



Géomorphologie : relief, processus, environnement

vol. 22 – n° 1 | 2016

Analyses of high energy – low frequency geomorphological events on slopes, fluvial and coastal dynamics in Iceland and methodological contributions

Impacts des houles exceptionnelles sur le littoral ivoirien du Golfe de Guinée

Exceptional wave impacts on the Ivorian littoral of the Guinea Gulf

Konan Ernest Konan, Jacques Abe, Kouamé Aka, Urs Neumeier, Jan Nyssen et André Ozer



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/11241>

DOI : 10.4000/geomorphologie.11241

ISSN : 1957-777X

Éditeur

Groupe français de géomorphologie

Édition imprimée

Date de publication : 15 avril 2016

Pagination : 105-120

ISBN : 978-2-913282-71-1

ISSN : 1266-5304

Référence électronique

Konan Ernest Konan, Jacques Abe, Kouamé Aka, Urs Neumeier, Jan Nyssen et André Ozer, « Impacts des houles exceptionnelles sur le littoral ivoirien du Golfe de Guinée », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], vol. 22 – n° 1 | 2016, mis en ligne le 02 février 2016, consulté le 03 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/11241> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.11241



Impacts des houles exceptionnelles sur le littoral ivoirien du Golfe de Guinée

Exceptional wave impacts on the Ivorian littoral of the Guinea Gulf

Konan Ernest Konan^{*a,b}, Jacques Abe^{a,c}, Kouamé Aka^d, Urs Neumeier^e, Jan Nyssen^b & André Ozer^f

^a Centre de Recherches Océanologiques d'Abidjan – BP V 18 – Abidjan – Côte d'Ivoire.

^b Université de Gand – Krijgslaan 281 (S8) – 9000 Gent – Belgique.

^c Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel (O.N.U.D.I.) – 5 Broz Tito Avenue – P.O. Box: 324, Cantonments – Accra – Ghana.

^d Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan – 22 BP 514 – Abidjan 22 – Côte d'Ivoire.

^e Institut des Sciences de la Mer – Université de Québec – 310 Allée des Ursulines – Rimouski QC G5L 3A1 – Canada.

^f Université de Liège – Allée du 6 Août – 2 Sart Tilman – B-4000 Liège – Belgique.

RÉSUMÉ

Cette étude intègre les impacts des houles d'exceptionnelles dans l'appréciation de la mobilité du budget sédimentaire et du trait de côte du cordon littoral ivoirien à l'est d'Abidjan. Les événements n'ont pas été souvent pris en compte dans l'évaluation de la mobilité du trait de côte du littoral ivoirien, quand on sait qu'une vitesse moyenne de l'évolution d'une côte est le bilan des mouvements (érosion/engraissement) sur celle-ci. La méthode d'appréciation est basée sur une analyse diachronique de photographies aériennes (1979-1989) et sur un important travail de terrain s'appuyant sur la réalisation d'une série de profils topographiques (2007-2009). Le traitement des données montre que la vitesse d'érosion de la baie de Port-Bouet et des plages d'Assinie, qui n'excède généralement pas 1,5 m/an, est exacerbée sur de courtes durées par des houles violentes qui naissent dans l'Océan Atlantique sud. Certaines seraient d'origine sismique comme celles qui ont submergé puis érodé une partie de la côte ivoirienne dans la nuit du 13 au 14 août 2007. La côte a reculé de 2,3 à 18 m en un cycle de marée, causant d'importants dégâts matériels dans la baie d'Abidjan (Port-Bouet) qui a une population dense et des activités économiques intenses. Replacée dans l'évolution pluriannuelle de ces 2 segments de côtes, cette houle qui a considérablement érodé les plages du littoral apparaît comme un événement exceptionnel tant les volumes érodés au niveau de tous les profils ont été importants. Cette étude met en exergue que le cordon littoral, qui subit de façon généralisée une érosion, présente une sensibilité élevée aux vagues exceptionnelles.

Mots clés: érosion côtière, engraissement, courbe enveloppe, séisme, houles exceptionnelles.

ABSTRACT

This study integrates the impacts of swells with significant morphologic impact in the analysis of the coastal sediment budget and of coastline mobility; in this case, the swells occurring in August 2007 on the coast of the Gulf of Guinea, east of Abidjan. Swells were not often taken into account in the evaluation of the mobility of that coastline, for which all modifications (retreat and accretion) need to be taken into account. For this study, we carried out a diachronic analysis of aerial photographs (1979-1989) and we established a series of topographic profiles (2007-2009), allowing to quantify volumes of deposited or eroded coastal sediments. The application of these methods shows that the coastal erosion rate at Port-Bouet bay and Assinie beaches, which generally does not exceed 1.5 m/y, is exacerbated over short periods by strong swells from the South Atlantic Ocean. Some of them are of seismic origin such as those that submerged and eroded part of the Ivorian coast during the night from 13 to 14 August, 2007. The coastline retreated between 2.3 and 18 m in one tidal cycle, causing significant damages in Port-Bouet (Abidjan Bay) where a dense population and several economic activities are located. Considering the long-term evolution of these 2 coastal segments, this swell which strongly eroded the beaches in Ivory Coast in August 2007 appears as an exceptional event, as volumes of sand eroded from all the beach profiles were significant. The studied coastline is not only continuously eroding, but it has also a high sensitivity to exceptional swells.

Key words: coastal erosion, accretion, seismic origin, exceptional swells

INFORMATION SUR L'ARTICLE

Reçu le 22 octobre 2012

Reçu sous sa forme révisée le 27 novembre 2015

Définitivement accepté le 12 décembre 2015

*Auteur correspondant. Tél : +225 21 35 50 14 ;
Fax : + 225 21 35 11 55

Courriels :

conandernest@yahoo.fr (K.E. Konan)

jacquesabe@yahoo.com (J. Abe)

akaraphael@yahoo.fr (K. Aka)

urs_neumeier@uqar.qc.ca (U. Neumeier)

jan.nyssen@ugent.be (J. Nyssen)

aozer@ulg.ac.be (A. Ozer)

1. Introduction

L'érosion côtière constitue une préoccupation majeure de la plupart des pays ayant une façade maritime. Une étude de synthèse à l'échelle mondiale effectuée par Bird (1985) a montré que la tendance récente des plages est à l'érosion dans plus de 70 % des cas, à l'accumulation dans 10 % des cas seulement, les 20 % restant montrant une relative stabilité. Dans le monde, plus de 80 % de la population littorale réside dans une commune exposée au risque d'inondation ou de mouvement

de terrain sur au moins une partie de son territoire et seulement moins de 10 % de la population littorale habite dans une commune qui n'est pas exposée à un risque (Bird, 1985). Les trois-quarts du littoral ivoirien sont sableux d'où l'intérêt porté à ce phénomène par la recherche scientifique en Côte d'Ivoire.

Les travaux de recherche consacrés à la dynamique du littoral en Côte d'Ivoire ont montré une évolution (érosion/engraissement) des secteurs sensibles comme les zones littorales de Grand-Lahou, d'Abidjan et d'Assinie (Hauhouot, 2000, 2008 ; Abe, 2005 ;

Touré et al., 2012 ; N'Douffou, 2012) liée aux aménagements. Ces études ont ignoré certains événements essentiels (crise érosive) qu'on pourrait qualifier «d'exceptionnels» dans l'évaluation de cette évolution. Il est donc utile de mettre à jour les connaissances pour une gestion du littoral, surtout dans le contexte de réchauffement climatique actuel présenté par certains experts comme responsable, du moins en partie, de la déstabilisation (érosion, glissement de terrain, etc.) des côtes de l'Afrique de l'Ouest (Ibe et Queleennec, 1989 ; Ibe, 1990 ; Ibe, 1994 ; Kolawolé, 1990, 1998 ; Abe, 1993, 2005 ; Koffi et al., 1991 ; Monde, 2004 ; Konan et al., 2009 ; Konan, 2011, 2012 ; Yao, 2012 ; N'Douffou, 2012 ; Touré et al., 2012 ; N'Guessan et al., 2013 ; Abe et al., 2014).

L'évolution régulière du littoral d'Abidjan et d'Assinie est marquée par des épisodes érosifs particuliers voire spectaculaires : effondrement de la plage à plusieurs reprises au début du vingtième siècle (Tastet et al., 1985) ; reculs spectaculaires de la côte sur plusieurs dizaines de mètres dans les années 1980 (Abe, 2005 ; Paskoff, 1993). Les causes de ces épisodes érosifs importants qui ont influencé considérablement les rivages ivoiriens ne sont pas toujours maîtrisées et leurs impacts n'ont pas été pris en compte dans l'évaluation de la vitesse moyenne de mobilité du trait de côte. Les scientifiques (Abe, 2005 ; Paskoff, 1993) ont souvent parlé de l'influence de phénomènes liés à la météo marine et surtout d'activités anthropiques, mais ceux-ci, bien que déterminants, n'expliquent pas tout. L'objectif de cet article est d'analyser l'impact morphologique des houles du 14 août 2007, qui a été suivi à l'Est d'Abidjan à travers deux secteurs : la plage d'Abidjan-Grand-Bassam et d'Assinie-Aforenou (fig. 1) et, par la suite, d'établir et de proposer une réflexion sur la prise en compte de l'action des houles de forte énergie (exceptionnelle) sur l'érosion des côtes ivoiriennes. Dans le même temps, le travail a porté sur l'analyse de la résilience (temps de retour à la position initiale d'équilibre des plages avant l'arrivée des houles exceptionnelles d'août 2007) de ces cordons littoraux. Les effets de ces houles sur ces deux sites ont été d'autant mieux appréciés et documentés que cet épisode érosif remarquable est intervenu sur une zone économique importante qui faisait l'objet d'un suivi topo-morphologique régulier depuis 1984 par le Centre de Recherches Océanologiques d'Abidjan (ex-ORSTOM).

