

Influences des Epis sur la Dynamique du Trait de Côte au Bénin

[Influences of the Ears on the dynamics of the Coast Train in Benin]

VIEYRA H. Emmanuel, BOTON K. Eric, VISSIN Expédit W.

Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi (Bénin) 03 BP 1122, Cotonou, Bénin



Résumé – L'équilibre entre le dépôt de sédiments et leur redistribution par les courants côtiers déterminent la stabilité d'une plage, tandis que le déséquilibre en faveur de l'un de ces deux facteurs entraîne respectivement l'engraissement ou l'érosion du littoral. L'érosion côtière, devenue particulièrement grave en 1999, le Bénin a opté pour la solution de construction d'épis, projet concrétisé en 2014. Pris ensemble avec la principale jetée, les huit épis, implantés entre l'embouchure de la lagune de Cotonou et PK10 Ekpe-plage, protègent environ 20 km de plage sur 125 km, de la localité d'Adouanko, à l'Ouest du port de Cotonou au KP10 à l'Est. La présente étude se fixe comme objectif d'apprécier l'impact des épis aménagés sur le phénomène de l'érosion côtière au Bénin.

La méthodologie adoptée qui allie recherche documentaire et techniques de télédétection et des SIG, s'appuie sur la démarche diachronique en recourant aussi aux analyses statistiques. Il ressort que depuis que la linéarité de la côte est perturbée du fait des « infrastructures obstacles » dressées, la circulation naturelle des sédiments est sérieusement limitée. Les jetées des ports de Lomé et de Cotonou puis les différentes générations d'épis, agissant comme des obstacles, participent à l'aggravation de l'érosion côtière tant que toute la côte n'en sera pas pourvue. La vitesse d'érosion côtière de 7,02 m/an de 1960 à 2009, avec plus de 1135 ha de terres englouties est passée à 5,10 m/an de 2009 à 2018, après la construction des épis induisant 321 ha. L'érosion côtière touche désormais la côte Est de l'épi de Sifato (Cotonou jusqu'à Kraké), les segments d'Hilacondji-Agoué, Grand-Popo-Avlo et Avlékété-Togbin ; contrairement à la concentration de l'activité érosive marine à l'Est de Cotonou et quelque peu à Grand-Popo de 1960 à 2009. Une prédiction à partir du rythme actuel et s'il se maintient expose le tronçon, poste de pesage et de péage – frontière Kraké, de la route RNIE2 à une disparition certaine d'ici l'an 3000. Il urge de protéger le reste de la côte par implantation d'autres ouvrages en enrochements (épis), mais aussi bien des brise-lames.

Mots clés – Epi, érosion côtière, trait de côte, littoral.

Abstract – The equilibrium between sediment deposition and their redistribution by coastal currents determines the stability of a beach, while the imbalance in favor of one of these two factors leads respectively to the fattening or the erosion of the littoral. Coastal erosion became particularly serious in 1999, Benin opted for the solution of construction of ears, project materialized in 2014. Taken together with the main pier, the eight ears, implanted between the mouth of the lagoon of Cotonou and PK10 Ekpe-beach, protect about 20 km of beach on 125 km, from the locality of Adouanko, west of the port of Cotonou to KP10 in the East.

The objective of this study is to assess the impact of developed spikes on the phenomenon of coastal erosion in Benin. The methodology adopted, which combines documentary research and remote sensing and GIS techniques, is based on the diachronic approach, using statistical analysis as well. It turns out that since the linearity of the coast is disrupted by the "obstacle infrastructure" erected, the natural circulation of sediments is seriously limited. The jetties of the ports of Lomé and Cotonou then the different generations of ears, acting like obstacles, participate in the aggravation of the coastal erosion until the whole coast will not be provided with it. The coastal erosion rate of 7.02 m / year from 1960 to 2009, with more than 1135 ha of sunken land increased to 5.10 m / year from 2009 to 2018, after the construction of the spurs inducing 321 ha. Coastal erosion now affects the east coast of the Sifato spit (Cotonou to Kraké), the Hilacondji-Agoué, Grand-Popo-Avlo and Avlékété-Togbin segments; unlike the concentration of marine erosive activity east of Cotonou and somewhat in Grand-Popo from 1960 to 2009. A prediction from the current rate and if it is maintained exposes the section, weighing station and toll-border Kraké, RNIE2 road to a definite disappearance by the year 3000. It is necessary to protect the rest of the coast by setting up other works in rock (ears), but also breakwaters.

Keywords – Epi, Coastal Erosion, Coastline, Coastline.

I. INTRODUCTION

L'érosion de côte engendre des reculs du trait de côte aux conséquences effroyables [12].

Au Bénin, la mer engloutit près de 40 mètres de côte chaque année en emportant nombre de villages et constructions [6]. L'érosion menace les habitations, les infrastructures situées sur la côte, tout le système écologique lagunaire et donc les populations qui y vivent.

Conscients de la gravité des dégâts causés par l'érosion aux plans économique, social et environnemental, l'Etat béninois a adopté une politique d'aménagement en vue de limiter l'impact des vagues. Il a opté pour la construction d'épis, ouvrages en enrochement implantés souvent perpendiculairement à la côte.

Malgré les énormes montants engagés, les efforts consentis par l'Etat et les institutions sous-régionales et internationales, nombreux sont les habitants des côtes qui continuent d'exprimer leur vulnérabilité. Il apparaît important de s'interroger sur l'impact réel de ce système de défense des côtes, adopté par le Bénin. C'est en vue d'apporter des éléments de réponses à ces questions que la présente recherche est choisie. L'objectif général est d'estimer l'impact des ouvrages de protection érigés sur la dynamique du trait de côte au Bénin.

II. SITUATIONS GEOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIVE

Le Bénin est un pays côtier de l'Afrique de l'ouest. Ils bénéficient de 125 km de façades maritimes dans le Golfe de Guinée. La zone d'étude est comprise entre 6°15' et 6°30' latitude N puis 1°35' et 2°45' longitude E. La bande côtière située entre le continent et l'océan constitue la zone d'étude (figure 1).

Administrativement, elle traverse de l'est à l'ouest cinq communes Grand-Popo, Ouidah, Abomey-Calavi, Cotonou et Sèmè-Podji. Un réseau hydrographique assez développé, constitué de cours d'eau et plans d'eau arrose la zone du littoral en se jetant directement ou par l'entremise de lac et/ou lagunes dans l'océan. Les deux principaux cours d'eau du complexe hydrographique sont le Mono, frontière naturelle entre le Bénin et le Togo et l'Ouémé. Sur la côte, se trouvent les sols peu évolués et en arrière de ceux-ci les sols hydromorphes, vertisols et sols ferralitiques.

