 *in* Ago, 2005 ; Toffi, 1991 ; Blivi, 2000 ; figure 1B). L'analyse hydrologique du Mono dans la zone margino-littorale montre que cette inégale répartition des pluies dans le temps et dans l'aire du bassin versant se traduisait au niveau de l'écoulement du fleuve. En effet, avant la mise en service du barrage de Nangbéto, le fleuve Mono se caractérisait par des apports d'étiage pratiquement nuls durant six mois (de décembre à mai). Il connaissait une crue unique pendant les mois de septembre-octobre avec des débits pouvant atteindre 680 à 700 m³/s (Pliya, 1976, PNUD, 1987 ; Blivi, 2000). L'unicité de la crue du fleuve s'explique donc par le fait que les deux régimes pluviométriques au-dessus du bassin versant se superposaient, se traduisant ainsi par une seule pointe dans l'écoulement du fleuve (figure 2A). Cette pointe intervenait alors aux mois de septembre-octobre, période où la somme des lames d'eau tombées sur les deux régions était maximale. Depuis la mise en eau du barrage de Nangbéto en juillet 1987, l'écoulement du fleuve Mono est devenu permanent et les étiages nuls ne sont plus observés (Rossi et Antoine, 1990, Rossi et Blivi, 1995, Blivi, 2000, Ago, 2005, figure 2B).

Le Couffo est un petit fleuve (bassin versant : 3000 km²) qui connaît deux périodes de crue par année, en juin-juillet pour la première et septembre-octobre pour la seconde ; avec des débits voisins de 16m³/an (Guilcher, 1959 in Oyédé, 1991). Cet écoulement bimodal est en relation avec le climat qui gouverne son bassin hydrographique (figure1B).

En somme, avant et après le barrage de Nangbéto, le Mono demeure le principal fleuve qui commande l'hydrologie continentale de l'estuaire, le Couffo étant un petit cours d'eau à bassin versant moins vaste et moins arrosé. C'est ainsi que suivant les saisons et surtout à marée haute, les eaux du Mono mélangées à celles de la mer dans la lagune côtière peuvent remonter jusqu'au niveau du lac Ahémé par le chenal Ahô.

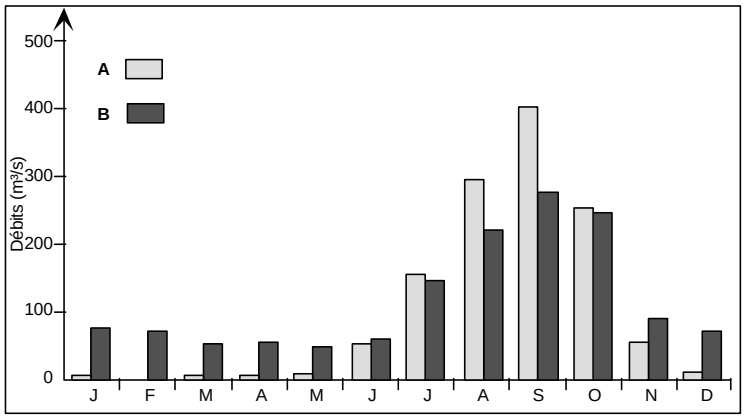


Figure 2 : Débits moyens mensuels du Mono à Athiémé avant et après le barrage hydroélectrique de Nangbéto (Agbani, 2000). Voir Figure 1C pour la situation de la localité d'Athiémé ; A- Débit avant la mise en service du barrage ; B- Débit après la mise en service du barrage.

Monthly average of Mono river rate of flow at Athiémé before and after building of Nangbéto dam (Agbani, 2000) See figure 1C to locate Athiémé; A – Rate of flow before Nangbéto dam construction; B - Rate of flow after Nangbéto dam construction.

3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1. Données utilisées

Le matériel utilisé pour ce travail est essentiellement constitué d'images satellitaires Landsat. Elles proviennent des catalogues d'images d'archives issues des instruments TM *(Thematic Mapper)* et ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) et correspondent aux satellites Landsat 4, 5 et 7. Elles ont été téléchargées gratuitement *via* le site

http://glovis.usgs.gov/. Après une observation visuelle des scènes téléchargées, dix sept (17) ont été retenues pour cette étude. Elles datent de 1984 à 2009. Chaque image couvre le littoral du golfe de Guinée, du delta de la Volta (au Ghana) jusqu'au lac Nokoué (au Bénin). Toutes les scènes sont directement orthorectifiées et projetées dans le système de projection UTM/WGS84 et chacune d'entre elles est accompagnée de métadonnées précisant les paramètres d'acquisition, le type de capteur, le type de satellite, la date, etc. La résolution spatiale varie suivant la longueur d'onde de chacune des bandes spectrales dans lesquelles opèrent les capteurs TM et ETM+. Ces images ont permis d'apprécier la cinématique spatio-temporelle du secteur côtier étudié, grâce aux étapes méthodologiques décrites ci-dessous.

3.2. Approches méthodologiques

- Le traitement des images : avant d'exploiter les images Landsat sélectionnées, nous avons évalué leur qualité géométrique en superposant des éléments linéaires comme les méandres des cours d'eau par exemple. Une bonne conformité a été notée entre les scènes utilisées. Le secteur d'étude (*area of interest*) a été ensuite délimité sur l'ensemble des scènes au moyen du logiciel Erdas Imagine 8.5. Pour faciliter l'interprétation, des compositions colorées « fausses couleurs » ont été effectuées par combinaison des vues des canaux 4, 5 et 3 (R, V et B) pour les images Landsat 4 TM et Landsat 5 TM qui ont une résolution spatiale de 30 m. Les images Landsat 7 ETM+ ont été reéchantillonnées à 15 m par fusion multirésolution, à partir des vues des canaux 8, 4, 5 et 3 (Pan, R, V et B), afin de faciliter le repérage du trait de côte et des contours des unités géomorphologiques (cordons sableux, plans d'eau, ...).

- Le choix de la ligne de référence : La ligne de référence choisie comme trait de côte pour évaluer la dynamique du littoral est la ligne de référence instantanée.

Elle est l'indicateur le plus facilement repérable sur les images utilisées. De plus, cet indicateur convient assez bien dans notre secteur d'étude où le marnage moyen n'est que de 1 m. Pour les différentes dates retenues, la numérisation de l'entité de référence choisie est effectuée par interprétation assistée par ordinateur. Ainsi, la ligne instantanée de rivage est repérée et digitalisée sur les différents fonds d'images, grâce au logiciel Arc View 3.2. Il faut noter que l'opération a été relativement aisée, même si certaines scènes Landsat 7 ETM+ présentent des rayures parallèles *(stripping)*. Nous n'avons donc pas été confrontés à des difficultés majeures pour repérer cette ligne instantanée représentée par la transition entre les populations de pixels des zones terrestres et marines. Aussi, le secteur étudié était-il en général exempt de nuages et présentait de bons contrastes de couleurs sur toutes les images considérées.

Pour une ligne de rivage extraite d'une image satellitaire, la date retenue correspond à la fin d'année la plus proche de la date de prise de l'image (tableau 1).

Tableau 1 : Dates des images exploitées, dates des lignes de rivages extraites et positions de la Bouche du Roi
Dates of satellite images used, dates of shorelines and Bouche du Roi inlet positions

Références des scènes exploitées	Date de prise d'image	Date du trait de côte extrait	emplacements de la "Bouche du Roi"
LT51920561984216AAA03	03/08/1984	1984	BR_84
LT51920561986013XXX04	13/01/1986	1985	BR_85
LT51920561986349XXX03	15/12/1986	1986	BR_86
LT51920561987032AAA03	01/02/1987	Trait de côte non extrait	-
LT51920561987080AAA02	21/03/1987	Trait de côte non extrait	-
LT41920561988043XXX03	12/02/1988	1987	BR_87
LT51920561991043XXX02	12/02/1991	1990	BR_90
Imagette SPOT	28/08/1994	Trait de côte non extrait	BR_94
LT51920561998334XXX02	30/11/1998	1998	BR_98
LE71920561999313EDC00	09/11/1999	1999	BR_{fm1} et BR_99
LE71920562000092EDC00	01/04/2000	Trait de côte non extrait	-
LE71920562000268EDC00	24/09/2000	Trait de côte non extrait	-
LE71920562001094EDC00	04/04/2001	Trait de côte non extrait	-
LE71920562001254EDC00	11/09/2001	Trait de côte non extrait	-
LE71920562002321EDC00	17/11/2002	2002	BR_02
LE71920562005313EDC00	09/11/2005	2005	BR_05
LE71920562008322ASN00	17/11/2008	2008	BR_08
LE71920562009324ASN00	20/11/2009	2009	BR_{fm2} et BR_09

Source des images : catalogue de scènes Landsat et des imagettes SPOT

- La mesure des évolutions observées : entre les traits de côtes multidates extraits des images, les variations observées ont été mesurées automatiquement grâce au programme Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 2.2.1 (Thieler et *al.,* 2004) suivant des transects perpendiculaires aux lignes à comparer (figure 3). Ces transects sont générés à partir d'une ligne de base (baseline). Le DSAS fonctionne comme un module complémentaire d'ArcView ou d'ArcGis. Il mesure les distances entre les points d'intersection des transects et des traits de côte, calcule les taux

d'évolution le long de chaque transect et restitue les résultats sous forme de tables attributaires. Mille neuf cent soixante quatre (1964) transects ont été réalisés. Ils sont distants de 10 m les uns des autres. Les résultats obtenus sont traduits en volet graphique statistique (au moyen du tableur Excel) puis comparés au volet cartographique du secteur étudié ; ce qui a permis de quantifier les évolutions (érosion ou engraissement) du rivage et d'identifier les segments de côte correspondants.