2. Présentation du site

2.1. Configuration côtière

Le cordon littoral de Tabou à Sassandra, qui est orienté WSW-ENE, est limité par une falaise morte de 10 à 100 m de hauteur. La côte de Sassandra à Abidjan est rectiligne (fig. 1) et est bordée de formations

sédimentaires reposant sur un socle peu profond. A l'emplacement de la tête du canyon sous-marin «Trou-Sans-Fond» (ou TSF) à Abidjan, la côte subit un changement de direction vers N100° (Tastet, 1985). Le trait de côte devant Abidjan se distingue de l'ensemble de la côte sableuse par sa morphologie. Il dessine une baie avant de reprendre le tracé d'ensemble plutôt rectiligne. Cette configuration épouse le contour des têtes du canyon du «Trou-Sans-Fond». Cette entaille réduit considérablement la largeur du plateau continental. Devant elle, l'isobathe 30 m se trouve à moins de 200 m du rivage alors qu'aux extrémités il se situe à 1100 m voire 1200 m (fig. 2).

Cette baie, ouverte sur un canyon sous-marin, apparaît comme le secteur le plus vulnérable à l'érosion. Dans ces zones de convergence où l'énergie de la houle peut être multipliée par 2 ou 3, la plage de fond de baie montre une grande vulnérabilité aux déferlements des vagues et leurs courants associés (Tastet, 1987 ; Konan, 2011 ; Touré et al., 2012). Les plans de vagues établis par la Direction et Contrôle des Grands Travaux en 1985 (DCGTx, 1985 ; fig. 3) ont permis de mettre en évidence des zones de concentration d'énergie qui constituent des points sensibles à l'érosion. Ceci peut ainsi expliquer en particulier l'érosion survenue au phare de Port-Bouet le 14 juillet 1986, décrite par Abe (2005). Les houles SW et SSW atteignent la côte au fond du canyon (Trou Sans Fond) avec une accumulation d'énergie à proximité du phare (fig. 3), à l'Est de l'aéroport d'Abidjan Port-Bouet, et à l'Ouest de Petit Bateau (dont les coefficients de réfraction ne sont pas disponibles ; fig. 3, DCGTx).

2.2. Influence des activités anthropiques

A la hauteur d'Abidjan, plusieurs aménagements importants réalisés sur le littoral ont considérablement modifié le transit sédimentaire (Tastet, 1985; Hauhouot, 2000 ; Monde, 1997, 2004; Abe, 2005 ; Konan, 2004, 2011 ; Touré et al., 2012 ; Adopo, 2009). Ces activités concernent le premier percement de la baie de Biétri entre 1905-1907, qui fut un échec, car le canal s'est refermé naturellement après sa mise en service. En 1923, l'appointement (warf) pour l'accostage et l'amarrage des bateaux dans la ville voisine (Grand-Bassam) fut détruit. Une nouvelle percée du canal (1933-1934) sur le site appelé Bidet s'est aussitôt refermée après sa mise en service. Des digues d'arrêt de sable pour la protection de l'entrée du canal furent construites en 1943 et 1975 avant et après ouverture du canal en 1950 pour l'entrée des navires dans le port d'Abidjan. Les ouvrages portuaires, l'urbanisation accélérée non contrôlée et les aménagements littoraux intenses ont perturbé profondément le transit des matériaux déplacés par la dérive littorale (Konan, 2011, 2012 ; Touré et al., 2012) : des

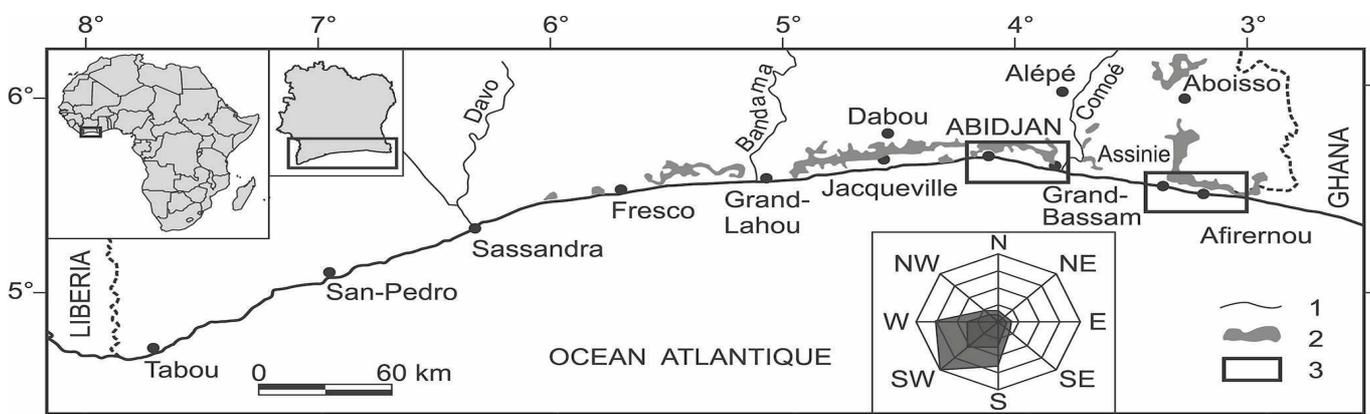


Fig. 1 – Littoral de la Côte d'Ivoire et localisation des zones d'étude.

1 : cours d'eau ; 2 : lagune ; 3 : zone d'étude.

Fig. 1 – Ivorian littoral and location of the study area.

1: watercourse; 2: lagoon; 3: study area.

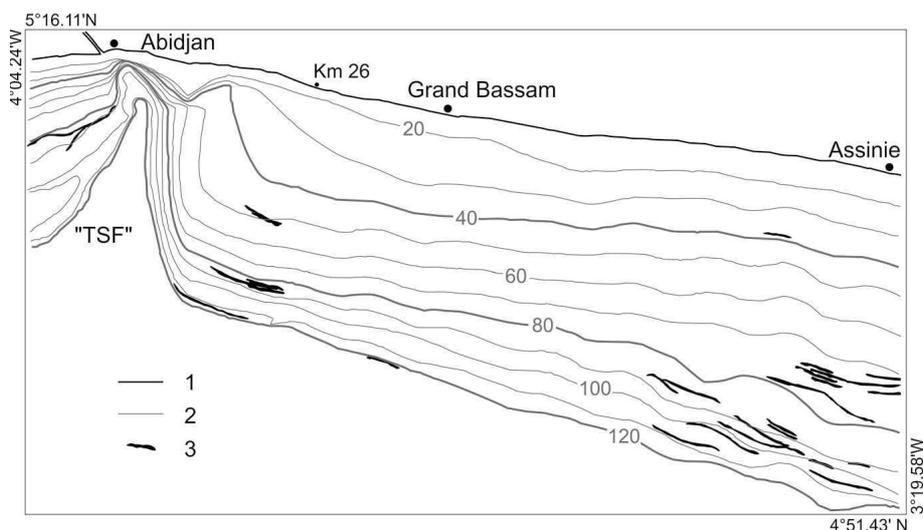


Fig. 2 – Bathymétrie du plateau continental d'Abidjan à Assinie (Monde, 1997, modifié).

1 : Trait de côte ; 2 : Isobathe ; 3 : Barre de grès ; TSF : Trou-Sans-Fond.

Fig. 2 – Bathymetry of the continental shelf from Abidjan to Assinie (Monde, 1997, modified).

1: Coastline; 2: Isobath; 3: Bar sandstone; TSF: Trou-sans-Fond.

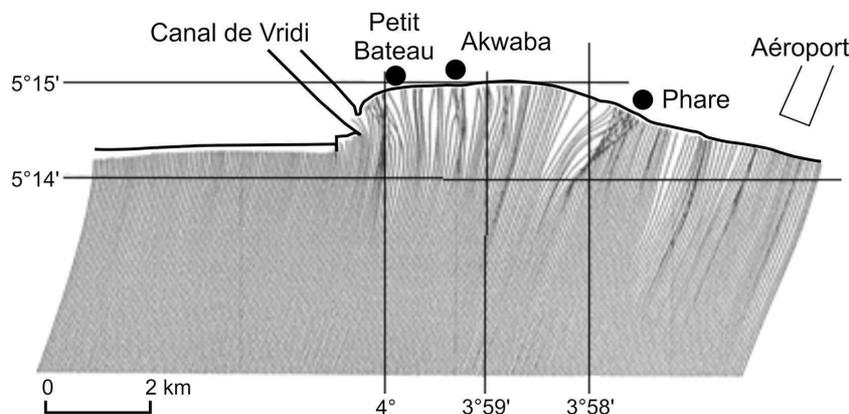


Fig. 3 – Exemple d'épure de réfraction de la houle à Vridi-Port-Bouet (DCGTx, 1985).

Fig. 3 – Example of wave refraction diagram at Vridi-Port-Bouet (DCGTx, 1985).

accumulations se sont formées à l'ouest contre les jetées qui arrêtent le courant, l'érosion prédominant de l'autre côté à l'est. Une partie des sédiments en transit est abandonnée à la tête du Trou-Sans-Fond, canyon sous-marin vers lequel ils pouvaient glisser (fig. 4 ; Paskoff, 1993). Les problèmes environnementaux actuels que rencontre la ville historique de Grand-Bassam (ancienne capitale) découlent pour l'essentiel des nombreuses activités anthropiques sur le périmètre littoral d'Abidjan. L'ouverture du canal de Vridi au niveau d'Abidjan a provoqué un déséquilibre sédimentaire non seulement du transit sédimentaire, mais aussi de l'hydrologie du fleuve Comoé à Grand-Bassam, avec pour conséquence le colmatage permanent de son exutoire naturel. Ceci a pour conséquence l'inondation régulière du quartier France de Grand-Bassam (Konan, 2004, 2011, 2012).