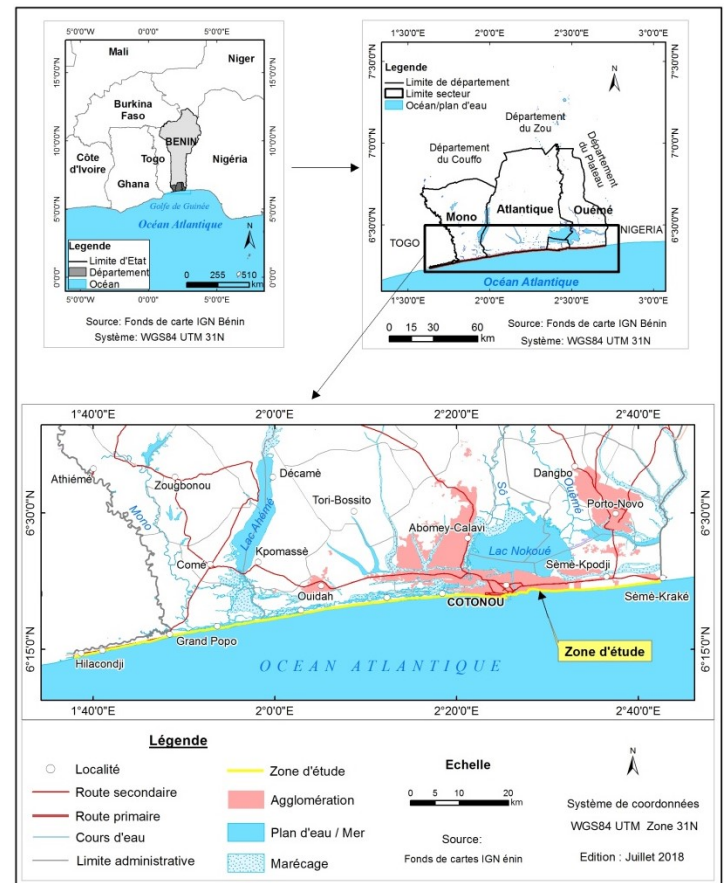


Figure 1: Situation de la zone d'étude

A- Marées, courants et houle.

Une marée de type semi-diurne a lieu de manière synchrone sur toute la côte du Golfe de Guinée [6]. L'amplitude moyenne est de l'ordre de 1 m, avec les valeurs plus fortes observées à l'extrémité Est de la région. L'onde de la marée est modifiée quand elle pénètre dans les lagunes et les estuaires.

Les vagues engendrées localement dépassent rarement 1,25 m de hauteur, et la période maximale est de 3 à 4 secondes. Ces vagues sont généralement plus faibles. Elles proviennent du Sud-ouest, c'est-à-dire la même direction que le vent.

La période de la houle peut varier entre 8 et 20 secondes, avec une moyenne de 12 à 13 secondes. Leur hauteur en eau profonde est en moyenne de 1 à 1,5 m, mais des hauteurs de 2 à 3 m sont parfois observées. Les houles longues sont accentuées sur les faibles fonds près de la côte, où elles produisent de hautes vagues déferlantes.

B- Courants

L'action de la houle engendre des courants, importants dans le transport des sédiments dans la zone d'activité. Ce sont : le courant de dérive littorale, le courant de jet de rive, les Rips-currents ou courant d'arrachement.

Courant de dérive littorale ou courant côtier : La houle crée un courant parallèle aux lignes bathymétriques ; par suite son énergie se dissipe de sa réfraction sur le fond. Sa vitesse dépend de l'angle d'incidence sur le rivage, qui varie entre 4° et 9° avec une moyenne autour de 6°-7°. Cette action est vraiment importante dans la zone de dissipation d'énergie maximum, c'est-à-dire la zone de déferlement et d'estran.

Courant de jet de rive : Ce courant, produit par le déferlement de la houle sur l'estran, peut transporter parallèlement à la ligne de rivage le sable sur l'estran. En effet, lors de la projection de l'eau sur l'estran, les matériaux (sables) sont remontés dans la direction de la lame d'eau. L'eau en redescendant le long de la plage sous l'effet de la pesanteur re-entraîne les matériaux.

Rips-currents ou courant de retour ou courant d'arrachement : Ce sont des courants temporaires dirigés de la côte vers le large. Ils évacuent le surplus d'eau vers le large et peuvent transporter des quantités importantes de sédiments perpendiculairement à la ligne de rivage.

III. MATERIELS ET METHODES

A- Matériels

Ils regroupent les logiciels utilisés pour cette étude. Ce sont essentiellement ENVI 5.1 et Global Mapper pour le traitement des images et ARCGIS 10.4 pour les analyses spatiales et la rédaction cartographique.

Données spatiales

Trois types de données spatiales ont été utilisés pour l'étude. Ce sont :

- **Fichiers vectoriels de formes au format shapefile (.shp)**, obtenus auprès de la structure nationale de production et de conservation de l'information géographique et données géospatiales, Institut Géographique National Bénin.
- **carte topographique à l'échelle 1/50 000** du Bénin qui proviennent de prises de vue aérienne de 1956-1957 avec le pré-complètement en 1962 et 1963 et publiée en 1968, couvrant la zone d'étude.

De ces cartes sont extraites le trait de côte le plus ancien ainsi le polygone de l'océan Atlantique.

- **Images Landsat multi-dates (TM_1986, ETM+_2009, OLI-TIRS_2018)**, issues des catalogues d'images d'archives provenant du capteur Thematic Mapper, du radiomètre ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) de Landsat 5 et 7 et OLI-TIRS de Landsat 8 des années 1986, 2009 et 2018 disponibles et téléchargeables www.landcover.org

Données descriptives

Cette catégorie renferme les données obtenues grâce à la recherche documentaire. Elle consiste à assembler de la documentation existante, disponible et ayant rapport avec le sujet. Elle est effectuée dans des bibliothèques dont celle d'AFRIGIST, les centres de documentation de la FLASH de l'Université d'Abomey-Calavi, de la Direction de la Lutte Contre l'Erosion Côtière, du Centre de Recherche Océanographique et Halieutique au Bénin et sur internet.

B- Méthodes

Elles sont présentées avec la nuance de mise en exergue de la situation d'avant et après la mise en place des épis. Le graphique 2 montre ladite chronologie.

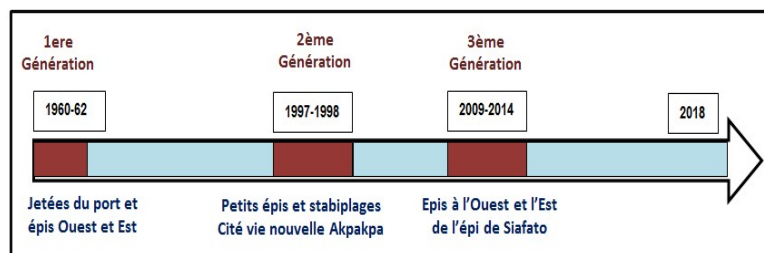


Figure 2 : Chronologie de la mise en place des épis sur la côte du Bénin

Etat des lieux avant la construction des épis sur les côtes des deux pays

La description de la situation qui prévalait avant la mise en place des épis importe. Par cette description, la dynamique du trait de côte a été démontrée à travers une étude diachronique. La démarche envisagée consiste en un traitement semi-automatique des images satellitales et de l'exploitation des cartes topographiques. La méthode semi-automatique offre des résultats plus réalistes.