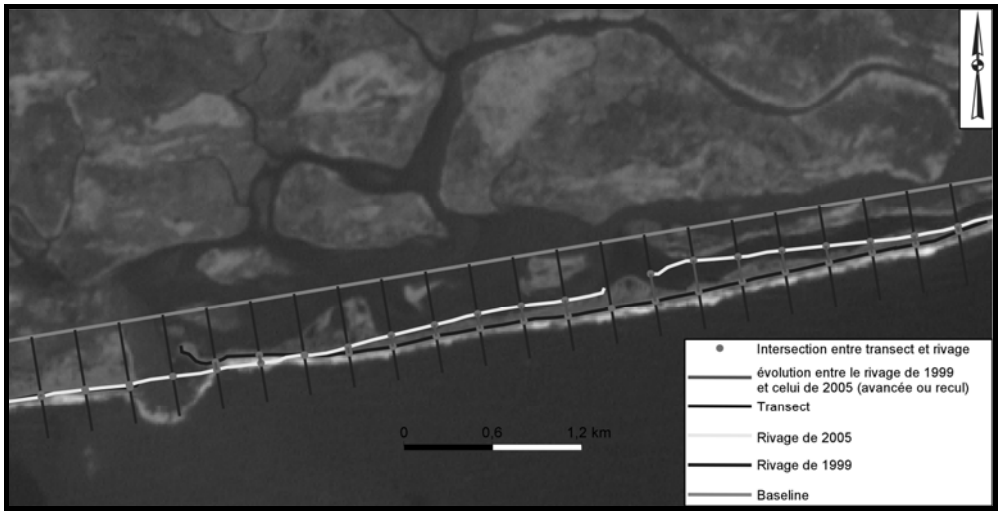


Figure 3 : Illustration du principe de calcul du DSAS
Illustration of computation principle of the Digital Shoreline Analysis System

3.3. Estimations de la marge d'erreur

Les principales sources d'imprécision estimables sont celles induites par la taille du pixel et par la digitalisation de la ligne de référence. En plus de ces incertitudes, les inégalités des niveaux de marée et l'intensité du déferlement dans la zone de swash lors de l'acquisition des images génèrent des erreurs supplémentaires sur la position de la ligne instantanée de rivage.

La résolution spatiale des images Landsat exploitées est de 15 m pour les images Landsat 7 ETM+ reéchantillonnées puis de 30 m pour les images Landsat 4 TM et Landsat 5 TM. L'erreur liée à la taille du pixel (E_p) est de 15 ou 30 m selon le type d'image Landsat considérée.

La précision de la digitalisation (E_d) du trait de côte dépend de plusieurs facteurs dont l'expérience du photo-interprète et son appréciation de la ligne de rivage considérée, laquelle est aussi conditionnée par la résolution et la qualité radiométrique des images (Faye, 2010). Par conséquent, la ligne acquise par cette méthode est approximative. Coyne *et al.* (1999) propose de répéter la numérisation de la ligne de référence plusieurs fois. D'après Moore et Griggs (2002), *in* Faye (2010), l'erreur relative à cette opération peut être estimée par la somme de la moyenne ($\overline{X}$) des décalages enregistrés lors de la répétition de la numérisation et de 2 écarts-types (2σ) :

$$E_d = \overline{X} + 2\sigma$$

Par ailleurs, sous l'effet de la marée, l'erreur potentielle pouvant entacher la précision de la ligne instantanée de rivage correspond à l'écart horizontal (E_m) entre la position du rivage de basse mer et celle de la haute mer. Cet écart dépend donc de la pente de l'estran et du marnage de la marée. Elle peut être évaluée par la relation géométrique suivante :

$$E_m = h \big/ \tan(\theta)$$

E_m est la largeur de l'estran couverte ou découverte en fonction de la marée ; h est la hauteur de la marée au moment du passage du satellite ; θ, la pente de l'estran.

Puisque nous ne disposons ni de la valeur de la pente, ni de celle de la marée au moment de la prise des images, nous considérons :

- pour la valeur de h, le marnage moyen de la marée fixé à 1 m dans la littérature ;

- pour la valeur de θ, la valeur moyenne des pentes d'estran mesurée par nous même, dans le secteur d'étude, entre 2007 et 2009. Celle-ci est en moyenne égale à 17%.

E_m est donc d'environ 6 m.

Pour chacune des lignes de rivage extraites, l'erreur découlant de l'interprétation est inférieure à la taille du pixel ; il en est de même de l'erreur potentielle générée par la marée (tableau 2). Sur chacune des lignes de rivages extraites, la précision que nous considérons reste donc la résolution du pixel (tableau 2), car celle-ci couvre aussi bien l'erreur liée à la marée que celle pouvant être commise lors de la photo-interprétation.

Tableau 2 : Précisions des lignes de rivage extraites des images satellitaires
Precision of shorelines extracted from satellite images

Désignation des images exploitées	E_d (m)	E_m (m)	Précision de la ligne de rivage extraite (= E_p en m)
LT51920561984216AAA03	8,29	6	30
LT51920561986013XXX04	10,54	6	30
LT51920561986349XXX03	10,7	6	30
LT41920561988043XXX03	8,3	6	30
LT51920561991043XXX02	11,63	6	30
LT51920561998334XXX02	9,8	6	30
LE71920561999313EDC00	7,68	6	15
LE71920562002321EDC00	9,22	6	15
LE71920562005313EDC00	6,73	6	15
LE71920562008322ASN00	8,48	6	15
LE71920562009324ASN00	9,2	6	15

4. RÉSULTATS

4.1. Dynamique de l'embouchure de l'estuaire du Mono-Couffo

4.1.1. Avant le barrage de Nangbéto

Historiquement, l'estuaire du Mono-Couffo est en relation avec la mer par le truchement d'une ou de plusieurs embouchures. Avant la construction du barrage de Nangbéto sur le fleuve Mono, ces embouchures étaient caractérisées par des cycles d'ouverture et de fermeture, les ouvertures n'étant pas toujours naturelles (Guilcher, 1959 ; Pliya, 1976 ; Oyédé, 1991). En effet, sous l'impulsion de la puissante dérive littorale ouest-est, les embouchures ont tendance à se fermer en saison sèche entre décembre et février, mais cette fermeture n'est pas régulièrement annuelle ; les débouchés pouvant rester ouverts deux ou trois ans avant que ne se produise leur fermeture. Lorsqu'elles se ferment en saison sèche, c'est que la dérive littorale l'a emporté sur la marée et les courants du Mono dans le déplacement des sédiments (Guilcher, 1959). En saison des pluies, il arrive que les fortes crues du Mono ne suffisent plus a elles seules pour la réouverture ; celle-ci est alors assurée artificiellement par la population riveraine, afin d'éviter les inondations (Guilcher, 1959).

Avant les années 80 : période d'une anecdote à celle d'une histoire peu archivée

Pliya (1976) rapporte qu'avant le premier Roi de Guézin, Dè Klousè (1728–1738), l'estuaire du Mono-Couffo n'était plus en communication avec la mer. Lors des hautes eaux du fleuve Mono, l'écoulement se faisait en direction du lac Ahémé par le biais du chenal Aho, mais aussi en direction du lac Nokoué à travers la lagune côtière (Boko, 1975 in Oyédé, 1991, Pliya, 1976). L'ouverture mécanique a alors été décidée et mise en œuvre pour la première fois par ce Roi qui ouvrit le débouché de l'Aho à Honklon (près de Mèko), et la "*Bouche du Roi*" plus à l'Ouest, près de Djondji, afin que les poissons de mer puissent accéder facilement au lac Ahémé (Pliya, 1976). Ce premier acte établit la souveraineté du Roi de Guézin dans les opérations d'ouverture d'embouchures. Ainsi donc, lorsque les embouchures se refermaient, les habitants de Grand-Popo et environs se rendaient chez ce Roi pour lui demander de décider de la réouverture. Après concertation avec tous les chefs des villages environnants, Dè Klousè fixe la date et le(s) emplacement(s) de la réouverture. Lorsque le jour retenu arrive, chaque village envoie un contingent de travailleurs qui se rassemblent la nuit, en effectifs très nombreux, au(x) emplacement(s) indiqué(s) pour les opérations de réouverture. Avant le jour, la(es) brèche (s) est (sont) ouverte (s) et les travailleurs repartaient discrètement. Le commun des habitants avait donc toujours l'impression que ces ouvertures se faisaient naturellement et tendait même à accréditer le mythe des opérations par l'action des tortues de mer.

Au fil des années, deux emplacements ont été privilégiés dans les opérations d'ouverture d'embouchures (Pliya, 1976, figure 1) : l'emplacement de Grand-Popo (entre Békon et Agonékamè) et celui de Kouéta (entre Avlo et Hokouè). A l'emplacement de Grand-Popo, l'embouchure se trouve dans le prolongement de l'axe du fleuve Mono. Son ouverture accélère donc l'évacuation des eaux fluviales et entraîne une baisse rapide du niveau des eaux lagunaires. De ce fait, si les inondations ne paraissent pas particulièrement catastrophiques, on n'ouvre guère l'embouchure de Grand-Popo, mais plutôt celle de Kouéta (*Bouche du Roi*) qui a une position décalée par rapport à l'axe du fleuve (Pliya, 1976). L'estuaire du Mono-Couffo est alors plus souvent en relation avec la mer par la *Bouche du Roi* ; la vitesse de vidange en mer du fleuve Mono reste en conséquence plus modérée et le niveau des eaux lagunaires baisse plus lentement, ce qui favorise les pécheurs des villages riverains (Pliya, 1976).

Guilcher (1959) a signalé l'ouverture de l'embouchure de Grand-Popo d'octobre 1956 à octobre 1957, pendant que la *Bouche du Roi* était fermée ; les causes de la rupture étant liées à l'élévation du niveau d'eau dans le fleuve Mono et les opérations d'ouverture strictement artificielles. Par ailleurs, Blivi (1993b) a fait remarquer qu'en période de crue, avant la mise en service du barrage de Nangbéto, il arrive que des embouchures occasionnelles apparaissent au sein du rivage, en dehors des emplacements privilégiés, par suite de ruptures naturelles en des points fragiles du cordon littoral, entre Grand-Popo et Djondji.

D'une façon générale, il faut dire qu'avant les années 1980, il n'existait pas de données iconographiques successives (dans le temps) permettant de retracer, de façon détaillée, la dynamique spatio-temporelle des embouchures de l'estuaire du Mono-Couffo. Toutefois, les informations glanées de la bibliographie et les images Landsat disponibles permettent de se rendre compte que la *Bouche du Roi* était la passe la plus originelle de cet estuaire et que les autres embouchures ne s'ouvraient que ponctuellement, par rupture artificielle ou naturelle, lors des fortes crues du fleuve Mono.

Les années 80 : période d'une histoire révélant la migration de la Bouche du Roi (Fig. 4)

Les images générées par Landsat ont permis de suivre la dynamique spatio-temporelle de l'embouchure de l'estuaire du Mono-Couffo et celle des plages adjacentes dès le début des années 80. Ces images montrent que la communication de l'estuaire du Mono-Couffo avec la mer est assurée uniquement par la *Bouche du Roi* située à l'emplacement de Kouéta. Toutefois, il faut mentionner que si plusieurs images Landsat existent par mois pour de nombreuses régions du globe depuis 1972, elles ne sont régulièrement disponibles pour le littoral du Bénin qu'à partir de 1984. Ainsi, sur près de quatre années consécutives, d'août 1984 à février 1988, les images Landsat ont permis de suivre plus en détail l'évolution de la *Bouche du Roi* (figure 4). L'image du 21 mars 1987 (figure 4E) montre la fermeture de la *Bouche du Roi* ; elle témoigne donc de la fin d'une phase d'ouverture ; ce qui confirme les observations antérieures faites par Guilcher (1959) et Pliya (1976). Cette fermeture de mars 1987 est de toute évidence naturelle, car elle s'est produite en période d'étiage du fleuve Mono, sans doute sous le jeu du transport sédimentaire par des courants de dérive. Une nouvelle phase de fonctionnement de l'embouchure a démarré depuis l'apparition d'une autre ouverture au sein du rivage, celle observée sur la figure 4F. Mais il est difficile de dire si cette ouverture est naturelle ou artificielle. Toutefois, il est aisé de réaliser qu'elle est liée à la montée des eaux du fleuve Mono au cours de l'année 1987.