2.3. Marée, houle et dérive littorale

Sur les côtes ivoiriennes, la marée est de type semi-diurne à fortes inégalités journalières ; le marnage dépasse rarement 1,5 m en vives eaux et peut descendre jusqu'à 0,4 m en mortes eaux (Martin, 1977). La houle à la côte, principal agent hydrodynamique de la mobilité des sédiments, est caractérisée sur le littoral ivoirien par une amplitude généralement inférieure à 2 m (Tastet et al., 1985 ; Tastet, 1987). On distingue 3 sortes de houle dont les caractéristiques sont précisées

dans les Tableaux 1 et 2. On a cependant observé à plusieurs reprises, sur les wharfs de Port-Bouet et de Grand-Bassam, des houles pouvant atteindre 7 m de hauteur de période supérieure à 20 s. Les tempêtes et ces «grosses houles» ont une fréquence très faible pendant l'année, cependant elles entraînent une profonde modification du paysage littoral (par exemple, houles de juillet 1984 et de mars 1986 ; Paskoff, 1993). Le seul houlographe situé à Takoradi au Ghana avait cessé d'enregistrer le 14 août 2007 à 15h20, juste avant l'arrivée de ces houles exceptionnelles (http://www.gloss-sealevel.org/data/africa_and_west_indian_ocean). Cependant ces houles peuvent être qualifiées d'exceptionnelles compte tenu des dégâts importants et de l'impact morphologique considérable qu'elles ont occasionné sur l'ensemble du littoral ivoirien (Konan et al., 2009 ; Konan, 2011, 2012 ; Yao et al., 2010). Les valeurs des caractéristiques sont supérieures à la valeur normale maximale de 2 m observée dans le Tableau 2 et font partie des houles exceptionnelles observées sur les wharfs, qui peuvent atteindre 7 m de hauteur. La dérive littorale générale dirigée vers l'Est a été évaluée à environ 800 000 m³/an à l'ouest du canal de Vridi et 350 000 à 400 000 m³/an à l'est du canal à la suite de la construction des épis d'arrêt de sable pour la protection de l'entrée du canal du port d'Abidjan (fig. 4) en 1943 et 1975 (Varlet, 1958 ; Tastet et al., 1985 ; Abe, 2005).

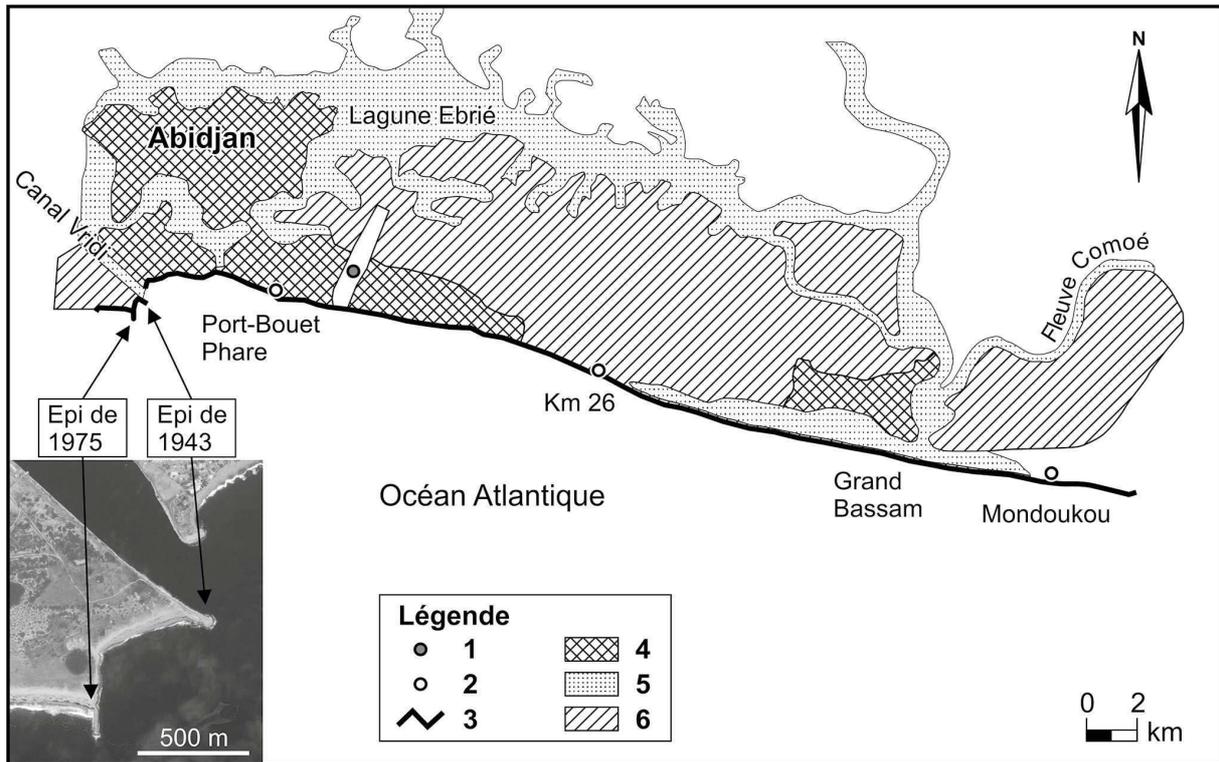


Fig. 4 – Position des profils de la zone Abidjan–Grand-Bassam.

1 : Aéroport ; 2 : profils ; 3 : trait de côte ; 4 : habitat ; 5 : réseau hydrographique ; 6 : végétation.

Fig. 4 – Position of coastal profiles in the Abidjan Grand-Bassam area.

1: Airport; 2: profiles; 3: coastline; 4: habitation; 5: water system; 6: vegetation.

Tab. 1 – Fréquence (%) annuelle des différentes houles (Tastet et al., 1985).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Faible	45	28	18	24	12	6	17	36	45	34	51	58
Moyenne	45	62	59	53	42	53	55	48	41	53	44	37
Forte	10	10	23	23	46	41	28	16	14	13	5	5

Tab. 1 – Annual occurrence of wave trains (Tastet et al., 1985).

Tab. 2 – Caractéristiques de la houle par fonds de 20 m devant Abidjan (Tastet, 1985).

Houle	Amplitude (m)	Période (s)	Direction au large	Fréquence annuelle	Période de dominance
Faible	0,8 - 1	7 - 11	S - SW	30 %	Nov. Déc. Jan.
Moyenne	0,8 - 1 1 - 1,8	10	S - SW	50 %	40 - 60 % Toute l'année
Forte	1,8 - 2	10 - 20	S - W	20 %	Mai - juin

Tab. 2 – Wave characteristics by 20 m depth facing Abidjan (Tastet, 1985).

2.4. Origine des vagues exceptionnelles du 14 août 2007

Dans la nuit du 13 au 14 août 2007 s'est produit un séisme de magnitude 4,8 sur l'échelle de Richter dans l'Océan Atlantique sud, à 1800 km des côtes ivoiriennes détecté par les réseaux sismique et infrasonique de la station géophysique LAMTO en Côte d'Ivoire et par l'USGS (United States Geological Survey) des Etats Unis d'Amérique (earthquake.usgs.gov/earthquakes/map). Les messages d'alerte de ces deux centres internationaux ont précisé les coordonnées de l'épicentre à proximité de l'île de l'Ascension (7,783° S; 13,642° O) dans l'Océan Atlantique avec une profondeur de l'hypocentre vers 10 km (earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/). La valeur seuil pour engendrer un tsunami étant de 6,3 selon le catalogue de tsunamis de NOAA, cette magnitude de 4,6 est suffisante pour déclencher des vagues à la surface de l'océan, mais ne peut donc pas provoquer un

tsunami. Les relevés effectués par les chercheurs de la station internationale géophysique LAMTO en Côte d'Ivoire montrent qu'une houle de hauteur significative (H_s) de 2,87 m (Tomety, 2013) a été engendrée à l'endroit du séisme et s'est dirigée vers la côte ivoirienne. Il estime la période de retour d'une telle vague à environ 10 ans. Elle a submergé l'ensemble du littoral ivoirien (Konan et al., 2009 ; Konan, 2011 ; Yao et al., 2010). Des houles exceptionnelles aux conséquences aussi catastrophiques (dégâts matériels importants) que celles d'août 2007 ont été signalées dans la baie de Port-Bouet (Abidjan) depuis 1944, dont les origines ne sont pas connues (tab. 3). Les vagues d'août 2007 ont atteint une hauteur significative de 2,87 m avec une période de 10,48 s (Tomety, 2013) qui dépasse la hauteur (2 m) moyenne générale des fortes houles observées sur les côtes ivoiriennes (tab. 2).

Tab. 3 – Mémoire des catastrophes à Abidjan (Touré et al., 2012 ; modifié).

Tab. 3 – Memory of disaster in Abidjan (Touré et al., 2012; modified).