Elle vise à extraire le trait de côte et les superficies de terres érodées et de terres cumulées. L'appréciation de la dynamique antérieure du trait de côte pour déterminer la

tendance globale a été faite sur une période 50 ans soit de 1960 à 2009. L'exploitation des cartes topographiques s'est déroulée en deux phases qui sont l'assemblage, le géoréférencement et la numérisation.

Traitement d'image

Le traitement des images a consisté en plusieurs tâches sous le logiciel Envi.

Le seuillage : un ensemble d'opérations séquentielles a favorisé le seuillage de l'eau (Océan). Pour l'eau, il s'est agi de relever les réflectances minimum et maximum de l'eau de la bande infrarouge (bande 4 pour le capteur Landsat TM/ETM+ et la bande 5 pour OLI-TIR) pour avoir la position géographique du trait de côte entre la mer et le continent. Pour ce faire, le profil de l'eau est réalisé dans la mer, observable sur l'image pour déterminer les valeurs maximum et minimum de la réflectance de l'eau à partir desquelles une image binaire avec la valeur 1 pour l'eau et 0 pour le reste des détails a été générée et sauvegardée au format TIFF. Le processus est répété pour chacune des images des dates retenues. Vectorisées, les couches « Océan » sont des polygones extraits et stockés au format shapefile dans la base de données précédemment créée.

L'état des lieux devant être réalisé sur la base de la dynamique du trait de côte, les polygones de l'océan de 1960, 1986 et de 2009 sont croisés par le processus d'intersection deux à deux. Ensuite, le polygone résultat de l'intersection est soustrait respectivement des polygones « pères » avec la fonction '**Erase**' de ArcGIS. Enfin, les deux polygones engendrés sont unis, grâce à la fonction '**Union**' de sorte à créer une seule couche de table attributaire automatiquement renseignée sur l'accrétion et le recul de côte. Grâce à la fonction « Model Builder » d'Arcgis le processus est automatisé comme l'illustre la figure 3.

Cette démarche qui permet de connaître les superficies de terres englouties et gagnées ne facilite pas la connaissance des distances en termes de largeur du littoral érodé le long de la côte, c'est-à-dire calculer la vitesse d'érosion. Pour obtenir ces mesures nécessaires, l'outil DSAS (Digital Shoreline Analyst System 4.3), une extension ArcGIS a été sollicitée, cet outil utilisé par [11] pour cartographier de la dynamique du trait de côte entre les fleuves volta et mono dans le golfe du Benin. Diverses opérations sont effectuées afin d'avoir le résultat escompté. La table attributaire a été aménagée pour avoir les champs : *ObjectID*, *ID*, *Shape*, *Length*, *Date*, et *Uncertainty*.

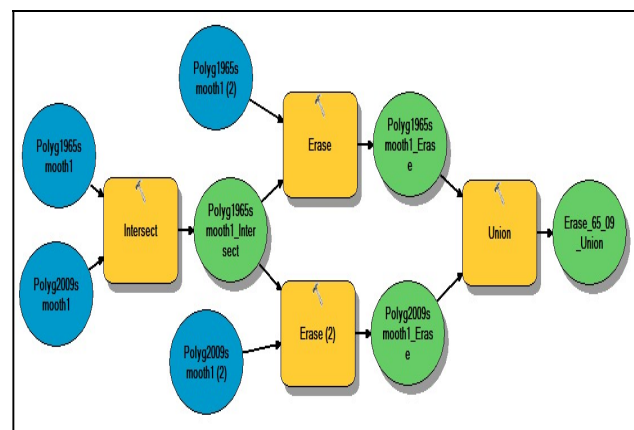


Figure 3 : Schéma du processus Model Builder de détermination des terres englouties et accumulées de 1960 à 2009 sur la côte du Bénin

Les outils suivants de l'application ont été utilisés pour l'analyse :

Shoreline Change Envelope (SCE) : il donne la distance entre le trait de côte le plus proche et le plus éloigné de la ligne de base à chaque transect. Cette méthode ne tient pas compte des dates. La détermination de la vitesse consiste à diviser la longueur qui sépare les deux traits de côte aux dates considérées par l'écart d'année entre ces deux dates.

Net Shoreline Movement (NSM) : Le mouvement net de rivage rapporte une distance, pas un taux. Le NSM est associé à des dates des deux rives. Il rend compte de la distance entre les rives plus anciennes et la plus jeune pour chaque transect. Il s'agit de la distance totale entre les rives des plus anciennes et la plus jeunes. (Si cette distance est divisée par le nombre d'années écoulées entre les deux rives, le résultat est le Taux de Point de terminaison.

End Point Rate (EPR) : Le taux de point de terminaison est calculé en divisant la distance du mouvement des rives au moment écoulé entre la plus ancienne et la plus récente rive. Les principaux avantages de l'EPR sont la facilité de calcul et de l'exigence minimale de seulement deux dates de rivage. L'inconvénient majeur est que dans les cas où il existe plus de données, les informations supplémentaires sont ignorées. Changements de signe (par exemple, accrétion à l'érosion), grandeur, ou tendances cycliques peuvent être manqués [5]; [8].

Linear Regression (LRR) : Une statistique de taux de variation de la régression linéaire peut être déterminée en ajustant par une méthode des moindres carrés la droite de régression à tous les points du rivage pour un transect particulier. La courbe de régression est placée ainsi que la somme des résidus au carré (déterminé par la distance de

$w = 1 / (e^2)$ où e = valeur d'incertitude de rivage

Evaluation de l'efficacité des épis

L'approche reste la même que celle de l'étude d'état des lieux. D'abord l'extraction de la limite de l'océan en 2009 et

2018. Mais l'extraction de 2009 étant déjà faite, il a été extrait uniquement la couche d'océan de 2018. Rappelons qu'en plus de l'approche diachronique par les techniques géospatiales, l'utilisation de DSAS pour le calcul du rythme d'érosion, des analyses statistiques ont été faites pour apprécier l'efficacité des épis. La figure n°4 montre le procédé détermination des superficies gagnées et perdues.

Au terme du traitement des différentes données collectées, les résultats obtenus se présentent comme suit.

A- Tendance de la dynamique du trait côtier avant la construction des épis

Superficie des terres englouties et accumulées 1960 à 2009

Les résultats montrent que la ligne de côte du littoral du Bénin a connu des avancées et reculs notoires avant la construction des épis de 2009-2014. Entre 1960 et 2009, la mer a avancé dans les terres, et reculé, dans différentes cellules le long de la côte. La figure 9 montre l'évolution des tendances au cours de la période en termes de perte et gain de terres.