Par ailleurs, pendant la phase d'ouverture notée par les stades A à D sur la figure 4, la *Bouche du Roi* a connu un déplacement dans le sens de la dérive littorale. La vitesse moyenne de ce déplacement (calculée pour une durée comprise entre le 03/08/1984 et le 21/03/1987) est de 650 m/an. Au cours de cette mobilité, la *Bouche du Roi* n'a pas pu franchir l'emplacement de Kouéta (compris entre Avlo et Hokoué, tel que défini par Pliya, 1976), en raison de la courte durée de la phase d'ouverture. En effet, d'après Guilcher (1959), l'ouverture de l'embouchure ne dure que deux ou trois ans.

Il faut aussi noter qu'entre janvier et février 1987, une rupture a été observée en un point fragile du cordon, au voisinage de la *Bouche du Roi* (figure 4D).

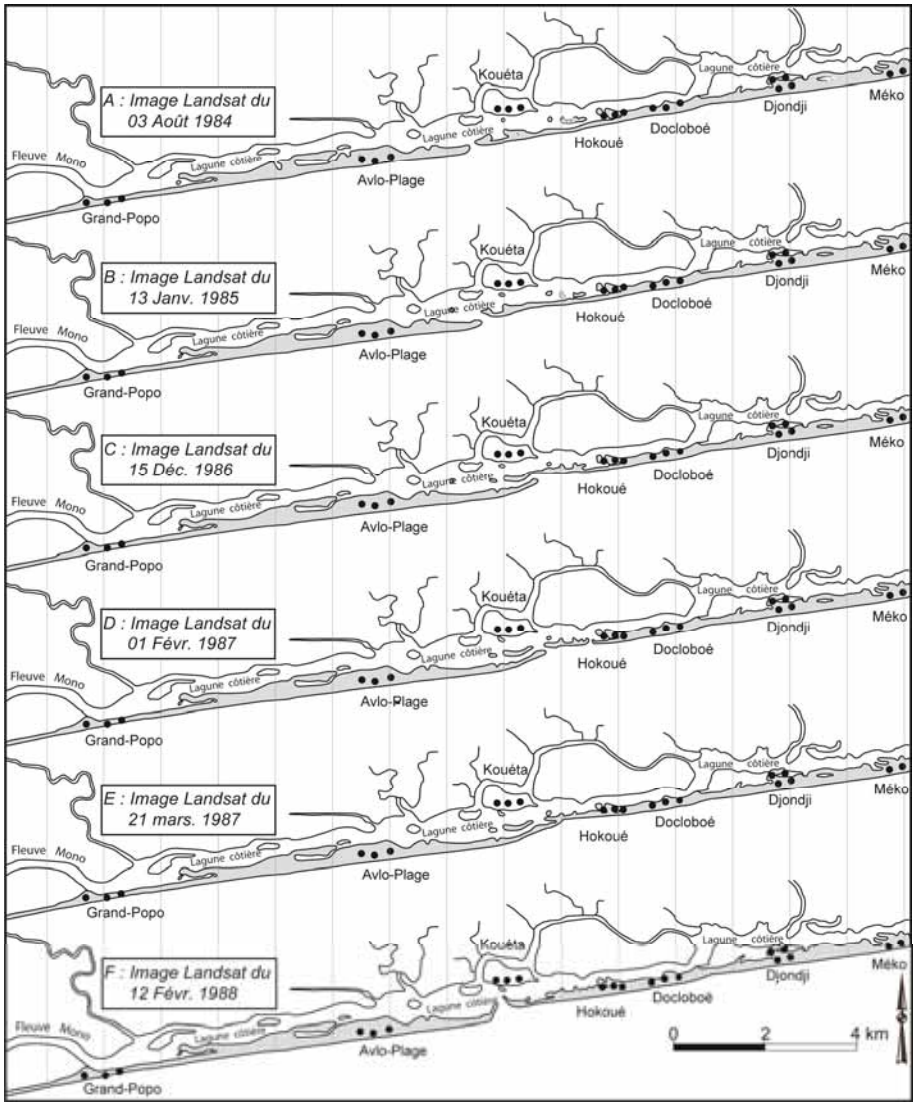


Figure 4 : Evolution de la Bouche du Roi et Dynamique morphologique de ses plages adjacentes avant la mise en service du barrage de Nangbéto

Bouche du Roi inlet evolution and its adjacent beaches morphological dynamics before the Nangbéto dam construction

4.1.2- Après la construction du barrage de Nangbéto

- Période de 1988 à 1999 : premier épisode de migration après le barrage (Fig. 5)

Après la mise en service du barrage de Nangbéto en juillet 1987, l'ouverture de la *Bouche du Roi* devient permanente. Depuis lors, cette embouchure montre une mobilité devenue particulièrement spectaculaire, à partir de 1995 (Agbani, 2000). Nous avons cherché à retracer son évolution entre 1988 et 1995. Les difficultés rencontrées dans cet exercice sont liées au fait que, entre 1991 et 1998, les images Landsat sont inexistantes pour le littoral du Bénin. Toutefois, en se basant sur les images Landsat de 1988 à 1991 et sur l'imagette SPOT du 28 août 1994, nous avons pu établir qu'entre février 1988 et août 1994, la *Bouche du Roi* a connu une mobilité restée limitée entre Avlo et Hokoué, c'est-à-dire à l'emplacement originel de Kouéta (figure 5A à figure 5C). La vitesse moyenne calculée sur une durée de 6,5 ans (entre février 1988 et août 1994 ; figure 5A à figure 5C), est de l'ordre de 230 m/an. Il faut signaler cependant qu'il ne nous a pas été possible de vérifier si, durant cet intervalle de temps, la *Bouche du Roi* a fonctionné avec une passe unique ou double.

Les figures 5C à 5D montrent qu'entre 1994 et 1999, la *Bouche du Roi* a connu une migration très rapide qui a entraîné de profondes modifications au sein des plages adjacentes, comparativement aux images des figures 5A et 5B. En effet, durant cette période, pendant que la plage amont de l'embouchure s'allongeait vers l'est sous forme d'une flèche sableuse (FL_87-99, figure 5), les eaux du fleuve Mono taillaient un second couloir d'écoulement en érodant sévèrement la plage aval, menaçant ainsi les hameaux de Hokouè, de Docloboé et de Djondji. En 1999, l'embouchure, dans sa migration, atteint les premières maisons du village de Djondji situé à 3 km à l'est de Hokouè (BR_{fm1}, figure 5D). Devant l'imminence de la destruction du village de Djondji, une ouverture a été opérée artificiellement le 25 juillet

1999, au sein de la plage amont près du village d'Avlo (BR_99, figure 5D), afin d'évacuer les eaux du fleuve Mono en mer. En moins de deux semaines après cette ouverture mécanique, la *Bouche du Roi* qui avait migrée vers Djondji (BR_{fm1}) s'est refermée par le transport sédimentaire littoral. Ainsi donc, sur une période de cinq ans (entre août 1994 et juillet 1999), l'embouchure a migré sur 3,8 km vers l'est, soit une vitesse moyenne de 760 m/an.

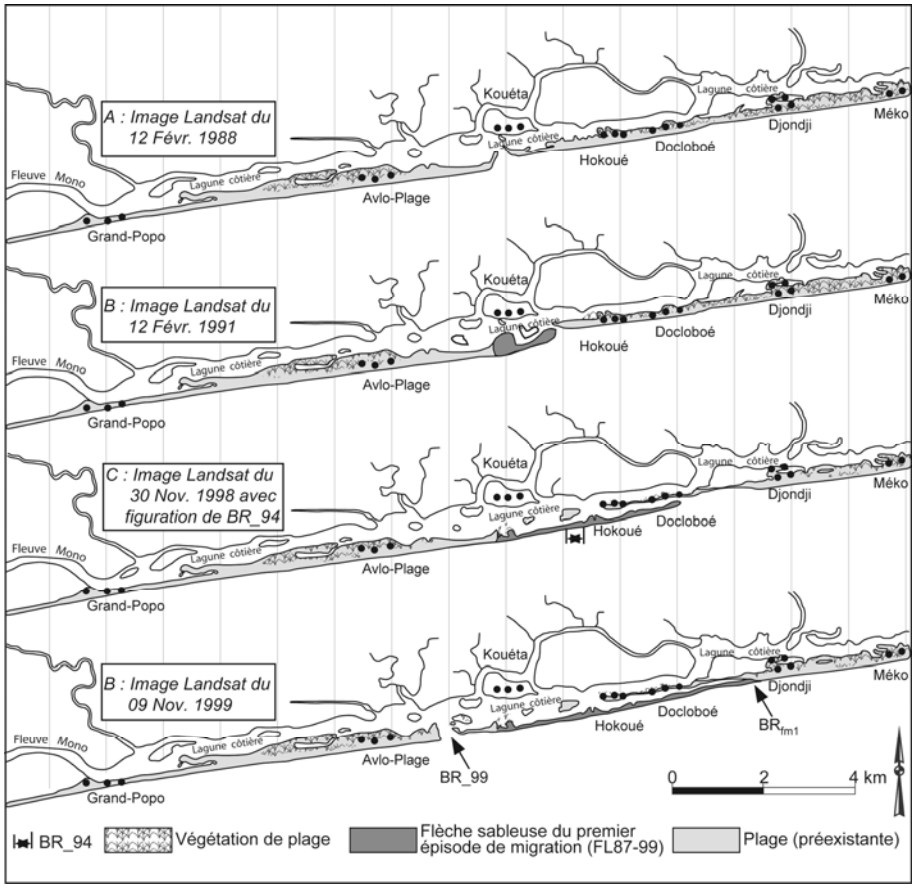


Figure 5 : Evolution de la Bouche du Roi et dynamique morphologique de ses plages adjacentes au cours du premier épisode de migration. *BR_94* : position de la Bouche du Roi repérée sur l'imagette SPOT du 28 août 1994. BR_{fm1} : position de la Bouche du Roi à la fin du premier épisode de migration (1987-1999) après la construction du barrage de Nangbéto.
Bouche du Roi inlet evolution and its adjacent beaches morphological dynamics during the first episode of migration. BR_94: Bouche du Roi inlet position on quick look SPOT image of August 28, 1994. BRfm1: Bouche du Roi inlet position at the end of the first episode of migration (1987-1999) after the Nangbéto dam construction.