Date	Phénomènes observés	Dommages	Source
1 ^{er} octobre 1905	Glissement de terrain	Engloutissement d'un petit wharf dans le secteur de Toviato	Robin et al. (2004)
1906	Glissement de terrain	Affaissement de la jetée ouest	Diabaté (1996)
1 ^{er} mai 1908	Glissement de terrain à l'endroit de l'actuel Palm Beach	Engloutissement de wharf	Koffi et al. (1989)
7 mai 1944	Fortes houles	Digue ouest rasée sur 27 m (20 000 t de matériaux déplacés)	Paskoff (1993) Diabaté (1996) Koffi et al. (1989) Hauhouot (2000)
Du 23 au 24 juin 1944	Fortes houles	Digues ouest rasées sur 35 m (35 000 t de matériaux déplacés)	
Du 9 au 10 juillet 1954	Fortes houles	5 000 tonnes d'enrochement de la digue Est sont déplacées	
Du 19-21 juin 1960	Fortes houles	Digues du canal de Vridi endommagées	
1968	Fortes houles	Dégâts sur les canalisations de la Société Ivoirienne de Raffinage	
Juillet 1984	Fortes houles	Dégâts multiples : routes coupées (route du phare de Port-Bouet), habitats détruits, installations de la SIR affectées	Abe (2005) N'Doufou (2012) Konan et al. (2009)
Juillet 1986	Fortes houles	Route de ballade coupée au phare	
20 juillet 1989	Fortes houles	Destruction du phare de Grand-Lahou	
14 août 2007	Déferlement de vagues d'origine sismique	Dizaines d'habitations détruites	

2.5. Vent

En Côte d'Ivoire, les tempêtes fréquentes et les tornades surviennent souvent en mars et en avril. La zone d'étude est dans la ligne de transit des tempêtes venant de l'extrémité orientale du Golfe de Guinée. Des rafales violentes venant de l'Est apparaissent en avril et juin, encore en septembre et octobre mais la vitesse n'excède pas 50 km/h (13,90 m/s). Néanmoins, tous les vents violents sont de courte durée (Abe, 2005). Dans le Golfe de Guinée, il n'y a pas de vents forts permettant de générer les mers de vent (les vitesses du vent sont en moyenne de l'ordre de 4,4 m/s ; Laïbi, 2011). L'enregistrement tri-horaire de la vitesse du vent effectué par l'Association pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) indique que pour la période du 12 au 14 août 2007, la vitesse la plus élevée est de 28,80 km/h (8 m/s) quand la vitesse mensuelle moyenne est de 10,8 km/h (3 m/s ; ASECNA, 2007). Cette vitesse de vent (entre 3 m/s et 8 m/s) peut engendrer des houles dont la hauteur significative (Hs entre 0,5 m et 2 m) demeure trop faible pour engendrer des dégâts de forte ampleur. La rose des vents de la Figure 1 indique que la vitesse de vent sur le littoral ivoirien dépasse rarement 6 sur l'échelle de Beaufort et que les hauteurs de houle significative dépassent rarement 3 m (www.weather.gov/iwx).

3. Matériel et méthodes pour l'étude de la plage

La méthodologie utilisée permet de replacer cet évènement au sein de l'évolution pluriannuelle des plages étudiées en évaluant l'importance des épisodes exceptionnels morphogènes dans le fonctionnement à plus long terme du littoral ivoirien. Depuis 1984, en plusieurs points du littoral entre Abidjan et Assinie, nous avons effectué plusieurs campagnes (bimestrielles) de levés de profils topographiques de plage à l'aide d'un niveau de chantier de marque Kern Swiss GK1-A et d'un tachéomètre de type Wild RDS. Ces niveaux sont associés chacun à une mire graduée de quatre mètres (4 m) de longueur, d'un GPS MAP Garmin 76 CXs et d'un réseau de points d'observation fixes distants de 100 à 200 m (généralement des ouvrages comme indicateurs géographiques), installés par le Centre de Recherches Océanologiques d'Abidjan (C.R.O, ex-ORSTOM). Les profils sont fixes et alignés sur au moins trois repères à chaque sortie sur le terrain, pour garder identique la direction, et sur des zéros

locaux pour la superposition des courbes enveloppes. Pour cette étude, afin de faciliter la compréhension, compte tenu du nombre important de profils de plage recueillis dans cette zone (relevés bimestriels de mars 2007 à mars 2009), seuls les profils couvrant les périodes avant et après l'épisode érosif exceptionnel d'août 2007 ont été retenus. Un profil a été levé le 20 août 2007, quelques jours après le déferlement des vagues du 14 août 2007 pour faire ressortir l'impact à partir d'une étude comparative avec les autres profils (mars 2000-mars 2009). Les données de terrain ont permis de restituer la morphologie de la plage sous forme de courbes enveloppes représentant les profils de plage (indicateur morphologique) à différentes dates à l'aide des logiciels Excel et Kaleidagraph. La superposition des profils renseigne sur la tendance morphologique (érosion ou engraissement) de la plage. Le niveau a un objectif de 38 mm de diamètre avec une visée minimum de 0,5 m. La précision pour 1 km de nivellement double est de $\pm 1,5$ mm, avec une précision de réglage de $\pm 0,5''$ de rapport stadimétrique 100. La longueur des profils de plages, n'excédant généralement pas 300 m, offre une précision de $\pm 0,8$ mm. Afin de quantifier les sédiments mobilisés, la méthode des moindres carrés appliquée aux trapèzes et aux triangles a été utilisée pour déterminer les surfaces d'érosion et d'engraissement (Brabant, 2003). Les volumes de sédiments déplacés ou mobilisés sont estimés à partir de la détermination de ces superficies érodées ou engraisées. Cette méthode présente, comme bien d'autres, des imperfections qui tiennent compte de la détermination des aires de contour non fermé, de la distance entre deux profils consécutifs, de l'instabilité dimensionnelle du support ou jeu de papier, de la précision du report, de la qualité de l'instrument de mesure des bases, des hauteurs et des erreurs accidentelles de mesure. Il est donc conseillé de s'astreindre, au besoin, à une vérification graphique ou simplement à un minimum de 2 calculs (Brabant, 2003).

Pour connaître l'évolution passée sur une période de 10 ans, nous avons utilisé les photographies aériennes disponibles du 1^{er} janvier 1979 (campagne CIV 111 à l'échelle 1/15 000) et du 25 mai 1989 (campagne CIV 122 à l'échelle 1/1 500) de la zone Abidjan-Grand-Bassam. Elles nous ont été fournies par le Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) du Bureau National d'Etude Technique et Développement (BNETD) d'Abidjan. Ce choix se justifie par la période moyenne de 10 ans, un temps suffisant pour déterminer des tendances à moyen terme. Ensuite cette période de temps semble très représentative des dernières tendances de l'impact

(enregistrement de 2 houles exceptionnelles dans l'intervalle de ce temps dont les reculs varient entre 10 et 30 m) des houles de forte énergie sur les côtes ivoiriennes en 1984 et 1986 (Paskoff, 1993 ; Abe, 2005). Elles ont été géoréférencées (dans le système UTM WGS 84, fuseau 30) à partir des cartes topographiques au 1/25 000 et nous ont permis d'estimer les transformations intervenues au niveau du trait de côte et l'évolution des étendues de plage. Pour les photographies aériennes, le trait de côte correspond au pied de dune en l'absence de toute autre limite fiable (Guillen et al., 1999). Celui-ci est identifiable sur les photos aériennes, car matérialisé par une rupture de pente qui marque le passage de l'estran. Pour le géoréférencement, nous avons après correction géométrique des photographies (au moins 9 points de contrôle, ruines, phares, carrefours bien répartis sur les photographies aériennes avec leurs homologues sur la carte topographique 1/25 000), utilisé le logiciel Microstation Descartes qui fournit un exemple de répartition de points pour corriger les photos. L'erreur dans la détermination des amers est liée à l'imprécision du document de référence, la carte au 1/25000. D'une part, toutes les photos doivent être rigoureusement traitées de façon identique. D'autre part, la présence et l'écartement des amers conditionnent la valeur des corrections géométriques. Les distorsions dues au terrain, vues d'en haut, peuvent induire des erreurs de recalage, mais ce problème se rencontre surtout sur des secteurs où la topographie est très accidentée. En effet, toute carte étant une représentation simplifiée et conventionnelle de la réalité, géo référencer des photographies aériennes sur un tel document est une source d'erreurs, étant donné qu'il est extrêmement difficile de déterminer avec exactitude la position des amers (routes, ponts, carrefours etc.. qui sont des éléments surdimensionnés) sur la carte. On a un risque d'erreur, mais qu'il est difficile à estimer avec précision. Cependant les chercheurs américains qui ont investi le sujet (Dolan et al., 1980 ; Crowell et al., 1991; Thieler et Danforth, 1994) estiment que la superposition des caractéristiques terrestres observées sur les photographies et sur une carte à cette échelle peut engendrer une erreur de ± 8 m par rapport à la réalité. Nous avons

donc retenu cette valeur de 10 m comme limite de précision inhérente au document de référence. Le logiciel Microstation Descartes offrant une grande fiabilité, il subsiste parfois une erreur résiduelle évaluée par le logiciel, qui est extrêmement faible (maximum 0,2 pixel par amer dans notre cas, qu'il convient de porter à 1 pixel à l'écran de l'ordinateur pour chaque amer). Compte tenu de la définition de l'image, un pixel représente une distance d'un mètre. Cette erreur est donc estimée à 1 m pour chaque photographie par rapport à la réalité. Sur les photographies aériennes, le trait de côte n'étant pas toujours discernable (par exemple à cause d'un léger flou à la limite entre le plan d'eau et le sable), la marge d'erreur est estimée à 1 pixel, c'est-à-dire 1 mètre pour chaque photographie. La somme de ces erreurs potentielles engendre une marge d'erreur globale de ± 10 mètres par rapport à la réalité. Comme chacune de ces 3 erreurs a une probabilité d'occurrence de 1 sur 2, la probabilité pour que survienne une erreur de ± 10 m est de 1 sur 8, et l'erreur moyenne est ± 5 mètres, qui doit être considérée comme une valeur approchée. Par conséquent, nous avons retenu dans cette étude les vitesses d'évolution supérieures à cette marge d'erreur. Les traits de côte ont été digitalisés et numérisés à l'aide des logiciels ENVI 4.3 et ArcView 3.2. Nous avons mesuré le long des transects perpendiculairement à la plage la distance qui les sépareit. A partir de ces transects qui séparent les deux états, nous avons déterminé les différentes vitesses de mobilité (érosion, stabilité et engraissement) du trait de côte entre deux prises de vue (Robin, 2002). La facilité de traitement et la fiabilité des résultats obtenus (Crowel et al., 1991; Dolan et al., 1991) amènent un grand nombre de recherches à utiliser les clichés aériens, dont l'analyse diachronique met en évidence les transferts sédimentaires (Guillemot et Thomas, 1985 ; Shoshany et al., 1996 ; Mc Bride et Byrnes, 1997 ; Suanez, 1997 ; Sabatier, 2001 ; Sabatier et Suanez, 2003).