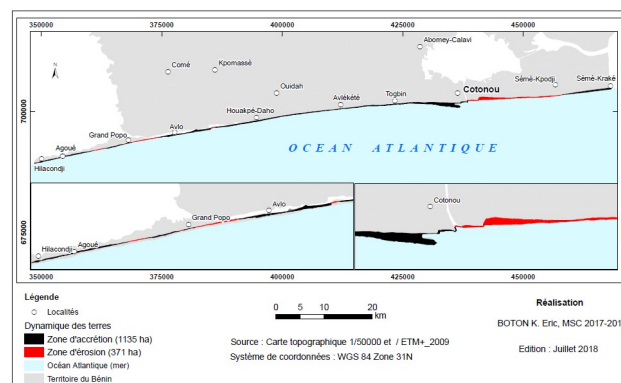


Figure 4 : Terres englouties et accumulées de 1960 à 2009 par l'érosion côtière

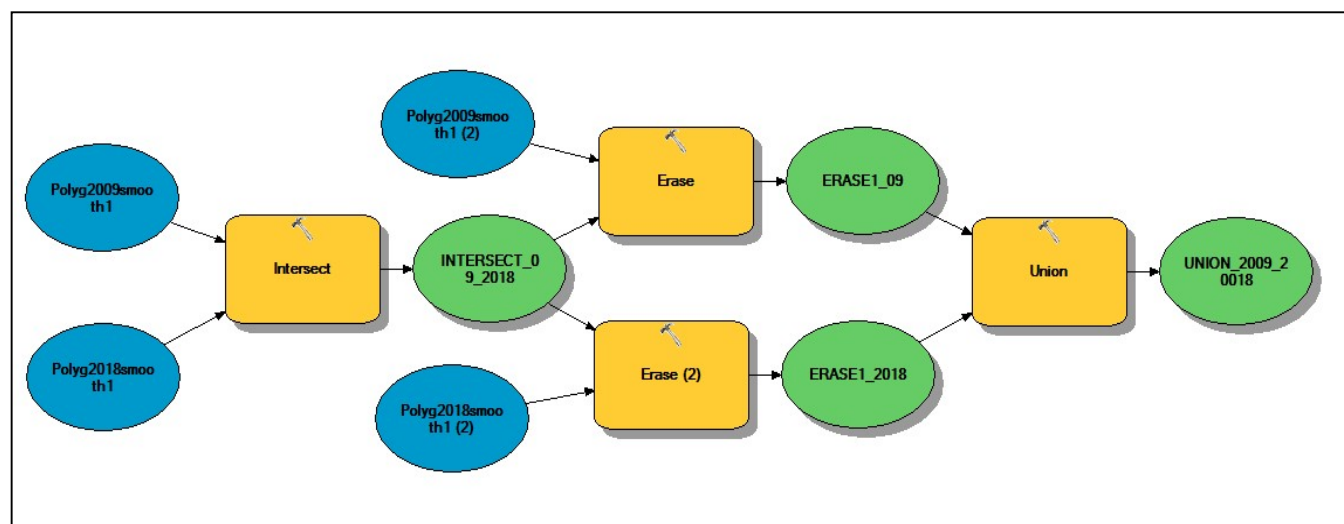


Figure 5 : Schéma du processus Model Builder de détermination des terres englouties et accumulées de 2009 à 2018 sur la côte du Bénin.

Pendant cette période le bilan sédimentaire est positif. En effet, l'activité de forçage de la mer comparativement à l'accrétion, qui résulte du charriage des sédiments par les cours d'eau, révèle une recharge du littoral est bien moindre. La mer a reculé laissant derrière elle, plus de 1135 ha. Les secteurs concernés sont, les plages de Agoué, les environs de l'embouchure du fleuve Mono (Bouche du Roi), les plages de Ouidah au port en eau profonde de Cotonou puis Sèmè (PK18) jusqu'à Kraké, frontière Bénin-Nigéria.

Les secteurs érodés sont également observés. L'avancée de la mer est considérable, notamment, sur les plages de Cotonou-Est qui à elles seules ont perdues plus de 75 % de la superficie totale (371 ha) des terres englouties le long de la côte durant la période considérée.

En vue de donner plus de consistance aux résultats obtenus, des données de même nature ont été utilisées car la carte topographique au 1/50000 n'offrait pas une garantie suffisante pour une parfaite superposition malgré tous les soins mis dans son géoréférencement. Dans ce cadre, il a fallu faire recours aux images Landsat uniquement pour confirmer ou infirmer les résultats précédents. Il s'agit de l'image de 1986, considérée comme situation du départ au lieu de la carte de 1960.

Néanmoins, la tendance obtenue de la carte topographique de 1960 et de l'image Landsat de 2009 s'est maintenue bien que l'image de 1986 soit utilisée comme situation de départ. Le tableau2 présente les tendances.

Tableau 1 : Comparaison des vitesses d'accrétion et d'érosion sur le littoral du Bénin

Nature des données	Date	Accrétion		Erosion	
		Superficie (ha)	Vitesse annuelle (ha/an)	Superficie (ha)	Vitesse annuelle (ha/an)
Cartes topo. 1/50000 et image Landsat ETM+ 2009	1960 - 2009	1135	23	371	7
Images Landsat TM_1986 et ETM+_2009	1986 - 2009	585	24	321	13

De 1986 à 2009, les terres perdues (321 ha) sont relativement moins importantes que celles accumulées (585 ha). Toutefois, une accélération de l'érosion est constatée avec 13 ha de perte annuelle contre 7 ha lorsqu'on considère toute la période c'est-à-dire 1960-2009.

Cette érosion relativement moins vive peut être expliquée par deux faits. Le premier tient du fait que les cours d'eau Mono, élément de démarcation naturelle de frontière entre le Bénin et le Togo et la Volta au Ghana, qui

apportent des sédiments que la dérive littorale distribue le long de la côte.

Mais la construction des ports avec des jetées, ouvrages de protection et de facilitation de l'arrivée des bateaux au quai aura perturbé la redistribution normale. La conséquence est l'accumulation et déficit de sédiments observés autour des ports. Le deuxième est l'aménagement des barrages.

Evolution de la ligne de côte de 1960 à 2009

De 1960 et 2009, le trait de côte a connu des rentrées considérables dans les terres et des reculs notoires. L'avancée la plus prononcée se situe autour de 548 mètres, immédiatement à l'Est de l'épi de Siafato tandis que la minimale est de 10 mètres avec une moyenne de 141 mètres sur la période, si on considère que l'érosion était linéaire. En ce qui concerne les terres accumulées, elles ont progressé dans la mer de 768 mètres. La distance la plus grande est observée à l'Est de la jetée principale du port de Cotonou. La plus petite distance de 5,43 mètres étant relevée à Grand-popo. Deux grandes cellules apparaissent. La première, de Hilacondji au port en eau profonde de Cotonou où aucune érosion n'est constatée, mais plutôt une accrétion remarquable et la deuxième, de l'embouchure de la lagune de Cotonou à la frontière Kraké où l'érosion est active figure 6.