- Période de 1999 à 2009 : deuxième épisode de migration après le barrage de Nangbéto (Fig. 6a et b)

Depuis le 25 juillet 1999, la *Bouche du Roi* a repris le même scénario de migration dans le sens de la dérive littorale. Sur la figure 6a, on constate qu'en deux ans environs, de novembre 1999 à septembre 2001, la *Bouche du Roi* a édifié une flèche de 320 m de long. La vitesse moyenne d'élongation est donc de l'ordre de 170 m/an. Mais il est important ici de noter que, durant cet intervalle de temps, la *Bouche du Roi* a fonctionné d'abord avec une passe unique puis ensuite avec une passe double. La première passe visible sur l'image A de la figure 6a est celle ouverte artificiellement en juillet 1999 alors que la deuxième (observée sur l'image C de la figure 6a) semble avoir été ouverte naturellement, sous l'effet des fortes crues d'août-septembre 2000 du fleuve Mono.

A partir de 2002, la *Bouche du Roi* a fonctionné avec une passe unique et sa migration a vertigineusement progressé vers l'est. Cette migration procède par élongation de la flèche sableuse FL_99-09 puis destruction progressive de la flèche FL_87-99 et des plages préexistantes (figure 6b). Vers la fin de l'année 2008, la *Bouche du Roi* dans sa migration approche son emplacement de 1999 (BR_{fm1}, figure 6b). Les phénomènes d'érosion reprennent en face du village de Djondji. Face à cette situation, les populations vont réussir à ouvrir à nouveau, une autre embouchure à Avlo, le 27 août 2009. Dès lors, la section de la *Bouche du Roi* ayant migré vers Djondji s'est réduite progressivement et a fini par se refermer en novembre 2009. L'image I de la figure 6b montre l'empreinte de l'embouchure refermée à Djondji (BR_{fm2}) et la brèche artificielle ouverte à Avlo (BR_09) le 27 août 2009.

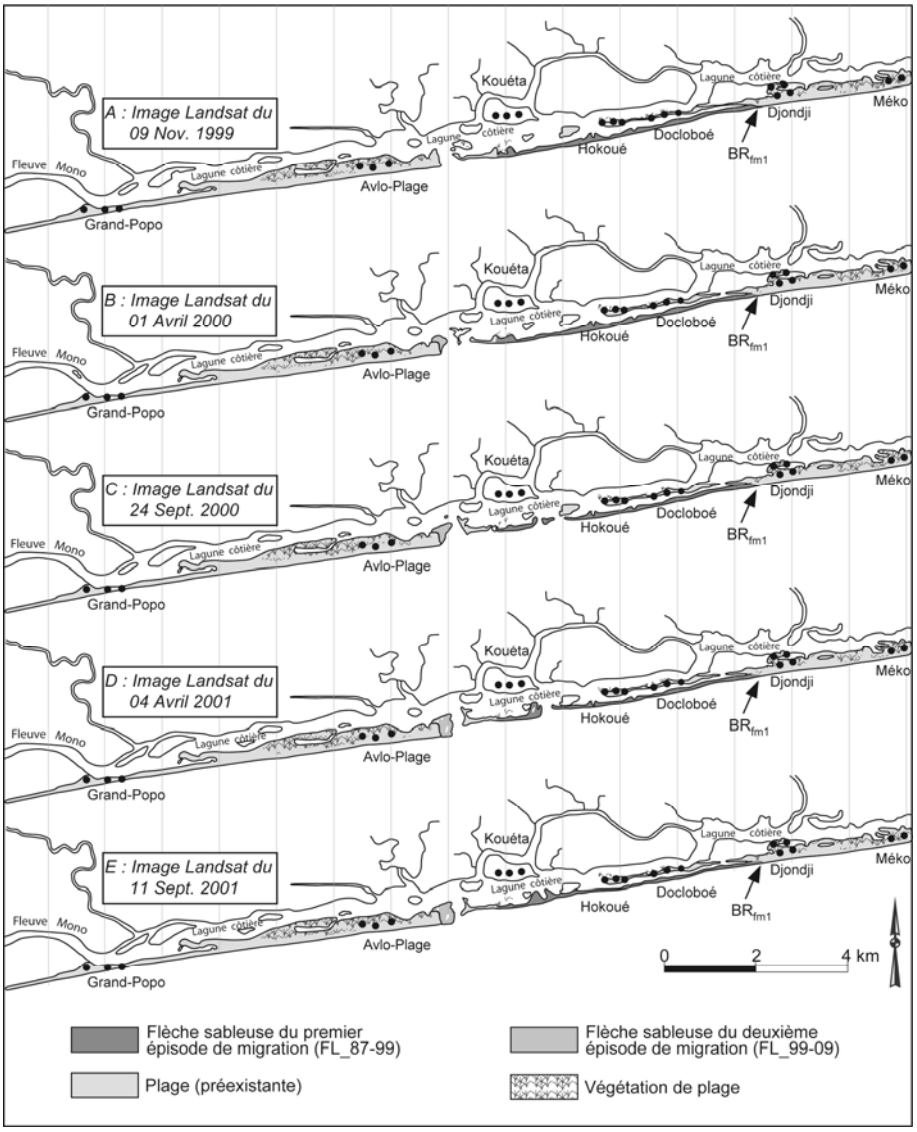


Figure 6a : Evolution de la Bouche du Roi et dynamique morphologique de ses plages adjacentes entre novembre 1999 et septembre 2001. BR_{fm1} : position de la Bouche du Roi à la fin du premier épisode de migration (1987-1999) après la construction du barrage de Nangbéto

Bouche du Roi inlet evolution and its adjacent beaches morphological dynamics between November 1999 and September 2001. BRfm1: Bouche du Roi inlet position at the end of the first episode of migration (1987-1999) after the Nangbéto dam construction.

Au cours de ce second épisode de migration, la *Bouche du Roi* a migré sur une distance de 4,7 km entre novembre 2002 et novembre 2008, ce qui fait une vitesse moyenne de 780 m/an.

En somme, on note qu'avant et après le barrage de Nangbéto, l'ouverture de la *Bouche du Roi* est associée à une migration qui s'effectue par édification de flèche sableuse. La vitesse moyenne de la migration est de l'ordre de 700 m/an ou 200 m/an selon que l'embouchure fonctionne avec une ou deux passes tidales.

Avant la construction du barrage de Nangbéto, l'ouverture de la *Bouche du Roi* était temporaire. Mais depuis juillet 1987, suite à la mise en service dudit barrage, l'ouverture de l'embouchure est devenue permanente, de même que les phénomènes de migration et d'édification de flèche sableuse qui lui sont associés. Depuis lors, la *Bouche du Roi* a connu deux épisodes de migration : le premier épisode a été interrompu en juillet 1999, grâce à une brèche pratiquée à Avlo. Le second épisode commencé dès lors s'est aussi arrêté en août 2009 grâce à une autre embouchure artificielle pratiquée à nouveau à Avlo.

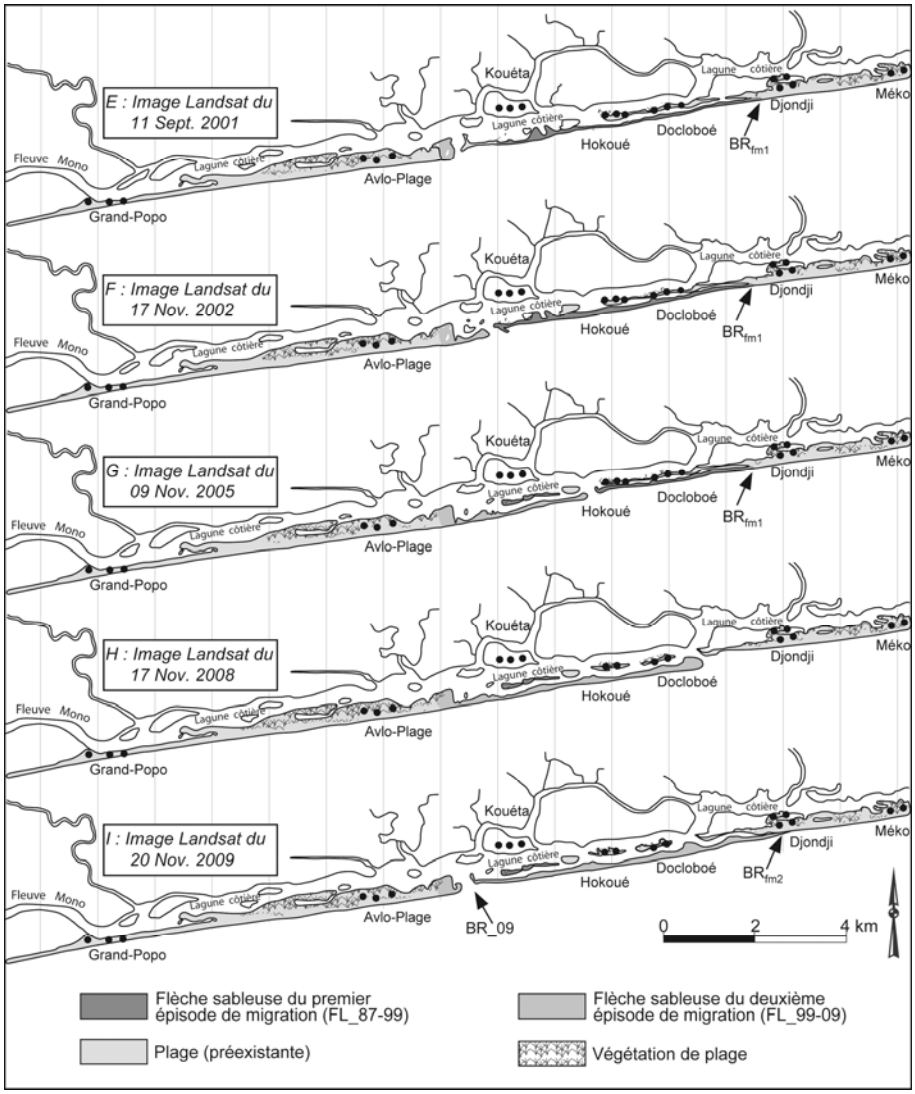


Figure 6b : Evolution de la Bouche du Roi et dynamique morphologique de ses plages adjacentes entre septembre 2001 et novembre 2009. BRfm1 : position de la Bouche du Roi à la fin du premier épisode de migration (1987-1999) après la construction du barrage de Nangbéto ; BRfm2 : position de la Bouche du Roi à la fin du deuxième épisode de migration (1999-2009) après la construction du barrage de Nangbéto

Bouche du Roi inlet evolution and its adjacent beaches morphological dynamics between September 2001 and November 2009. BRfm1: Bouche du Roi inlet position at the end of the first episode of migration (1987-1999) after the Nangbéto dam construction; BRfm2: Bouche du Roi inlet position at the end of the second episode of migration (1999-2009) after the Nangbéto dam construction.