Nous nous sommes ainsi focalisés sur l'évolution à moyen terme de 10 ans (1979-1989) du littoral qui prend en compte le maximum d'événements morphogéniques comme les tempêtes et les impacts anthropiques (Paskoff, 1993 ; Crowel et al., 1997 ; Douglas et al., 1998 ;

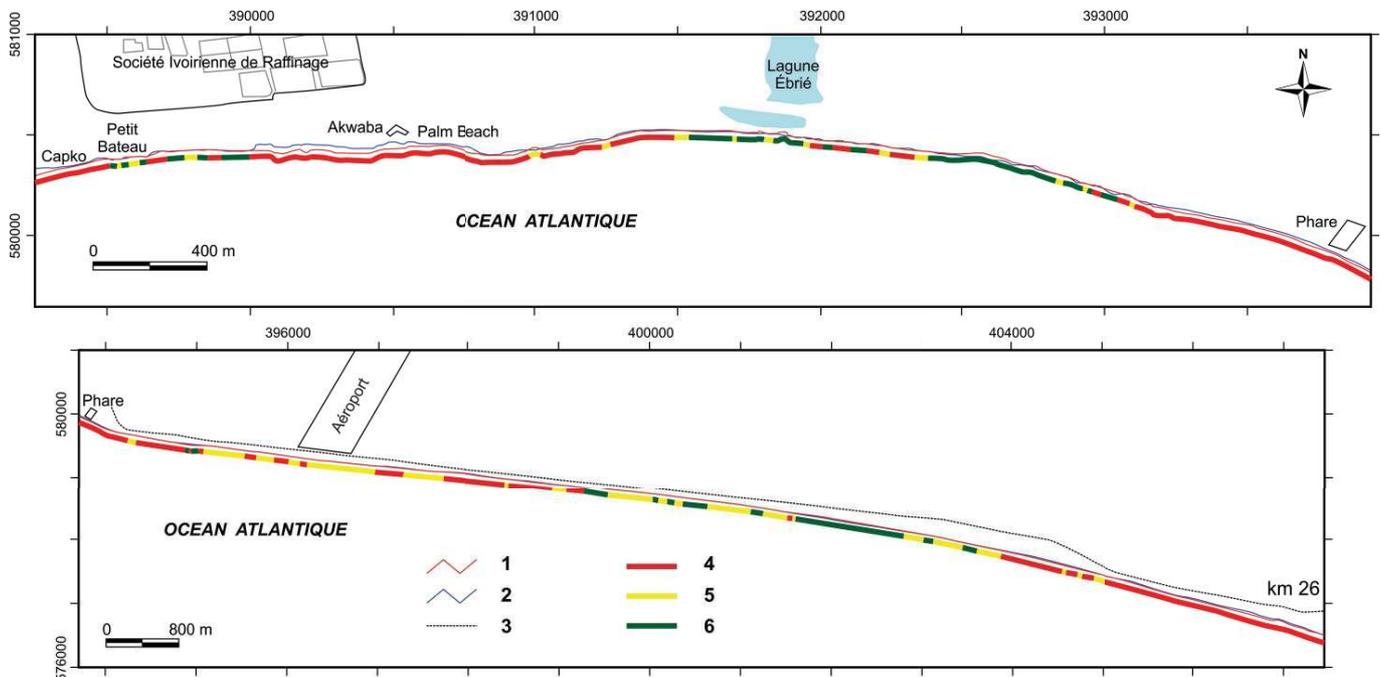


Fig. 5 – Modifications intervenues sur la ligne de rivage d'Abidjan au Km 26 entre 1979 et 1989.

1 : Trait de côte en 1979 ; 2 : trait de côte en 1989 ; 3 : voie bitumée ; 4 : recul ; 5 : stabilité ; 6 : avancée.

Fig. 5 – Changes of Abidjan coastline at km 26 between 1979 and 1989.

1: Coastline of 1979; 2: Coastline of 1989; 3: asphalted road; 4: retreat; 5: stability; 6: progress.

Konan, 2011, 2012 ; Touré et al., 2012). Elles couvrent une période assez importante permettant d'apprécier l'évolution historique du trait de côte. Les photographies aériennes démontrent une faible mobilité du trait de côte à l'échelle pluri-décennale mais dans les contextes morphodynamiques différents de deux zones, le secteur d'Abidjan avec un plateau continental entaillé d'un canyon favorisant l'arrivée de houles énergiques et le secteur d'Assinie avec des houles freinées depuis le large (fig. 2). Enfin, l'état de la mer, au moment de la prise de vues aériennes et l'effet des surcote-décotes, peuvent perturber l'interprétation de la ligne de rivage. Cependant, toutes les photos ont été prises en temps clair avec des conditions météo marines calmes (vent de terre) rendant comparable et fiable le tracé des traits de côte. La marge d'erreur de nos résultats est acceptable compte tenu des vitesses rapides de recul/avancée du rivage dans le périmètre littoral de Port Bouet (où ont été utilisées des photos aériennes). Pour évaluer les dégâts matériels, nous avons mené une enquête auprès des victimes des épisodes érosifs d'août. La méthode choisie est l'interview systématique des propriétaires de maisons des locataires et chefs des familles concernées.

4. Résultats et interprétations

Afin de faire ressortir l'impact des houles «exceptionnelles», l'analyse des résultats est d'abord basée sur l'évolution antérieure des plages, ensuite sur l'impact morphogène des houles du 14 août 2007 et enfin sur la capacité de résilience des différentes plages étudiées.

4.1. Le cordon littoral Abidjan-Grand-Bassam

4.1.1. Evolution historique (1979-2007) du cordon littoral avant l'arrivée des houles d'août

Le segment de côte Abidjan-Grand-Bassam (fig. 1) est marqué par une érosion généralisée avec un taux moyen annuel de recul de 1,29 m/an dans la baie d'Abidjan et 2,15 m/an au Km 26 à Grand-Bassam entre 1979 et 1989 (fig. 5, tab. 4). De 1990 à 2007 (fig. 6A), la dynamique morpho-sédimentaire dans la baie de Port-Bouet (Abidjan) met en relief une évolution régressive du segment de plage dans la baie de Port-Bouet avec une vitesse de 0,5 m/an. Le segment de côte au Km 26 à Grand-Bassam durant cette même période affiche une relative stabilité du trait de côte (progradation de 0,11 m/an au Km 26 et recul de 0,15 m/an à Mondoukou, fig. 6A).

Tab. 4 – Vitesse de l'évolution du trait de côte entre 1979 et 1989 d'Abidjan au Km 26, à partir des photographies aériennes.

Profils	Vitesse moyenne (m/an)	Vitesse moyenne par station (m/an)	Vitesse moyenne par secteur (m/an)	Tendance
Petit Bateau P1	- 0,94	- 0,32	- 1,29 dans la baie de Port-Bouet	Erosion
Petit Bateau P2	+ 0,31			
Akwaba P1	- 2,46	- 2,60		
Akwaba P2	- 2,75			
Phare P47	- 1,08	- 0,96		
Phare P48	- 0,84			
Km 26 P2	- 1,69	- 2,15	- 2,15 au Km 26	Erosion
Km 26 P1	- 2,61			

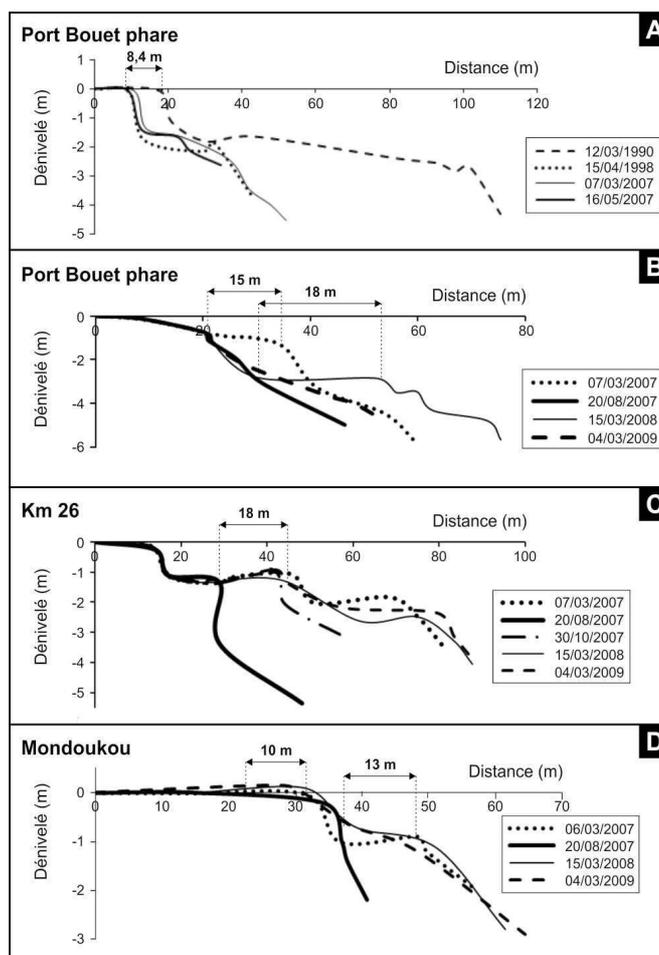


Fig. 6 – Evolution morphologique de la plage d'Abidjan à Mondoukou (Grand-Bassam).