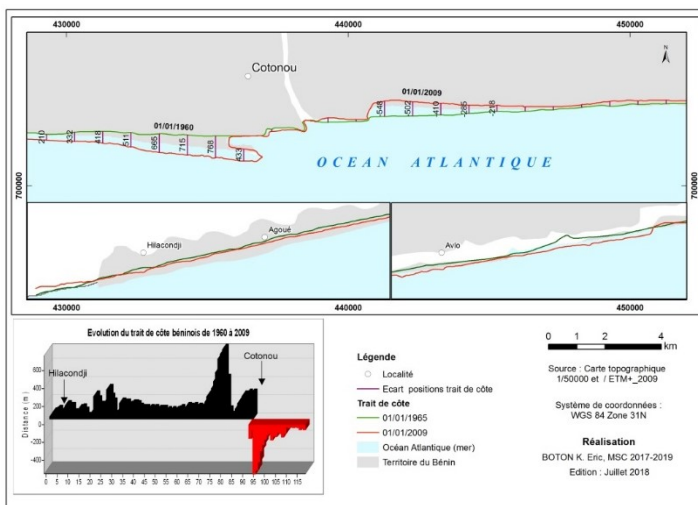


Figure 6 : Vitesse de l'érosion côtière au Bénin de 1960 à 2009

Ce résultat, confronté à ceux des divers travaux antérieurs effectués sur la côte béninoise semblerait bien moins irréaliste et peu conforme à la réalité vécue par les riverains jusqu'en 2009. En effet, [4] et [10], ont rapporté les résultats de leur étude de 1977 qui affirmait qu'Est de l'épi de Saffiato à Cotonou, l'érosion a reculé le trait de côte de 250 mètres à en 1976, puis 400 mètres en 1987, 500

mètres en 1994 et 570 mètres en 2000. Ce que révèle si bien le résultat. Mais d'Hilacondji à Adouanko, le tronçon de côte est en équilibre dynamique avec des tendances légères à l'érosion a souligné [6]. En réalité, c'est une période de transition. Les barrages hydroélectriques ont commencé par perturber la fourniture de sédiments. Les côtes en reçoivent mais la quantité est progressivement en baisse. Cette nuance de tendance à l'érosion noyée dans la grande période de 50 ans (1960-2009) a été révélée lorsqu'on a recouru aux images de 1986 et 2009 pour faire l'analyse. Les résultats sont plus évocateurs, figure 7.

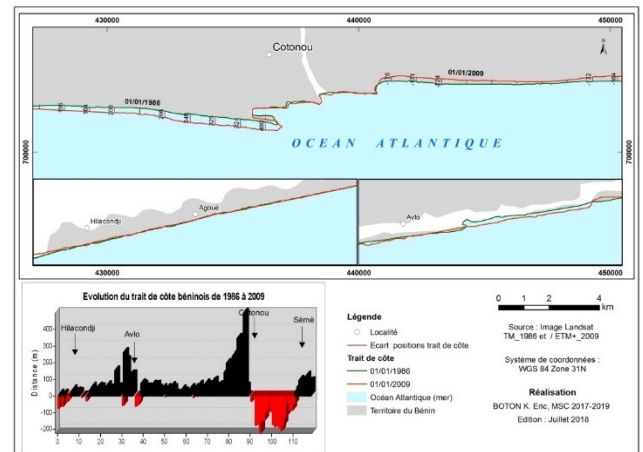


Figure 7 : Vitesse de l'érosion côtière au Bénin de 1986 à 2009

La figure de la figure 7 montre une érosion en stabilité relative sur la quasi-totalité de la côte à Ouest de Cotonou. Les quelques taches d'érosion d'Hilacondji et Agoué peuvent être expliquées par les effets de la construction des épis et brise-lame de Kpémè-Anèho de 1987-1991, en raison de leur proximité, car en aval des épis l'érosion s'active généralement.

Quant à Grand-Popo puis Avlo, la complexité hydromorpho-dynamique de l'embouchure du fleuve Mono est le facteur déterminant de l'érosion à ce niveau comme l'ont souligné [2] ; Dègbé, (2009). En somme, l'érosion était active et engendrait des dégâts sur les côtes du Bénin.

B- Mise en place des épis

L'épi est un ouvrage hydraulique construit perpendiculaire à la côte. Ce sont des ouvrages de protection en enrochement installés le long de la côte. En ce qui concerne les dimensions de l'enrochement, les blocs pèsent de la couche de base 1 à 100 kg ; la couche intermédiaire 500 kg à 1 tonne et la Carapace 1 tonne à 3 tonnes. En tête de l'épi c'est-à-dire le musoir, les dimensions de

l'enrochement sont augmentées avec des blocs de 2 à 4 tonnes [9].

La mise en place des épis sur les côtes a une histoire. On pourrait distinguer trois générations d'épis.

Première génération d'épis : les jetées

Les jetées construites au niveau des ports sont des épis géants du point de vue structure (ouvrages en enrochement) et disposition perpendiculaire à la côte. La jetée principale du port en eau profonde du Bénin finalisé en 1965 est, selon Janin (1964) « longue de 1431 m organisée en trois sections. La première section (28 m) est en enrochement. La seconde (186 m) est une passerelle métallique, à claire-voie, permettant la transit Ouest-Est du sable, jusqu'au fond du futur bassin. La troisième section enfin est l'élément majeur (1220 m). C'est une digue à talus classique, en enrochements, large de 7m au sommet, 60 m à la base, haute de 18m dont 6m au-dessus de l'eau et, à mi-chemin s'incline vers l'Est ». Cette jetée a engendré les mêmes conséquences au point où il a fallu ériger l'épi de Siafato pour limiter le phénomène à l'embouchure lagune de Cotonou.

Les épis Ouest et l'épi de Siafato, construits en 1962 pour assurer la protection des infrastructures portuaires et l'embouchure du chenal de Cotonou ont montré quelques années un impact à l'aval. L'ensemble de ce dispositif a ancré avec succès la ligne de rivage à l'Est du port et dans les sections d'implantation des épis. Cependant, très tôt, le l'inhibition de la recharge en sédiments a fini par accentuer l'érosion. Juste après la traverse (petite jetée) puis l'épi de Siafato, l'érosion est devenue plus importante. La dynamique du chenal de Cotonou fut néanmoins altérée de façon significative par la construction du barrage en 1977, et suite à son enlèvement partiel en 1984 et la construction l'épi Ouest.

Deuxième génération d'épis

La véritable expérimentation de la protection des côtes par les épis a commencé en 1997 sur la côte de Cotonou-Est, précisément dans le quartier Vie Nouvelle à Akpakpa. Ce sont de petits épis érigés et soutenus par des ouvrages de protection sous forme de stapiblages. Il s'agit notamment des stabiplages de J. Cornic réalisé en décembre 1997. La construction de ces épis rocheux appelés épis pilotes fut terminée en 1998. Mais ils n'ont malheureusement pas pu résister à la violence des vagues et ont été complètement détruits en moins d'un an après leur réalisation, par manque d'efficacité. Plus rien ne reste de ces ouvrages aujourd'hui.