4.2. Dynamique du trait de côte avant et après la mise en service du barrage de Nangbéto

Pour des raisons de commodité, nous avons limité les côtes adjacentes à la *Bouche du Roi* au secteur compris entre les localités de Grand-Popo et de Mèko. Ces deux limites ont constitué par le passé, les positions extrêmes occupées par les embouchures (naturelles ou artificielles) de l'estuaire du Mono-Couffo (Guilcher, 1959 ; Pliya, 1976, Blivi, 1993b).

Pour étudier les évolutions du rivage avant et après la mise en service du barrage de Nangbéto, chacun des traits de côte extraits sert de repère pour apprécier les variations engendrées par celui qui le succède. Ces variations sont traduites par une courbe qui exprime les évolutions observées sous forme de recul ou d'avancée de la ligne de rivage. L'ensemble des courbes obtenues est présenté sous forme de volets graphiques juxtaposés au secteur de côte étudié (figure 7 et figure 8).

L'analyse des figures 7 et 8 montre qu'au niveau de chacune des courbes, se distingue une zone de forte avancée du rivage qui correspond à une portion de flèche construite au cours de la migration de la *Bouche du Roi*. Cette portion de flèche est édifiée durant l'intervalle de temps qui sépare les deux traits de côte définissant la courbe considérée : *c'est la zone de dépô*t. Aussi, au niveau de chaque courbe, la zone de dépôt est-elle toujours associée à une zone de forte érosion qui délimite une crique au sein de la plage aval : *c'est la zone source*.

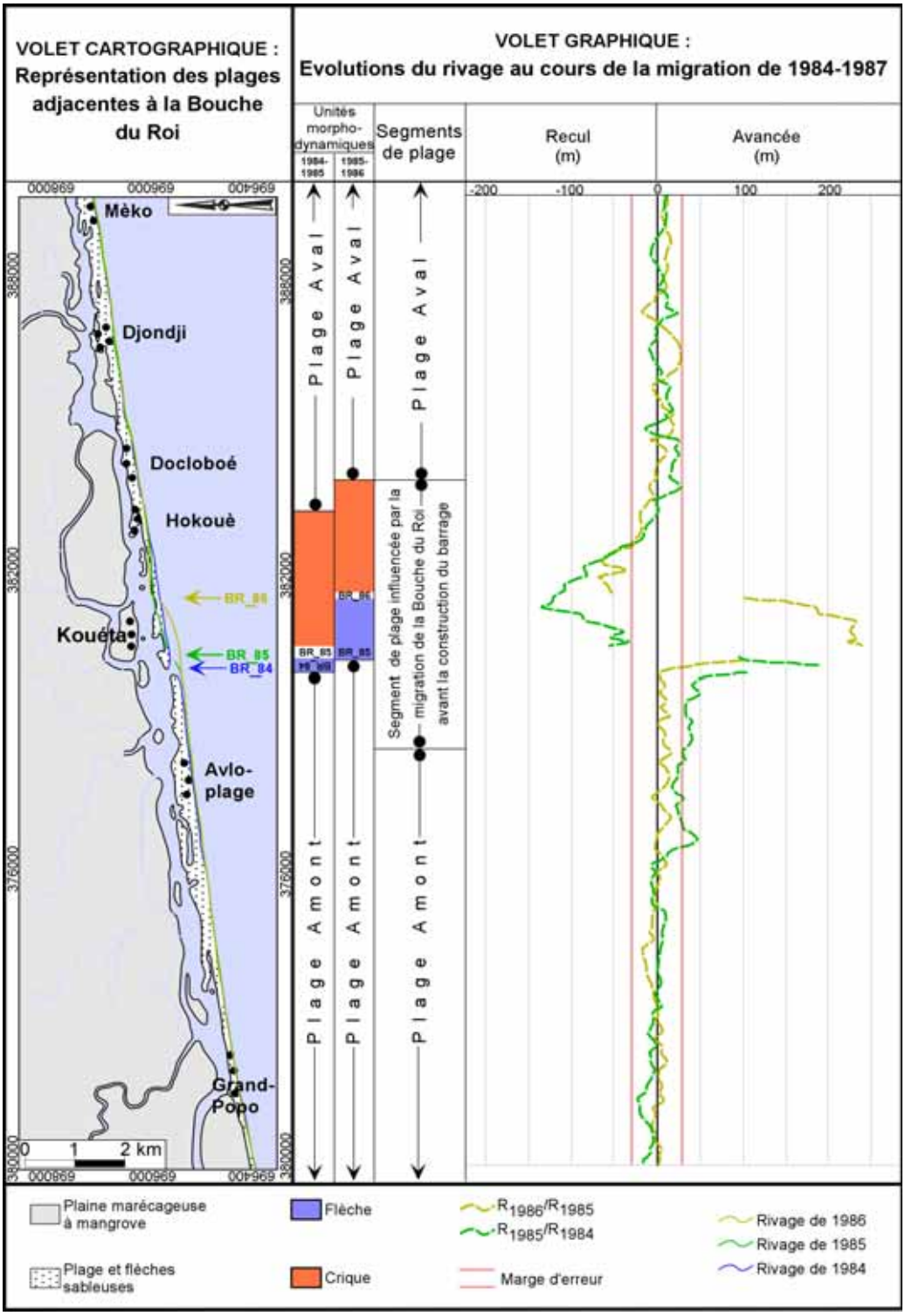


Figure 7 : Evolutions du rivage le long des plages adjacentes à la Bouche du Roi, avant la construction du barrage de Nangbéto. R1985/R1984 : évolution (avancée ou recul) engendrée par la ligne de rivage de 1985 par rapport à celle de 1984 (ligne de rivage repère).

Shoreline evolutions along Bouche du Roi inlet adjacent beaches, before the construction of Nangbéto dam. R1985/R1984: 1985 shoreline variations relative to 1984 shoreline.

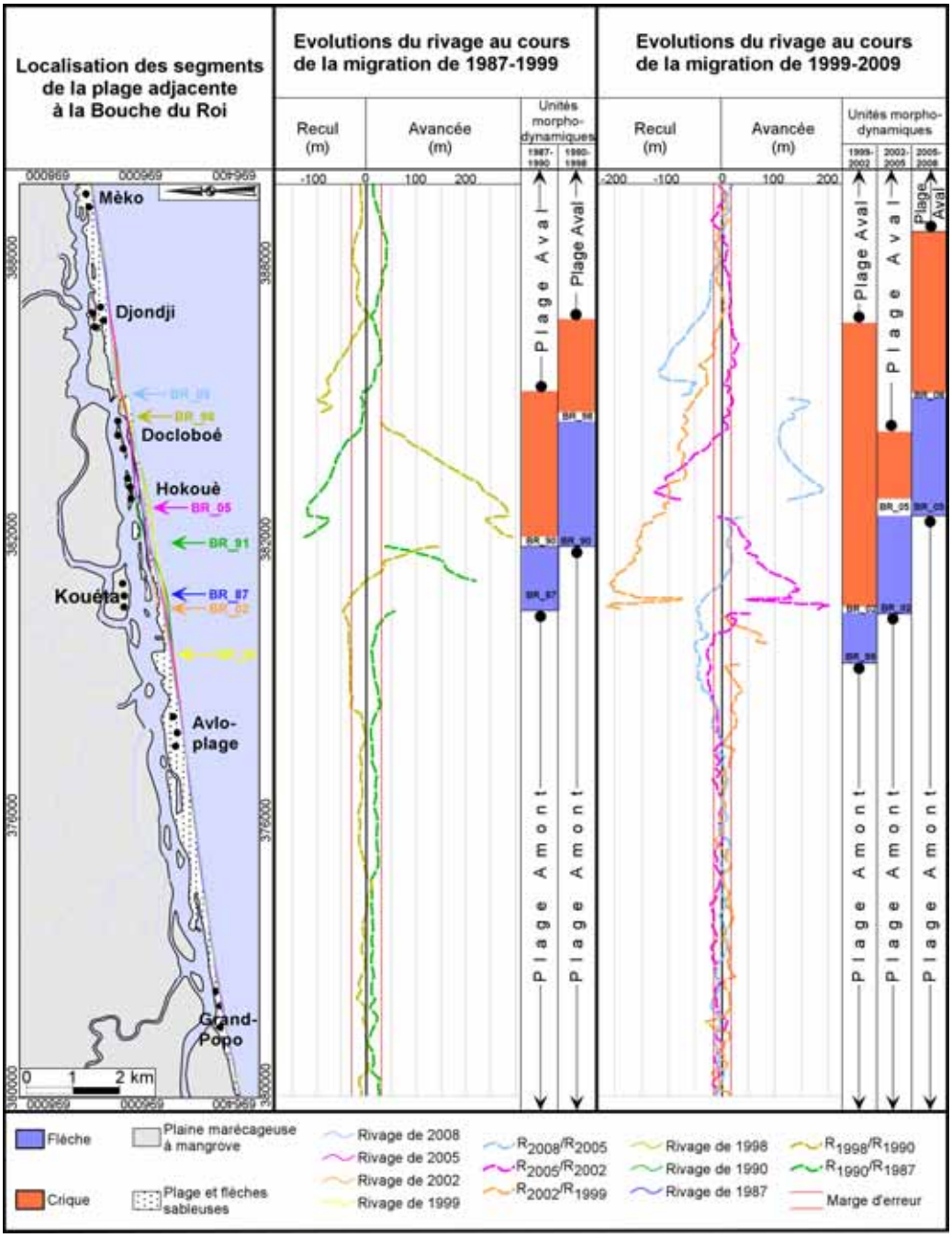


Figure 8 : Evolutions du rivage au cours des deux épisodes de migration de la Bouche du Roi après la construction du barrage de Nangbéto. *R_{2002}/R_{1999} : Variation du rivage de 2002 par rapport à celui de 1999*
Shoreline evolutions during both two migration episodes of the Bouche du Roi inlet, after the construction of Nangbéto dam.R2002/R1999: 2002 shoreline variations relative to 1999 shoreline

Il faut noter par ailleurs qu'au cours de la migration, pendant que la zone de dépôt prolonge la plage amont, la zone source s'étend d'ouest en est, entraînant ainsi la propagation de l'érosion au sein de la plage aval (figure 7 et figure 8).