A, B : Phare de Port-Bouet ; C : Plage de Km 26 ; D : Plage de Mondoukou (Grand-Bassam).

Fig. 6 – Morphological evolution of the beach in Abidjan-Mondoukou (Grand-Bassam).

A, B : Beach of Port-Bouet phare; C : Beach of Km 26; D : Beach of Mondoukou (Grand-Bassam).

Tab. 4 – Rate of coastal movements between 1979 and 1989 from Abidjan to Km 26 from aerial photographs.

4.1.2. Effets morphologiques des houles exceptionnelles sur le cordon littoral Abidjan-Grand-Bassam

La comparaison du profil de mars 2007 enregistré avant l'arrivée des vagues exceptionnelles et celui du 14 août 2007 enregistré après montre une forte érosion des plages de ce cordon littoral montre un recul important du trait de côte, de l'ordre de 15 m au phare de Port-Bouet, 18 m au Km 26 et 10 m à Grand-Bassam (Mondoukou ; fig. 6, 7A-B). Les profils d'août présentent une allure concave avec des talus d'érosion abrupts atteignant 2 m d'amplitude. Ils sont caractérisés par une pente très forte jusqu'au large qui indique un départ important de sédiments. Cette morphologie des plages exprime l'ampleur de l'impact de ces houles qui les ont considérablement affectées à Abidjan et au Km 26 (fig. 7). A Grand-Bassam ces houles exceptionnelles ont provoqué la disparition brusque d'une berme de 13 m et déraciné des cocotiers. Cette dynamique spectaculaire a imprimé un recul du trait de côte de l'ordre de 10 m sur cette partie du littoral (fig. 6C). L'amplitude des mouvements sédimentaires est globalement importante compte tenu des impacts morphologiques. Elle avoisine 5 m à Abidjan, 4 m au Km 26 et 3 m à Mondoukou (Grand-Bassam). L'importance des mouvements verticaux se traduit sur tous les profils de ces cordons par des talus d'érosion (fig. 6-7). Les dénivelées des talus d'érosion sont légèrement au-dessus de 2 m et les amplitudes des mouvements sédimentaires au-dessus de 3 m. De façon générale, nos travaux montrent que les plages du km 26 et de Mondoukou (Grand-Bassam) sont restées relativement stables (+0,11 m/an au Km 26 et -0,15 à Mondoukou) de 1997 à 2007 avant l'arrivée des houles du 14 août 2007 qui ont fortement érodé ces plages (-15 m au Km 26 et -10 m à Mondoukou). Cette évolution traduit une sensibilité importante de celles-ci à l'arrivée de houles exceptionnelles.



Fig. 7 – Impacts des vagues exceptionnelles des 13 et 14 août 2007.

A : Restaurant Petit Bateau atteint par la mer et bateau échoué sur la plage de Port-Bouet à cause des vagues ; B : Plusieurs maisons détruites sur la plage ; C : Route en bordure de mer coupée par l'érosion régulière au niveau du phare de Port-Bouet (août 2007) ; D : Importante réduction de la largeur des plages et développement d'un important talus d'érosion au Km 26.

Fig. 7 – Impacts of exceptional waves on 13-14 August, 2007 at the Port Bouet lighthouse.

A: Restaurant Petit Bateau reached by the sea and Boat trapped on the beach at Port-Bouet; B: Several houses destroyed on the beach; C: Beach Road cut by natural erosion at the level of the lighthouse in Port-Bouet (August 2007); D: A significant reduction of beach width and development of an erosional scarp at Km 26.

4.1.3. Capacité de résilience des plages Abidjan-Grand-Bassam

Les résultats dans la baie de Port-Bouet montre un engraissement progressif de la plage jusqu'en mars 2008, matérialisé par la formation d'une plateforme sableuse avec une berme en avant de 22,4 m. A partir de cette date, les gains et les pertes en sédiments ont commencé à s'équilibrer jusqu'à un état stable de la plage où sa reconstitution est demeurée incomplète jusqu'en mars 2009 (profil du 07/03/2009 ; fig. 7, 8A-B). Le budget sédimentaire global de la baie de Port-Bouet à Abidjan n'est pas favorable à l'alimentation des plages. En effet, cette plage est rendue fragile et sensible aux vagues par la diminution considérable des stocks sédimentaires pour son maintien depuis 70 ans (construction des épis, digues et musoirs en 1943 et 1975 pour la protection des infrastructures portuaires), du fait de la réduction des apports et de leur rétention. Ce déficit d'apport sédimentaire ne permet pas à cette partie du littoral de retrouver sa position initiale après d'importants événements. Sur le segment de côte Km 26-Grand-Bassam, deux mois après cet épisode érosif exceptionnel (visible avec le profil du 30/10/2007 de la Figure 6B), la plage a amorcé sa reconstruction. La berme, témoin de la dynamique, a progressé sur plus d'une dizaine de mètres vers la mer permettant à la plage de retrouver sa position initiale (fig. 6B-C, 8B).



Fig. 8 – Etat de la plage au Km 26. A : le 20 août 2007 après le passage de la tempête.

On note une importante réduction de la largeur des plages et le développement d'un important talus d'érosion ; B : plage reconstituée en mars 2008, sept mois après le passage des houles exceptionnelles du 14 août.

Fig. 8 – Situation of the beach at the km 26. A: August 20th 2007 after the passage of the storm.

An important diminution of beach width and the development of an erosion scarp are visible; B: beach reconstituted in March 2008, seven months after the passage of August 14 exceptional waves.

4.2. Le cordon littoral Assinie-Aforenou (frontière du Ghana)

4.2.1. Evolution historique (1990-2007) du cordon littoral avant l'arrivée des houles d'août

L'évolution morpho-sédimentaire de la zone littorale Assinie-Aforenou (Est du littoral ivoirien) au cours de la période 1990-2007 permet de distinguer deux segments de côte, de part d'autre de l'embouchure de la lagune Aby à Assinie, dont la dynamique est loin d'être homogène (fig. 9, 10A-B). A l'ouest de l'embouchure de la lagune Aby, érosion et engraissement se succèdent entre les mi-estran et bas-estran en période de temps agité et de beau temps, faisant varier énormément la longueur des profils (largeur des plages ; fig. 10B-C, 11). L'amplitude des mouvements verticaux demeure faible (inférieure à 2 m) traduisant un cordon bas et presque plat. Cependant, la plage s'accroît (gain de sédiments

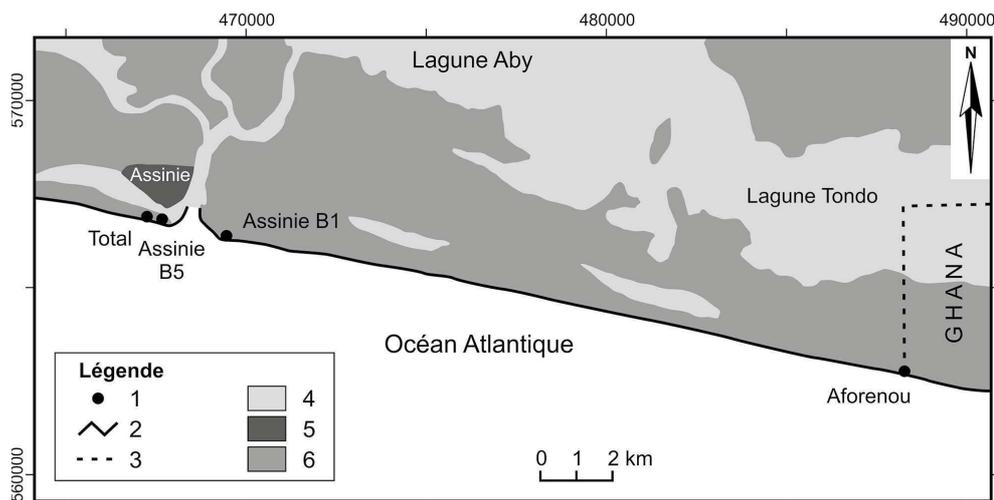


Fig. 9 – Position des profils de la zone Assinie-Aforenou.

1 : Profils ; 2 : trait de côte ; 3 : limite territoriale ; 4 : réseau hydrographique ; 5 : habitat ; 6 : végétation.

Fig. 9 – Position of the coastal profiles in the Assinie-Aforenou area.

1: Profiles; 2: coastline; 3: territorial limit; 4: water system; 5: habitation; 6: vegetation.