Troisième génération d'épis

Les épis de cette génération peuvent être répartis en deux zones à savoir zone1 et zone2.

La zone 1 comprend l'ancien épi-Est de Siafato réaménagé et réorienté, long de 303 m puis l'épi N°1 de 160 m de long avec un ancrage de 15 m, en forme de « L » pour emprisonner du sable (estimée à 340 000 m³).

Quant à la zone 2, six autres épis sont construits. Il s'agit des épis N°2 à 7 de longueurs comprises entre de 160 m et 180 m. ils sont espacés de 900 à 1100 m.



Planche 1 : Epis aménagés sur la côte Est de Cotonou, images récupérées sur internet

En somme, hormis la jetée principale du port et l'épi de Siafato, huit (8) épis totalisant 2445 mètres de longueur sont construits sur sept et demi kilomètres de côte dont sept épis à l'Est de celui de Siafato et un immédiatement à l'ouest de ce dernier. Ils contribuent à contrecarrer la force des vagues de l'océan et à empêcher l'évacuation du sable.



Photo 3 : Image Google Earth 2017 montrant les épis et jetées du port de Cotonou

Photo 4 : Erosion derrière hôtel Eldorado malgré l'enrochement

Planche 2 : Ouvrages de lutte contre l'érosion à Cotonou

La distance moyenne qui sépare les épis construits à l'Est de la lagune de Cotonou est de 1032 m, soit environ 1 km. Vu que l'érosion est relativement maîtrisée dans les casiers des épis (Photo 3) ; il faudra pour protéger toute la côte béninoise, implanter objectivement au moins 125 épis. La concentration des épis sur la plage de Cotonou à PK10 (vers Sèmè-Podji) sécurise la côte dans secteur et laisse environ 75km de côte subir l'agressivité des vagues lorsqu'on considère les secteurs d'accrétion.

Ces résultats viennent confirmer que les épis érigés ne sont pas en nombre suffisant. Quant à leur répartition, elle

est normale dans le segment de côte où ils sont installés car à voir le mode de fonctionnement des épis en général, implanter les épis existants qui à intervalle régulier sur toute la côte béninoise viendrait à créer autant de cellules de grave érosion qu'autant d'épis parce qu'au-delà de 1km, les épis actuels engendrent l'érosion.

IV.3- Appréciation de l'efficacité des épis

Le mode d'évaluation adoptée dans cette étude se fonde sur la détermination de la superficie de terres englouties par la mer et des terres qui résulte de l'accrétion puis la cinématique du trait de côte. Vu que, hormis les jetées dont on ne dispose pas de données géospatiales antérieures à leur construction, les épis qui nous intéressent sont ceux de la troisième génération c'est-à-dire les épis construits entre 2009 à 2014.

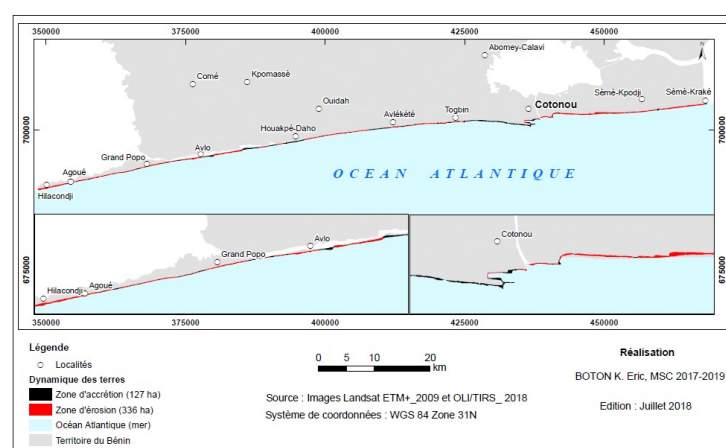


Figure 8 : Terres englouties et accumulées de 2009 à 2018 par l'érosion côtière

Superficie des terres englouties et accumulées

De 2009-2018 soit 10 ans, la violence de l'érosion sur les côtes était perceptible malgré le renforcement des épis existants et la construction de nouveaux ouvrages. Les casiers formés par les épis emprisonnent des sédiments en transit et stabilisent ceux qui sont surplace. Néanmoins, l'érosion est devenue très vive et concerne la presque totalité de la côte. Après le 7ème épi c'est-à-dire le dernier, elle est très importante comme à Agoué, Grand-Popo et Avlo. Les épis récemment aménagés à Aného embouchure ont déplacé les côtes ouest du avec une violence sans précédent. L'avancée de la mer dans les terres est considérable.

Il se dégage un mouvement du trait de côte qui favorise et accentue l'érosion avec 336 ha de terres englouties en 9ans soit une vitesse de forçage de 37 ha/an contre 13 ha/an au plus, tendance observée avant la réalisation des ouvrages.

De même, la vitesse d'accrétion de 34 ha/an est passée à 13 ha/an. Cette situation montre une érosion plus grave sur la côte du Bénin.

La jetée du port de Cotonou et celle du Togo créent une barrière complète au transport de sable le long du littoral. A l'instar des jetées, les épis bloquent du sédiment en amont et exposent l'aval à l'érosion. Les casiers que l'alignement des épis forme, bien qu'ils piègent des sédiments n'échappent totalement au phénomène. En conséquence, une plage s'accumule rapidement en amont et à l'Ouest des ports et épis. Cependant, à l'Est, les ouvrages empêchant la recharge du matériau prélevé favorisent un prélèvement continu. Aussi, devrait-on souligner que l'aménagement de barrages hydroélectriques sur les cours Volta et Mono a réduit voire empêcher l'alimentation des côtes en sédiments. Le relèvement quasi-sensible du niveau de la mer dans un contexte de changement climatique décuple la force des houles et vagues pour une côte constituée de matériau meuble très érosif. L'appréciation de la largeur des bandes de terres a permis de mettre en exergue les secteurs les plus touchés et ceux que le sont moins, figure14.

Dynamique du trait de côte après la construction des épis

La mise en place des épis n'a pas arrêté l'érosion. La ligne de côte continue son mouvement oscillatoire le long du littoral. Le renforcement du système des épis au Togo dans le segment d'Aného dans le cadre de la protection de la voie, corridor Abidjan-Lagos et l'agrandissement du port de Cotonou puis la construction d'épis autour et à l'Est de celui de Sifato ont particulièrement aggravé le phénomène d'érosion tout au long du littoral béninois. La figure 9 en donne une illustration.