D'autre part, pour chacun des deux épisodes de migration après le barrage, le bilan des évolutions du rivage a été apprécié à partir des traits de côte marquant le début et la fin de la migration. La figure 9 montre que la flèche sableuse édifiée au cours de la migration de 1987 à 1999 a entraîné une importante avancée du rivage, notamment entre Kouéta et Docloboé. Par contre, la migration de 1999 à 2009 a occasionné d'abord une importante érosion entre Kouéta et Docloboé, puis un engraissement notable entre Docloboé et Djondji. Le bilan des deux épisodes de migrations après le barrage se traduit globalement par une avancée du rivage au sein du segment de plage exposé à la migration de la *Bouche du Roi* (figure 9).

Le bilan des évolutions du rivage correspondant à la migration de 1984 à 1987 n'a pu être apprécié, car nous n'avons pas pu disposer du trait de côte ayant marqué le début de la migration. Toutefois ce bilan se traduirait par une

dynamique d'avancée et/ou de recul de rivage limitée entre Kouéta et Hokouè (figure 7), en raison de la courte durée de la période d'ouverture de la *Bouche du Roi*.

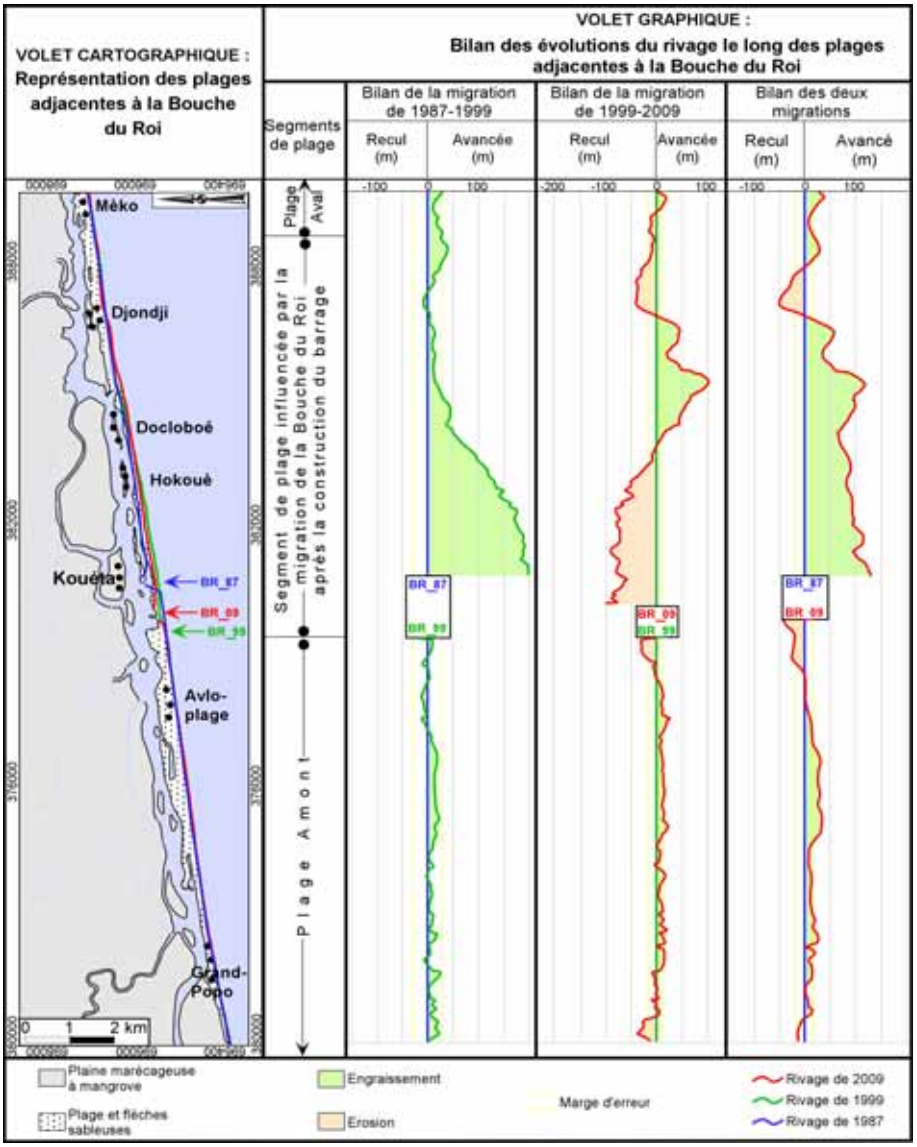


Figure 9 : Bilan des évolutions du rivage au cours des deux épisodes de migration de la Bouche du Roi après la construction du barrage de Nangbéto
Balance of shoreline evolutions during both two migration episodes of *Bouche du Roi* inlet after the construction of Nangbéto dam

5. DISCUSSION

Située sur une côte dont le moteur de la dynamique sédimentaire est la dérive littorale, la *Bouche du Roi* fonctionne comme une frontière latérale mobile entre deux cellules sédimentaires (figure 10). Par définition, une cellule sédimentaire, hydrosédimentaire ou morphosédimentaire, ou encore cellule de dérive, est définie comme une section de côte en situation de bilan sédimentaire global équilibré, le long de laquelle circulent les sédiments (Cohen *et al.*, 2002). Elle comprend quatre frontières (Certain et Barusseau, 2002) : la frontière terrestre, fermée, constituée par les dunes et la plage émergée ; la frontière marine, ouverte ; deux frontières latérales plus ou moins imperméables marquant, l'une, la zone de départ du transit littoral [zone source (a)], l'autre le secteur d'accumulation du sable qu'il a transporté [zone-puits (c)]. Les deux zones (source et puits) sont unies par une zone de transition (b). En général, il existe un étroit parallélisme entre érosion et zone source, accrétion et zone-puits, tandis qu'entre les deux règne plutôt une stabilité (zone de transition).

Lorsqu'elle fonctionne, la *Bouche du Roi* définit donc la zone puits d'une cellule sédimentaire située à l'amont-dérive de l'embouchure et la zone source d'une autre cellule située à l'aval-dérive (figure 10). La zone puits se présente sous la forme d'une flèche sableuse s'allongeant dans le sens de la dérive littorale, alors que la zone source se traduit par une crique en migration le long de la plage aval. On parlera d'un système de flèche-crique ; un couple d'unités

morphodynamiques identifiable au système de poulier-musoir typique des embouchures d'estuaires à dominance de houle et de marée.

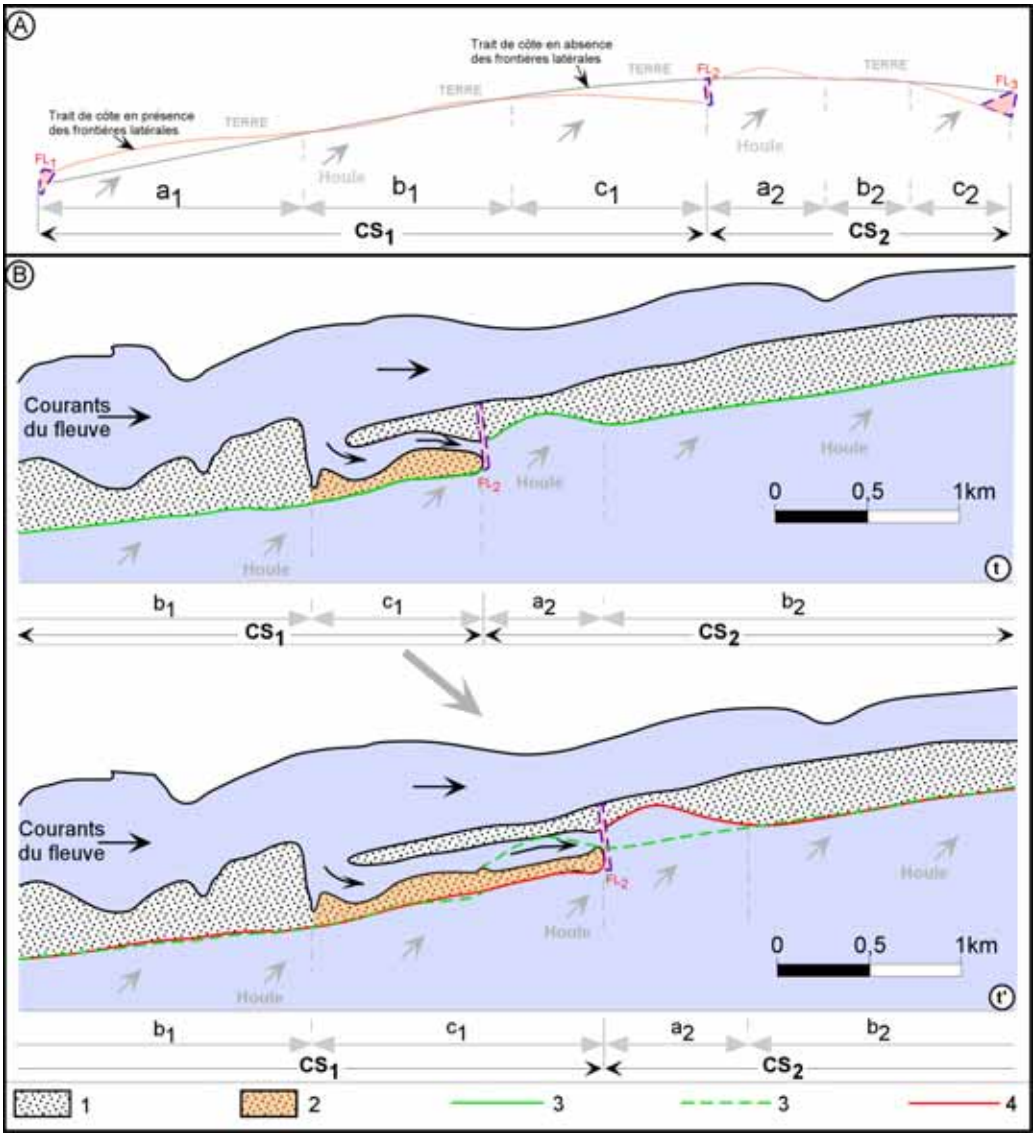


Figure 10 : Illustration du fonctionnement des cellules sédimentaires (A) et réponses des plages face à la mobilité d'une frontière latérale (embouchure) entre deux cellules sédimentaires (B). *FL_1.- Frontière latérale n°1 ; FL_2.- Frontière latérale n°2 : elle correspond à l'embouchure en migration sur la figure 10B ; CS_1.- Cellule sédimentaire n°1 ou cellule sédimentaire amont ; CS_2.- Cellule sédimentaire n°2 ou cellule sédimentaire aval. Les cellules amont et aval sont définies par rapport à FL_2 et en fonction de la direction de la dérive littorale. (1).- Cordons préexistants ; (2).- Flèche sableuse ; (3).- Ligne de rivage à l'instant **t** de l'évolution de l'embouchure ; (4).- Ligne de rivage à l'instant **t'** de l'évolution de la migration de l'embouchure. (a_1).- Zone source de la cellule sédimentaire amont ; (b_1).- Zone de transition de la cellule sédimentaire amont ; (c_1).- Zone de dépôt de la cellule sédimentaire amont : elle correspond à la flèche sableuse (2) ; (a_2).- Zone source de la cellule sédimentaire aval : elle correspond à la zone de crique des lignes de rivage (3) et (4) ; (b_2).- Zone de transition de la cellule sédimentaire aval.*