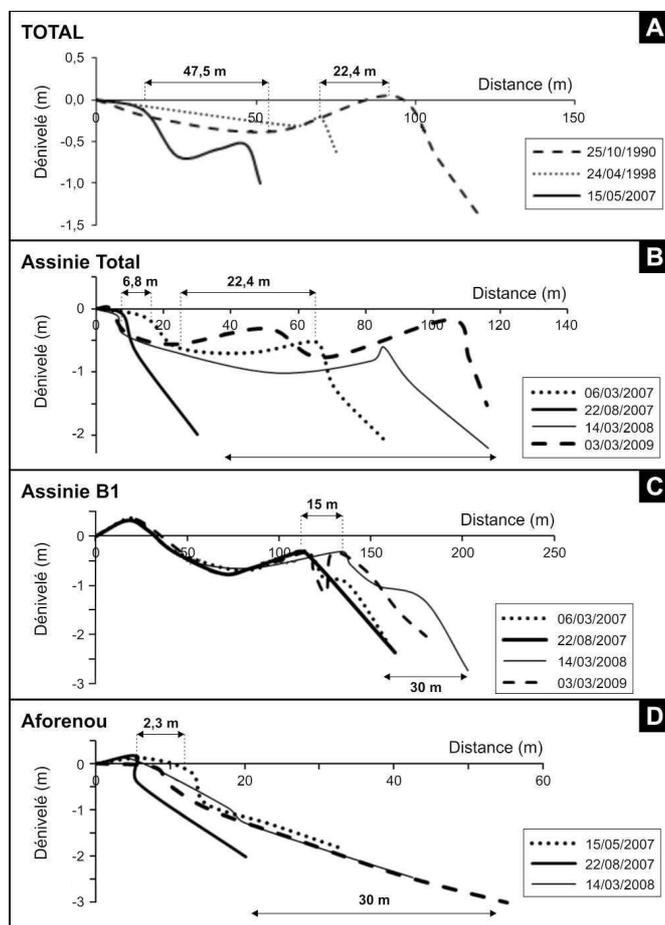


Fig. 10 – Evolution morphologique de la plage à l'ouest de l'embouchure de la lagune Aby.

A, B : Plage d'Assinie Total ; à l'est de l'embouchure ; C : Plage d'Assinie B1 ; D : Plage d'Aforenou.

Fig. 10 – Morphological evolution of the beach on the Western side of the Aby lagoon's inlet.

A, B : Assinie Total beach; at the eastern side of the Aby inlet; C: Assinie B1 beach, D: Aforenou beach.

avec des profils en long passant de 30 à 120 m ; fig. 10B). Ce bas cordon favorise la fréquence des submersions et le recul drastique des bermes et des plages, ce que confirme la forme généralement sinueuse de certains profils (fig. 10B) à l'Ouest de la lagune Aby. Ainsi, un recul remarquable de 50 m précédé de la disparition d'une berme d'environ 22 m, met en relief une dynamique plus intense au niveau de ce cordon littoral. Les profils se caractérisent par un talus d'érosion relativement faible d'environ 0,75 m de dénivellation (fig. 10B). Le taux moyen de recul est de 1,85 m/an de 1990 à 2007 sur ce segment de côte. Contrairement à l'Ouest, le côté Est de l'embouchure de la lagune Aby subit un engraissement d'une vitesse moyenne de 3,5 m/an (fig. 10C). Sur ce cordon, la forme des profils de la plage confirme cet important engraissement. En effet, la berme de 1990 située à 69 m du repère se retrouve à 130 m de ce repère en 1998.

4.2.2. Effets morphologiques induits par les houles d'août sur le segment de côte Assinie-Aforenou

A l'ouest de l'embouchure de la lagune Aby, les profils enregistrent une érosion de l'estran constituée pour l'essentiel d'une berme de plus de 35 m et un recul du trait de côte de 6,8 m (fig. 10B, profil du 06/03/2007 avant l'arrivée des houles). Ce recul, engendré par la forte énergie de la houle, est matérialisé par le déracinement des rangées de cocotiers entraînés vers l'embouchure de la lagune Aby (fig. 11A). Durant la même période, les profils situés à l'est immédiat de l'embouchure de la lagune Aby (comparaison du profil du 10/03/2007 et celui du 22/08/2007) marquent une stabilité du trait de côte. Sur ces plages du cordon Est de la lagune Aby, l'équilibre de la plage n'a pas été perturbé après le passage des houles, seuls les mi- et bas-estrans sont concernés par les mouvements sédimentaires. Durant la période d'étude (mars 2007-mars 2009), cette plage d'Assinie a connu un important engraissement de près de 15 m au niveau des mi- et bas-estrans (fig. 10B, 11C). Les quantités de sable érodées et déposées durant cette période tendent vers un équilibre. Les plages d'Aforenou (frontière avec le Ghana voisin) du cordon littoral d'Assinie n'ont pas été affectées davantage par ces houles d'août 2007. Les profils et les stocks sédimentaires n'ont pas été significativement modifiés. Le recul lié à l'arrivée des houles d'août 2007 dans cette zone est de 2,3 m et reste relativement faible (fig. 10C). Ce cordon littoral peut être considéré comme stable, car avec l'arrivée des houles, on enregistre un faible recul (entre 2,3 et 6,8 m) par endroits et une stabilité générale du trait de côte. Cette étude a mis en exergue que les plages situées à

l'ouest de la lagune Aby ont subi une sévère érosion (6,8 m en un cycle de marée à l'arrivée des houles de forte énergie du 14 août 2007) d'une vitesse moyenne de 1,85 m/an quand le côté oriental s'engraisse avec une vitesse de 3,50 m/an (fig. 10-11). L'arrivée des houles du 14 août 2007 a engendré sur cet espace littoral une érosion variant entre 2,3 et 6,8 m en un cycle de marée. Ce recul drastique en 24h représenterait une érosion de plus d'un an, si on considère un recul moyen de 1,85 m/an entre 1990 et 2007 de la même cette zone.

4.2.3. Capacité de résilience des plages d'Assinie-Aforenou

À l'Ouest de l'embouchure de la lagune Aby, la forme des profils explique d'importants mouvements sédimentaires sur l'estran. Ces plages, après le recul de 6,8 m en une nuit imprimé par les houles, ont connu un recul de 3,8 m (août 2007-mars 2009 ; fig. 10B, 11B) en dehors de l'influence des vagues d'août 2007. La Figure 11B montre l'exemple d'une plage en submersion (fig. 11B1, 11B3) faisant reculer le trait de côte (fig. 11B4) sans emporter toute la berme précédente (fig. 11B5). L'amplitude des mouvements sédimentaires est faible et estimée à 2,50 m. Après le passage des houles, le bilan du cycle érosion-accumulation est positif sur ce site (la largeur de la plage est passée de 23 m en août 2007 à 120 m en mars 2008), c'est-à-dire qu'il enregistre un engraissement d'environ 97 m d'août 2007 à mars 2008 (fig. 11B5). Cette plage à l'ouest de l'embouchure de la lagune Aby, soumise à une menace directe de submersion pendant les plus fortes houles ou les crues, se caractérise sur le terrain par des baïnes et des étangs temporaires (fig. 11B). Cette caractéristique morphologique fait que l'action du déferlement des vagues s'étend bien au-delà de l'estran. Elle conditionne également le passage d'une tranche d'eau suffisamment abondante pour générer des écoulements importants permettant la formation de ces baïnes et



Fig. 11 – Etat de la plage à l'embouchure de la lagune Aby à Assinie.

A : A l'ouest des Cocotiers déracinés par les houles exceptionnelles sur les plages de l'Ouest de la lagune Aby et transportés vers l'embouchure (août 2007) ; B : Photo du 14/11/2008 montrant les baïnes et l'évolution de la plage à l'Ouest de la l'embouchure de la lagune Aby (1 et 4 : traces d'un étang ou baïne ; 2 : traces des vagues de submersion ; 3 : trait de côte ; 5 : engraissement de la plage) ; C : Important engraissement à Assinie B1 à l'est de l'embouchure.

Fig. 11 – State of the beach at the Aby lagoon inlet at Assinie.

A: In the west, uprooted coconut trees by the exceptional swells on the Aby lagoon beaches and moved to the inlet (august 2007). B: Photo of 14.11.2008 showing baïnes and evolution of the beach on the Western side of the Aby lagoon inlet (1 and 4: marks of pond or baïnes; 2: marks of washovers; 3: coastline; 5: beach accretion; C: Important fattening to Assinie B1 east side of the Aby lagoon inlet.

étangs temporaires. Située à l'ouest de l'embouchure de la lagune Aby, cette partie du littoral ivoirien est l'une des zones les plus sensibles du littoral, et l'une des plus mouvementées de la zone d'Assinie. Elle représente donc une zone à risque, facilement inondable en cas de houle de forte énergie. À l'ouest de l'embouchure de la lagune Aby, la plage d'Aforenou s'est entièrement reconstituée en octobre 2007 après le passage des houles exceptionnelles qui ont réduit la largeur de l'estran de 2,3 m (fig. 12B). Ce qui représente une période de résilience d'environ 2 mois. Les formes concaves et convexes qui se succèdent entre août 2007 et mars 2009 (profils des 22/08/2007 et 09/03/2009) traduisent l'alternance de l'érosion et de l'engraissement, avec une avancée du trait de côte liée à l'ensablement de 2,3 m. Le trait de côte n'a plus varié depuis octobre 2007 et est resté stable autour de ce dernier profil, illustrant l'état d'équilibre de cette plage entièrement reconstituée (fig. 10C, 12B). En terme de bilan général durant la période d'observation, il apparaît que le trait de côte est resté stable à l'est de l'embouchure Aby.



Fig. 12 – Etat de la plage à Aforenou.