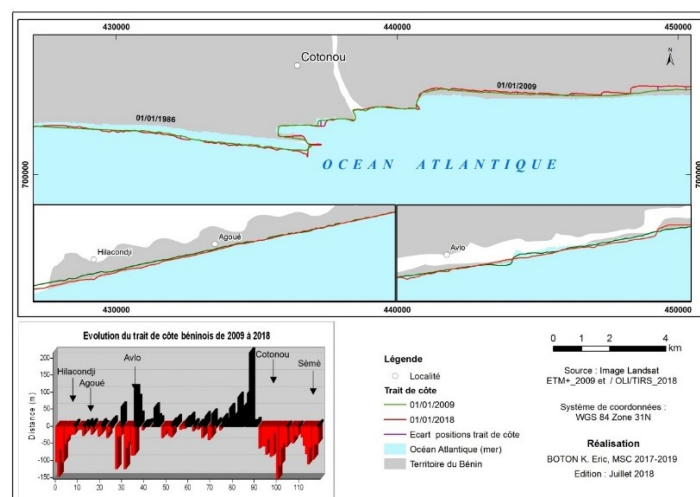


Figure 9 : Vitesse de l'érosion côtière au Bénin de 1960 à 2009

Trois grandes cellules s'offrent à l'analyse. La première de la frontière Hilacondji à Avlo en proie à une érosion inédit dans ce segment, de Avlo à port de Cotonou, segment en équilibre dynamique et enfin la dernière de l'épi de Siafato à la frontière Kraké. Les plus fortes avancées de la mer de l'ordre de 150 mètres en 10 ans (2009-2018) sont constatées à la frontière, juste après le 7^{ème} épi à Sèmè à la hauteur du Site de pèlerinage de l'église du Christianisme Céleste. Au même moment, la vitesse d'accrétion est soutenue à l'Ouest du port sans pour autant se faire constater sur un long segment de côte comme ce fut le cas avant l'érection des épis.

Dans un contexte d'inhibition totale de fourniture de sédiments à distribuer par la dérive littorale, appui par les effets du changement climatique, la mer arrache le sédiment pour le transporter en aval dérive. Le courant d'arrachement étant continuellement en activité, il va de soi que l'inexistence d'apport expose la côte à une activité de forçage plus intense sur du matériau meuble, plage sableuse.

Si la tendance actuelle se maintient, avec la vitesse de 5m/an ; Hilacondji et Agoué risqueraient de disparaître en l'an 3000, Cotonou PK3 (désormais sécurisé par des épis est exclu), le poste de pesage et péage de PK10 avec sa vitesse actuelle de 15 m/an qui connaîtra le sort prévisible des localités citées plus haut plus tôt, dans 60 ans.

Au vu de la tendance à l'érosion totale au lendemain de la mise en place des épis, il semble qu'il contribue pour une grande part. C'est pourquoi l'efficacité des épis les côtes béninoises à l'étape actuelle reste une question entière. Ceux qui sont sur place ne pas résoudre le problème mais plutôt déplacer l'érosion vers le secteur en avant dérive de la batterie d'épis avec une gravité accrue.

V. DISCUSSION

A- Point sur le phénomène d'érosion côtière au Bénin de 1960 à 2009

Les côtes béninoises étaient soumises à l'érosion. Elle est plus importante à l'Est de Siafato. La mer a détruit de nombreuses infrastructures et habitations en reculant la plage de plus de 450 mètres et en créant une accrétion progressive et continue depuis la construction de la jetée principale. L'approche de photo-interpretation, de cartographie à laquelle, dans le cadre de cette étude, celle SIG que a été ajoutée, a aussi été adoptée par [2] lors des recherches de sa thèse de doctorat. Il avait obtenu des résultats similaires. Après la construction des ports 1962 et 1964, des barrages d'Akossombo en 1964 et de Nangbéto en 1987, les conséquences de l'érosion sur les côtes béninoises

sont devenues perceptibles et graves. [3] ont estimé la quantité des apports solides puis a constaté qu'ils sont progressivement passés de 71 106 m³.an-1 à 8 106 m³.an-1. [14] et [1] quant à eux ont aussi remarqué une érosion aggravée au niveau de Grand-Popo et d'Avlo à la suite du barrage de Nangbeto, inauguré en 1987 à 180 km de l'embouchure a lui modifié le régime hydrologique dans le bassin inférieur du fleuve Mono. [13] en étudiant les épis à l'Est de Cotonou et leurs impacts, ont constaté que le rythme moyen d'érosion était de 8,50 m/an avant la réalisation des épis. Cette vitesse d'érosion est très proche de 8,50 m/an obtenue. Ceci explique l'effectivité de l'érosion sur le littoral béninois de 1960 à 2018, vécue comme une catastrophe naturelle, subie par de nombreux habitants, investisseurs et l'Etat qui a à charge de veiller sur l'intégrité territoriale.

B-Repérage et cartographie des épis

Dans cet ordre d'idées, des solutions de protection ont été envisagées. De toutes, celle des ouvrages en enrochement dont les épis fut adoptée. En 2009 a commencé la mise à place de huit épis. Le repérage et le levé des épis a été fait par [13] et [7] par méthode d'observation directe au moyen de Global Position System (GPS) lors d'une enquête de terrain. L'identification et la détermination des coordonnées géographiques des épis s'est fait à travers l'application Google Earth qui offre la possibilité de levé sur des images de haute résolution. Cette méthode a conduit à reconnaître la position et nombre d'épis existant, les modéliser et les cartographier comme l'ont réalisé les auteurs cités. Leur répartition géographique sur la côte démontre le souci de protéger prioritairement Cotonou, capitale économique et ses infrastructures.

C-Appréciation de l'efficacité des épis

La vitesse d'érosion est passée de 7,02 m/an à 5,10 m/an. C'est une tendance baissière qui semble présenter l'efficacité attendu des épis. [13] ont affirmé après l'analyse de leurs observations et levés terrains effectués de 2009 à 2012 que le rythme moyen de 8,50 m/an avant la réalisation des épis a connu un ralentissement. Ils ont démontré qu'en aval de l'épi 7, le taux minimum de recul du trait de côte est 35 m/an contrairement au résultat de nos analyses qui affiche la moitié de cette vitesse, 17 m/an. Cette différence proviendrait de la durée trop courte 2009-2012 d'observation comparativement à celle de 2009-2018. Tout de même, il est noté dans les deux cas une gravité de l'érosion à l'Est du septième épi. Le fait le plus important est la quasi-généralisation de l'érosion sur le littoral béninois. En effet, [15] a démontré dans sa thèse que les

variations du rivage avant et après l'implantation des ouvrages, montrent une érosion en aval dérive généralement doublée par rapport à la tendance naturelle. On pourrait comprendre les propos de [15] et la généralisation de l'érosion côtière au Bénin lorsque qu'on considère la répartition spatiale des épis au Togo au Bénin. Pour [16], de fréquents impacts négatifs de la solution « dures » naissent de la méconnaissance des processus de fonctionnement des ouvrages et du littoral ; car chaque littoral doit être pris comme une entité unique au vu de ses conditions géographiques, géologiques, océanographiques, sédimentologiques ainsi que de mises en œuvre souvent dictées par l'urgence et la nécessité et non pas par le souci des impacts. Les conclusions font état de ce qu'il n'existe pas de remèdes universels.