*Illustration of drift cells functioning (A) and shore responses facing a lateral border (inlet) mobility between two drift cells (B). FL_1.- Lateral border n°1 ; FL_2. - Lateral border n°2 corresponding to the migrant inlet on figure 10B; CS_1.- Sedimentary cell n°1 or upstream drift cell; CS_2. - Sedimentary cell n°2 or downstream sedimentary cell. The upstream and downstream cells are defined in relation to FL_2 and according to the direction of coastal drift. (1).- pre-existent beach; (2).- Spit ; (3).- Shoreline at moment **t** of the inlet evolution ; (4).- Shoreline at moment **t'** of the inlet evolution. (a_1). - Source zone of upstream sedimentary cell; (b_1). - Transition zone of upstream sedimentary cell; (c_1). Depositing zone of upstream sedimentary cell corresponding to the sandy spit (2); (a_2) - Source zone of downstream sedimentary cell corresponding to creek zones of shorelines (3) and (4); (b_2). - Transition zone of downstream sedimentary cell.*

La vitesse d'élongation de la flèche est particulièrement élevée (700 m/an) lorsque l'embouchure fonctionne avec une passe unique. Ceci est sans doute dû à l'importance de la dérive littorale qui draine plus d'un million de m³ de

sédiments par an, le long de la côte. Toutefois, il semble que cette vitesse d'élongation est influencée par plusieurs autres paramètres dont notamment :

- la pluralité de passes tidales : la vitesse d'élongation des flèches semble être considérablement réduite lorsque l'embouchure fonctionne avec plusieurs passes ;
- la largeur du corps de la flèche édifiée : la vitesse d'élongation ralentirait lorsque la largeur de flèche à construire est grande. Elle s'accélérerait si la largeur de la flèche à édifier est petite.
- l'importance du débit d'eau douce traversant l'embouchure : la vitesse de migration semble être maximale pour un débit critique au-delà duquel celle-ci ralentit. En deçà de ce débit critique, l'embouchure a tendance à se fermer.

D'autre part, si la vitesse de migration de la crique (zone source) peut être corrélée au rythme d'élongation de la flèche (zone puits), l'étendue de celle-ci semble être dictée par la rigueur du climat de houle, l'importance de la charge solide apportée par le fleuve tributaire, et la pluralité des passes.

Ces différents paramètres sus-cités, qui influencent, soit la vitesse d'accrétion de la flèche soit l'étendue de la crique, n'ont pu être tous mis en évidence dans ce travail. En effet, les images Landsat disponibles ne permettent pas d'apprécier les vitesses d'élongation qui correspondent aux segments larges et moins larges des corps de flèches édifiées. Aussi, les scènes Landsat sont-elles rares, voire inexistantes pour les mois de juin à septembre qui correspondent aux hautes eaux du Mono.

Par contre, l'influence de la pluralité des passes sur la vitesse de l'élongation de la flèche et l'étendue de la crique semble être perçue au cours de la migration de 1999 à 2009. En effet pour cet épisode de migration, chacun des trois intervalles de temps considérés dans l'étude des évolutions du rivage a une durée de 3 ans. Cependant, par rapport aux unités morphodynamiques des périodes de 2002-2005 et de 2005-2008, la taille de la flèche édifiée entre 1999 et 2002 a été beaucoup plus réduite alors que la crique qui lui est associée a une extension beaucoup plus grande. Dans l'hypothèse de la constance des autres paramètres énumérés ci-dessus, la petite taille de la flèche de 1999-2002 et la grande extension de la crique qui lui est associée, seraient dues au fait que la *Bouche du Roi* a fonctionné avec deux passes tidales, entre avril 2000 et septembre 2001. Le fonctionnement de l'embouchure avec deux ouvertures simultanées aurait donc contraint la flèche dans son élongation et provoqué une extension démesurée de la crique développée sur la plage aval.

Avant la mise en service du barrage, la migration de la *Bouche du Roi* et de ses unités morphodynamiques n'était possible que lorsque les écoulements du fleuve Mono étaient suffisants pour entretenir l'ouverture de l'embouchure. C'est donc en période de hautes eaux du Mono, entre juin et octobre que cette migration avait la chance de se produire. Après la construction du barrage, la régularisation des écoulements du Mono a permis de maintenir en permanence l'ouverture de la *Bouche du Roi* ; ce qui a autorisé la persistance des phénomènes de migration d'embouchure et du système de flèche-crique qui lui est associée. Depuis lors, le segment de plage exposé à la migration s'est étendu vers l'est, par édification de flèche sableuse à l'amont de l'embouchure et destruction des cordons préexistants à l'aval. Actuellement, la portion de côte exposée est limitée à un linéaire côtier de 10 km entre Avlo et Djondji, grâce aux populations riveraines qui effectuent des brèches régulières à l'amont (vers Avlo), avec une périodicité de 10 ans. Avant le barrage, l'étendue du segment de côte exposé n'était que de 5 km, en face de Kouéta.

A la mise en service du barrage, la persistance de l'ouverture de la *Bouche du Roi* paraissait évidente à la lecture du nouveau régime hydrologique du fleuve Mono. En 1992, un modèle mathématique a été conçu par SOGREAH pour prévoir les réponses de l'embouchure face aux modifications induites par le barrage (figure 11). Ce modèle montre qu'après la mise en eau du barrage, la fourniture de la charge de fond à la dérive littorale par le fleuve Mono passerait de 100 000 m³/an à 25 000 m³/an en 25 ans.

Deux scénarios d'évolution de la côte au voisinage de l'embouchure ont donc été réalisés :

- le premier est développé dans les conditions d'absence de barrage c'est-à-dire avec la fourniture des 100 000 m³ de sable par le Mono. La courbe jaune représente l'enveloppe d'engraissement de la côte qui montre sur 25 ans (1987-2012) une avancée maximale de 20 m, sur une distance de 20 km, de part et d'autre de l'embouchure ;

- le deuxième scénario a simulé le comportement de la côte pour un budget de 25 000 m³/an. Ce dernier montre que sur 25 ans, le rivage connaîtrait un engraissement maximal de 5 m sur une distance de 12 km de part et d'autre de l'embouchure.

Il ressort donc de cette simulation que malgré tout, d'ici 2012, il devrait avoir une stabilité voire un engraissement relatif du rivage au voisinage de l'embouchure avec, de temps à autre, des possibilités de rupture de cordon de plage et/ou de migration de la *Bouche du Roi* à des vitesses ne dépassant pas 1 km/5ans (Blivi, 2000).

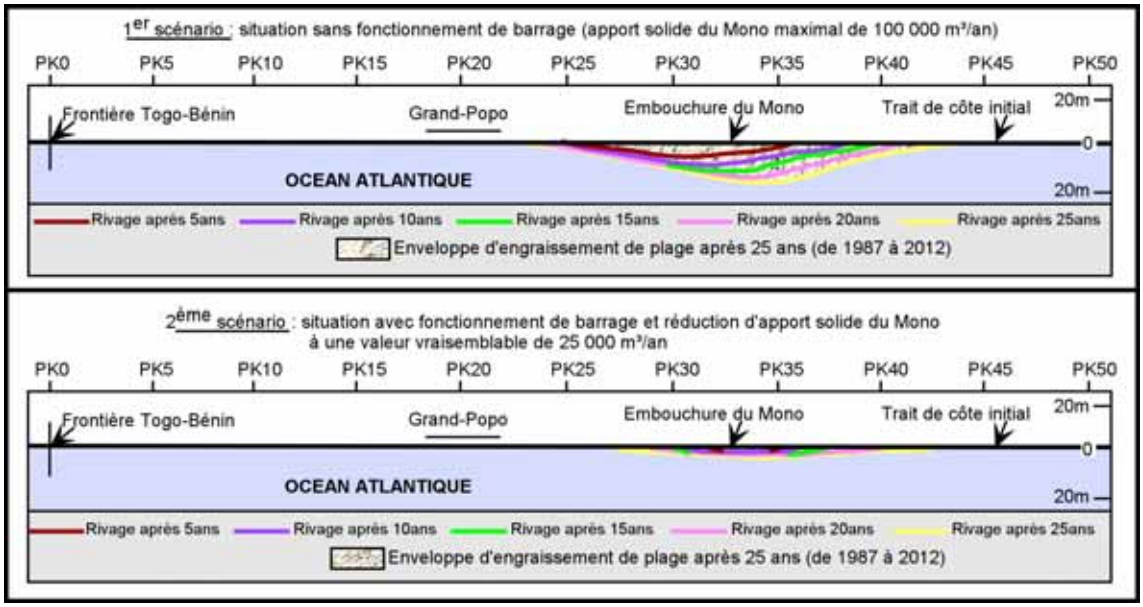


Figure 11 : Projection de l'évolution du rivage au voisinage de la Bouche du Roi, sur une période de 25 ans, de 1987 à 2012 (SOGREAH, 1992 *in* Blivi, 2000)
Shoreline evolution projection in vicinity of *Bouche du Roi* inlet, along a 25 years period, from 1987 to 2012 (SOGREAH, 1992 in Blivi, 2000)

Lorsqu'on observe le bilan des évolutions du rivage correspondant aux deux épisodes de migration après le barrage, l'avancée globale qui caractérise la portion de côte exposée à la migration de l'embouchure pourrait correspondre à la prévision du modèle de SOGREAH (figure 9 et figure 11). Mais il faut noter que, contrairement à ce que traduit ce modèle de prévision, cette avancée du rivage, favorisée par l'édification des flèches sableuses, ne semble pas être liée essentiellement à la charge solide apportée par le fleuve Mono. Les travaux s'intéressant aux mécanismes d'édifications de flèches montrent que celles-ci sont plutôt en relation avec un budget sédimentaire drainée par la dérive littorale (Evans, 1942 ; Kraus, 1999 ; Ashton et Murray, 2006 ; Petersen et *al.*, 2008). Par ailleurs, l'apport du fleuve Mono qui ne représentait que le dixième du budget de la dérive littorale avant 1987 (en absence de barrage) devrait être beaucoup plus réduit de nos jours (après plus de vingt années de fonctionnement de ce barrage). La progradation du rivage aux voisinages de la *Bouche du Roi* est donc, de toute évidence, liée à la dérive littorale et non au volume des sédiments apportés par le Mono. En réalité, les évolutions observées depuis 1987 ne sont pas liées à la diminution de la charge sédimentaire du Mono par le barrage, mais plutôt à la modification du régime hydrologique du fleuve. En assurant la persistance de l'ouverture de la *Bouche du Roi* , le nouveau régime hydrologique du Mono autorise, depuis 1987, la permanence des phénomènes de migration d'embouchure et d'édification de flèche sableuse qui caractérisaient le secteur bien avant la mise en service du barrage.