[12] dans son étude sur les côtes québécoises affirme que ce sont les infrastructures de protection du littoral qui sont responsables des modifications des systèmes côtiers. Par la méthode de photo-interprétation multitemporelle (1934-2007), comme adoptée pour cette étude, il a prouvé que les murets et les enrochements ont provoqué une réduction de 10 % à 75 % de la largeur des plages, entraînant même la disparition quasi complète de celles-ci pour certains segments de côte.

VI. CONCLUSION

Le phénomène d'érosion côtière touche l'ensemble du littoral du Bénin. Elle résulte des facteurs naturels et anthropiques. Le phénomène d'érosion côtière a entraîné un recul de la côte variant de 1 à 7,02 m par an de 1960 à 2009, avec plus de 1135 ha de terres englouties. L'érosion côtière a touché particulièrement la côte Est de l'épi de Sifato à Cotonou, les segments d'Hilacondji-Agoué et Grand-Avlo ; des zones à forte concentration humaine, d'où des conséquences socio-économiques graves (destruction des plages, destruction des villages, destruction d'infrastructures industrielles et hôtelières, perturbation des activités de pêches, etc.).

Pour lutter contre ce fléau, le Bénin a entrepris de nombreuses actions qui ont abouti à la mise en place d'épis courant 2009-2014. Compte tenu des ressources disponibles, les ouvrages en enrochement sont construits sur la plage Est de Cotonou vers PK 10, protégeant 7,5 km. Les épis construits dans la même période à Kpémé et Aného au Togo ont eu un effet conjugué avec les épis de Cotonou au Bénin. Le principe de fonctionnement aidant ainsi que l'espacement des diverses batteries d'épis, l'érosion s'est généralisée sur la côte, mais à intensité différente dans les segments. Seul, le segment Adouanko-port de Cotonou se

distingue par une accrétion progressive. Cependant, la vitesse moyenne d'érosion chute et se situe à 5 m/an.

Par rapport à la vitesse moyenne après la construction des épis, on constate des menaces permanentes de l'érosion sur les infrastructures socio-économiques et l'environnement dans le secteur d'étude. La vraie protection de la côte par l'efficacité des épis qui doivent être construits à chaque kilomètre si la dimension et les caractéristiques de ceux qui existent doivent être respectées pour les futurs épis.

REFERENCES

- [1] Ago E. E., Petit F. & Ozer P., (2005) : Analyse des inondations en aval du barrage de Nangbeto sur le fleuve Mono (Togo et Bénin). *Geo-Eco-Trop*, 2005, pp 1-14
- [2] Blivi A. B. (1993) : Géomorphologie et dynamique actuelle du littoral du Golfe du Bénin (Afrique de l'Ouest), thèse de doctorat, Géographie physique, Université Michel de Montaigne Bordeaux 3 ; 453p
- [3] Boateng, I., 2012. An application of GIS and coastal geomorphology for large scale assessment of coastal erosion and management: a case study of Ghana. *Journal of coastal conservation*, 16: 383-397
- [4] Codjia C.L., Domingo E. (1998): Utilisation des mesures au sol et des données satellitaires pour l'étude de la dynamique du trait de côte de la ville de Cotonou. In (AUPELF-UREF, Ed.) *La réalité de terrain en télédétection: pratiques et méthodes*, p. 185 - 190.
- [5] Crowell, M., Douglas, B.C. and Leatherman, S.P., 1998. considerations for shoreline position prediction. *Journal of coastal research*, 14(3), 1025-1033. Royal Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- [6] Dègbé C. G. E. (2010) : Géomorphologie et érosion côtière dans le Golfe de Guinée, mémoire de Master 2 en Océanographie physique, CIPMA - Chaire UNESCO, FAST/UAC, Cotonou, République du Bénin, 99p.
- [7] Degbe C. G. E., Sohoun Z., Oyede L. M., Adje C., Du Penhoat Y., Bourles B., Chuchla R., Almar R. (2017) : Évolution du trait de côte du littoral béninois de 2011 à 2014, Institut de Recherches Halieutiques et Océanologiques du Bénin (IRHOB/CBRSI), Laboratoire de Géologie, Mines et Environnement de l'Université d'Abomey-Calavi (DST/FAST/UAC) du Bénin, Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ; Science de la vie, de la terre et agronomie

- REV. CAMES - VOL.05 NUM.01. 2017 * ISSN 2424-7235, pp 21-27.
- [8] Dolan R., Fenster Michael S., Holme Stuart J. (1991) : Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion. *Journal of Coastal Research*, Vol. 7, No. 3 (Summer, 1991), pp. 723-744
- [9] Groupe de la Banque Mondiale (2017) : Plan d'investissement multisectoriel pour l'adaptation aux risques côtiers face aux changements climatiques au Bénin, Rapport final version 4, The World Bank 1818 H Street, N. W. Washington, DC 20433 ; 271p
- [10] Kaki, C., Laibi, R.A. & Oyede, L.M., (2011) : Evolution of Beninese coastline from 1963 to 2005: causes and consequences. *British Journal of Environment & Climate Change*, 1: 216-231.
- [11] Koffi D. (2014) : Cartographie de la dynamique du trait de côte entre les fleuves Volta et Mono dans le golfe du Bénin, mémoire de DESS, RECTAS, Ilé-Ifè, Osun State-Nigéria, 69p.
- [12] Leclerc A. M. (2010) : Ouvrages de protection du Littoral: effets sur la morphologie des plages et sur les communautés benthiques intertidales, région de Saint-Siméon et de de Bonaventure, baie des chaleurs (Québec, Canada), mémoire de maîtrise en géographie extensionnée, Université du Québec à Montréal, 141p.
- [13] Makponse M. et Hounsou B. (2017) : Dynamique de la côte après la réalisation des épis, ouvrages de protection situés à l'Est de l'épi de Siafato à Cotonou au sud-Bénin, *Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé African Journals Online (AJOL)* ;
<https://www.ajol.info/index.php/jrsul/article/view/159073> consulté le 23 juin 2018 à 16h10.
- [14] Rossi, G., 1996. L'impact des barrages de la vallée du Mono (Togo-Bénin). La gestion de l'incertitude. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 2: 55-68.
- [15] Samat O. (2007) : Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales : le cas du Languedoc et du delta du Rhône, thèse de doctorat, Université Aix-Marseille I - Université de Provence, U.F.R des Sciences Géographiques et de l'Aménagement, Centre Européen de Recherches et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (UMR 6635-CNRS), pp 371.
- [16] SOGREA, (1993) : Etude de la problématique des dispositifs de protection du littoral à impacts réduits sur l'environnement. Rapport Général, IFREMER, 220p.