D'autre part, la vitesse de migration prévue par le modèle de SOGREAH est de 1 km/5ans. Mais la vitesse réelle représente près du quadruple de la prévision. C'est donc cette vitesse alarmante de 700 m/an à laquelle s'effectue la migration de la *Bouche du Roi* et ses unités morphodynamiques qui explique la destruction progressive mais relativement rapide des cordons préexistants, ruinant ainsi les habitations et les infrastructures socio-écononomiques installées le long de la côte.

6. CONCLUSION

L'analyse des séries d'images Landsat a permis de suivre l'évolution de la *Bouche du Roi* et la dynamique de ses plages adjacentes aussi bien avant qu'après la mise en service du barrage de Nangbéto. Cette étude qui constitue une application de la télédétection, montre que la *Bouche du Roi* représente une limite latérale mobile entre deux cellules sédimentaires. En effet, le fonctionnement de cette embouchure définit la zone puits d'une cellule située à l'amont dérive de l'embouchure et la zone source d'une autre cellule située à l'aval dérive. La zone puits se présente sous forme de flèche sableuse qui prolonge la plage amont en s'élongeant dans le sens de la dérive littorale alors que la zone source se traduit par une crique en migration le long de la plage aval. Cette dynamique est caractéristique des embouchures d'estuaires inféodés aux littoraux à dominance de houle oblique.

Avant la construction du barrage de Nangbéto, le rythme hydrologique du fleuve Mono ne permettait pas une ouverture permanente de la *Bouche du Roi*. La dynamique du couple flèche-crique associé au fonctionnement (à l'ouverture) de l'embouchure était donc limitée dans l'espace et dans le temps. Avec la régularisation des débits du Mono par le barrage, l'ouverture de la *Bouche du Roi* est devenue persistante. Dès lors, la migration de l'embouchure est devenue

permanente. Elle s'effectue par édification de flèche sableuse à l'amont (zone puits) et destruction progressive de plage à l'aval (zone source). Le bilan des évolutions du rivage le long du segment de côte exposé à la migration de l'embouchure se traduit par une avancée du rivage essentiellement imputable non pas à l'apport du fleuve Mono, mais à la charge sédimentaire mobilisée depuis l'ouest par la dérive littorale.

Remerciements

Nous tenons à remercier sincèrement l'USGS, la société américaine des études géologiques, pour avoir rendu gratuit le téléchargement des images satellitaires Landsat sans lesquelles cette étude n'aurait pu être effectuée.

Références bibliographiques

Agbani Marielle A. (2000) Dynamique fluivio-lacustre et impacts environnementaux dans le Sud-Ouest du Bénin (Afrique de l'Ouest). DEA en Gestion de l'Environnement. EDP/UAC (République du Bénin). 61p.

Adjoussi P. (2008) Analyse de vulnérabilité des paysages de la zone côtière de la Volta au Mono à l'élévation du niveau marin. Thèse de doctorat. Univ. de Lomé. Version provisoire. 386 p + annexes.

Ago E. E. (2005) Analyse des risques d'inondation du barrage hydroélectrique de Nangbéto au Togo et au Bénin. Travail de fin d'étude pour l'obtention du DES-IU, Orientation Climatorisque. Laboratoire de Géographie physique. Univ de Liège – Belgique. 63 p.

Anthony E.J., Blivi A.B. (1999) Morphosedimentary evolution of a delta-sourced, drift-aligned sand barrier–lagoon complex, western Bight of Benin. *Marine Geology 158, p. 161–176*

Anthony E. J., Lang J. and Oyédé L. M. (1996) Sedimentation in tropical, microtidal, wave-dominated coastal-plain estuary. *Sedimentology*. 43, p. 665-675.

Ashton and Murray, 2006. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits and capes. *Journal of Geophysical Research*, 111, p. 422 (F04, 011).

Blivi A.B. (1993a) Morphologie et dynamique actuelle de la côte du Togo. *Revue internationale d'écologie et de géographie tropicales*, 17(1-4), p. 25-39.

Blivi A. B. (1993b) Géomorphologie et dynamique actuelle du golfe du Bénin. Thèse doct., Univ. Bordeaux 3, 458 p.

Blivi A.B. (2000) Effet du barrage de Nangbeto sur l'évolution du trait de côte : une analyse prévisionnelle sedimentologique. *J. Rech. Sci.Univ. Bénin - Togo*, 4(1), p. 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. 225 p.

Bokonon-Ganta E. (1987) Les climats de la région du Golfe du Bénin (Afrique de l'Ouest). Thèse de 3è cycle de l'Université de Paris IV-Sorbonne, 248 p.

Certain R., Barusseau J-P. (2002) Contrôles météo-marins et géologiques du bilan sédimentaire des prismes littoraux sableux – Conséquences en matière d'aménagement. *In* érosion littorale en Méditerranée Occidentale. CIESM Workshop Series. 18, p. 25-29

Cohen O, Dolique F., Anthony E. J., Hequette A. (2002) L'approche morphodynamique en géomorphologie littorale. In. Le Littoral : *Regards, Pratiques et Savoirs*. éd. Rue d'ULM, p. 191-211

Coyne M.A., Fletcher C. H., Richmond B.M. (1999) Mapping coastal erosion hazard areas in Hawaii : Observations and errors. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 28, p. 171 - 184.

Evans, O.F., 1942. The origin of spits, bars and related structures. *J. of Geology*. 50, p. 846–865.

Faye Ibrahima B. ND. (2010) Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photointerprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes. Thèse de Géographie de l'Université de Bretagne Occidentale. 296p + Annexes.

Guilcher A. (1959) La région côtière du Bas-Dahomey occidental. *Bull. IFAN,* t. XXI, n° 3 et 4, p. 357-424.

Kaki C., Oyede L. M., Yessoufou S. (2001) Dynamique sédimentaire et environnement côtier du littoral béninois à l'Est de l'embouchure du fleuve Mono. *J. Rech. Sci. Univ. Bénin* (Togo), 2001, 5(2), p. 247-261.

Kraus, N.C., 1999. Analytical model of spit evolution at inlets. *Proceedings of Coastal Sediment*s 1999, ASCE, p. 1739- 1754.

LACKNER & Partners (1983) Etude de l'ensablement de l'accès au port de Lomé. Rapport d'étude, Bremen, Ministère de l'Equipement, Lomé.

Lang J., Paradis G., Oyédé L. M. (1988) Le domaine margino-littoral du Bénin (Golfe de Gunée – Afrique de l'Ouest) : âge holocène et mise en place marine des "sables jaunes". *Journal of African Earth Sciences*. 7, p. 823-833.

LCHF (1984) Projet Erosion Littorale du Togo. Rapport d'étude et propositions d'aménagement, 80p. Université de Lomé

Moore L. J., Griggs G.B. (2002) Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, vol. 181, n°1-3, p. 265 - 283.

NEDECO (1975) Erosion littorale sur la côte togolaise. Rapport d'étude. Ministère des travaux Publics, Lomé, 73 p.

Oyédé L. M. (1991) Dynamique sédimentaire actuelle et messages enregistrés dans les séquences quaternaires et néogène du domaine margino-littorale du Bénin (Afrique de l'Ouest). Thèse Doctorat nouveau régime, Université de Bourgogne et Université Nationale du Bénin, 302 p.

Oyédé L.M., Kaki C. (1998) Quinze mois d'observations et de relevés de paramètres physico-chimiques sur le littoral et la lagune côtière du Bénin (Mars 1996 - Mai 1997) : Dynamique sédimentaire et environnement. Rapport interne, FAST, Université Nationale du Bénin, 61p.

Petersen Dorthe, Deigaard Rolf, Fredsøe Jørgen (2008) Modelling the morphology of sandy spits. *Coastal Engineering* 55, p. 671–684.

Pliya J. (1976) La pêche continentale et maritime dans le Sud-Ouest de la République Populaire du Bénin. Thèse de Doctorat de 3ème cycle de Géographie Appliquée. Univ. Paris X – Nanterre. 308 p.

PNUD (1987) Étude de l'impact du barrage de Nangbéto sur la basse vallée de l'estuaire du Mono. Rapport d'étude de l'Université du Bénin et du Laboratoire Central d'hydraulique de France (Ministère du Plan et de l'Industrie). 81 p., dactylographié.

Rossi G. (1987) Un Exemple d'utilisation d'une défense naturelle contre l'érosion littorale : le grès de plage. Inédit

Rossi G. (1989) L'Erosion du littoral dans le Golfe du Bénin : un exemple de perturbation d'un équilibre morphodynamique. *Zeitschrift für Geomorphologie: Supplementbände*, 73, p. 139-165.

Rossi G. et Antoine P. (1990) Impacts hydrologiques et sédimentologiques d'un grand barrage : l'exemple de Nangbéto (Togo-Bénin). *Revue de géomorphologie dynamique*. Tome XXXIX, p. 63-77.

Rossi G., Baritse L., Blivi A.B. (1991) Du modèle à la nature : l'exemple de la côte Togolaise. Inédit.

Rossi G., Blivi A.B. (1995) Les conséquences des aménagements hydrauliques de la vallée du Mono (Togo-Bénin). Saura-t-on gérer l'avenir ? *Les Cahiers d'outre-mer*, 192, p. 435-452

Robin M. (2002a) Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. In. Le Littoral : *Regards, Pratiques et Savoirs*. éd. Rue d'ULM. p. 95-115

Sitarz J.A. (1960) Côtes africaines : Etude des profils d'équilibre de plage. Trav. Centre d'Etude et de Recherche en Océanographie, T3, fasc. 4, pp.43-62.

SOGREAH (1992) Barrage d'Adjarala (Togo-Benin). Etudes d'impacts hydrauliques et sédimentologiques. Rapport d'Etudes. Université de Bordeaux III, 105p.

Tastet J.-P. (1979) Environnement sédimentaire et structuraux quaternaires du littoral du Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin). Thèse d'Etat, Univ de Bordeaux. 621. Vol. I : 181p et Vol.II : 125 Figs.

Thieler E.R., Ergul A., Martin D., Thompson, M. (2004) Tutorial for the Digital shoreline analysis system (DSAS) version 2.2.1. Extension for ArcView. USGS / PEROTSYSTEMS, 30 p.

Toffi D.M. (1991) Ressources climatiques et activités salicoles sur le littoral occidental du Bénin. Memoire de DEA. Centre de recherches de Climatologie Tropicale. Univ. de Bourgogne. 167 p.