A : Erosion de la plage avec apparition d'un micro-talus d'érosion et des algues vertes sur la plage (août 2007) ; B : réengraissement de la plage en octobre 2007.

Fig. 12 – State of the beach at Aforenou.

A: Beach erosion with micro beach cups and green algae on the beach (in August, 2007); B: new accretion of the beach in October, 2007.

4.3. Facteurs conditionnant la capacité de résilience des plages des deux cordons littoraux étudiés

Replacée dans l'évolution pluriannuelle des plages, la houle, qui a modifié considérablement les plages du littoral ivoirien en août 2007, apparaît comme un évènement exceptionnel. La hauteur significative de cette houle (H_s), 2,87 m (Tomety, 2013), est supérieure aux houles qualifiées de fortes (H_s 1,8 à 2 m, tab. 2; Tastet, 1985) et pourrait être à l'origine du dysfonctionnement de l'houlographe de Takoradi le 14 août 2007 à 15h (http://www.gloss-sealevel.org/data/africa_and_west_indian_ocean). En effet, toutes les plages ont été érodées (fig. 13) avec des volumes de sédiments plus ou moins importants, surtout dans la baie de Port-Bouet à Abidjan où les activités économiques et la population sont concentrées (fig. 14A-B). Cependant, les effets de la houle d'août dans l'évolution du cordon littoral d'Assinie sont beaucoup moins marqués que dans le secteur de la baie d'Abidjan. Ceci est du (1) à la morphologie du plateau continental à Assinie qui minimise les processus d'érosion par le freinage ou la diminution de l'énergie de la houle (fig. 2), mais aussi (2) à un budget sédimentaire important, contrairement à la baie de Port-Bouet à Abidjan qui est une zone en érosion permanente (zone fortement urbanisée et industrialisée ; Monde, 1997).

Un bilan morpho-sédimentaire des sites à partir de levés de terrain a été réalisé, avant et après l'épisode érosif d'août 2007 (fig. 13). Cette mobilité des sédiments confirme les tendances observées sur les sites, à savoir une érosion généralisée, qui est liée à l'arrivée des houles d'août 2007 (fig. 13A) puis, faisant suite, une phase presque généralisée d'engraissement des plages (fig. 13B). Cette étude a montré que lorsqu'une houle exceptionnelle survient, le trait de

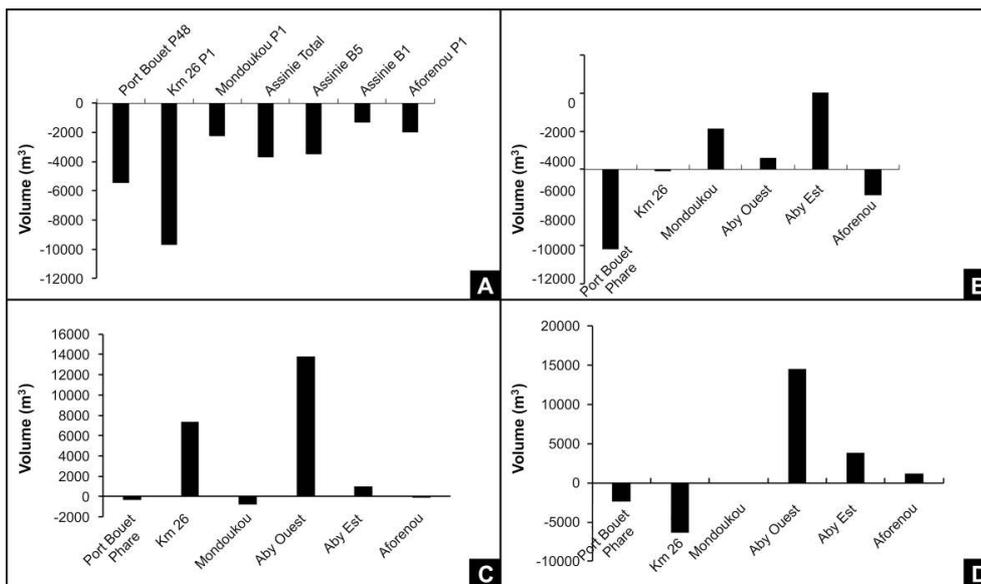


Fig. 13 – Bilan sédimentaire entre 2007 et 2009.

A : Bilan sédimentaire mai 2007-août 2007; B : Bilan sédimentaire mars 2007-mars 2008; C : Bilan sédimentaire mars 2008-mars 2009; D : Bilan sédimentaire Mars 2007-mars 2009

Fig. 13 – Sediment budget between 2007 and 2009.

A: Sediment budget 2007 may-2007 august; B: Sediment budget 2007 March-2008 March; C: Sediment budget 2008 march - 2009 march; Sediment budget 2007 march-2009 march

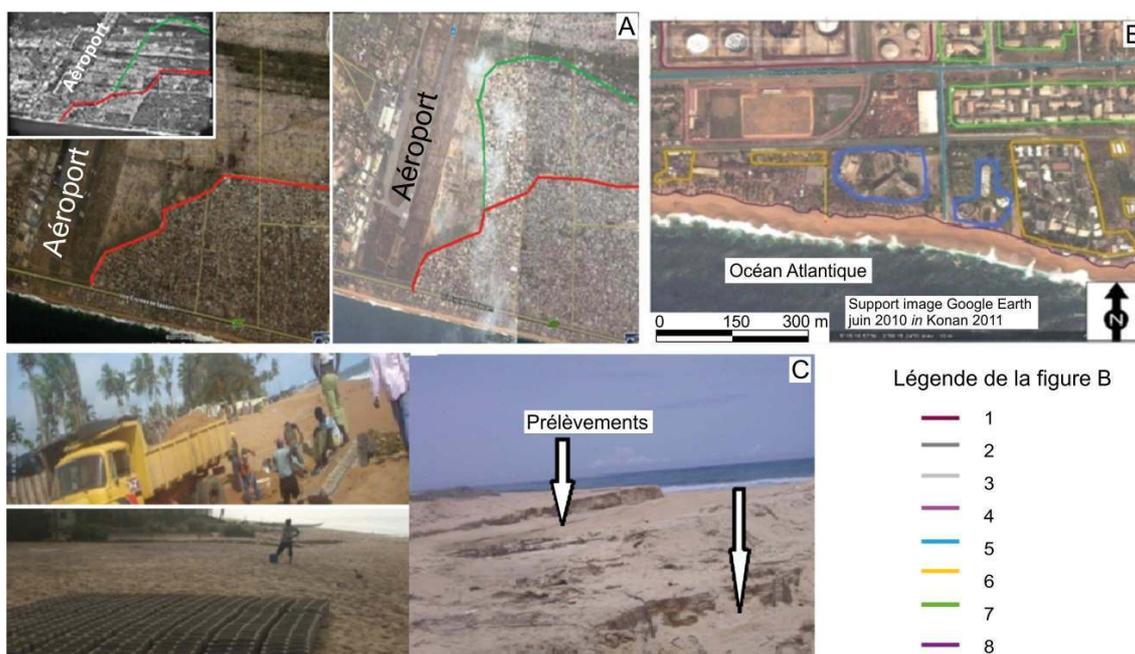


Fig. 14 – Pression anthropique sur le littoral.

A, B : Baie de Port-Bouet (Abidjan) et zone de l'aéroport entre 1979 et 2010 ; C : Mondoukou (Grand-Bassam). 1 : raffinerie ; 2 : boulevard-route ; 3 : chemin de fer ; 4 : complexe sportif ; 5 : complexe hôtelier ; 6 : quartier précaire ; 7 : quartier résidentiel ; 8 : trait de côte

Fig. 14 – Anthropogenic pressure on the coast.

A, B : Bay of Port-Bouet (Abidjan) and airport area between 1979 and 2010; C : Mondoukou (Grand-Bassam). 1: refinery; 2: boulevard-road; 3: railway; 4: sports Complex; 5: resort; 6: precarious housing; 7: residential housing; 8: coastline.

côte recule mais retrouve cependant une position initiale d'équilibre (résilience) dans l'intervalle de sept mois au Km 26 (fig. 8B), deux mois dans la zone d'Assinie (fig. 12B), mais est demeuré stable dans la baie de Port-Bouet à Abidjan (fig. 7A-B). Ces phénomènes de ré-engraissement localisés agissent à court terme au Km 26 et à Assinie, mais dépendent généralement de la disponibilité en sédiment. Par contre, le phénomène de résilience ne se produit pas au niveau du cordon littoral dans la baie de Port-Bouet à Abidjan, car son niveau de ré-engraissement après l'arrivée des houles du 14 août 2007 n'a

pas entraîné une avancée du trait de côte lui permettant de retrouver sa position avant l'arrivée de cette houle d'août (zone érodée en permanence). Ces résultats témoignent du caractère dynamique et évolutif du cordon littoral de la zone étudiée et permettent de préciser que le cordon littoral dans la baie de Port-Bouet, fortement urbanisée et industrialisée, présente un danger réel si ces événements d'impact morphogène sont courants ou se produisent à intervalle de temps très court.

4.4. Influence de la crise érosive d'août 2007 sur les activités anthropiques

Compte tenu de la croissance démographique importante, du développement des activités de loisirs et de l'influence croissante des activités humaines sur l'environnement côtier, les lents phénomènes (érosion et/ou engraissement) naturels du littoral (tab. 5-6) sont exacerbés ponctuellement par une importante pression anthropique. La mobilité des sédiments s'est accélérée et s'avère d'autant plus catastrophique que les zones concernées sont à forte densité de population et les activités industrielles intenses (dans la zone d'Abidjan : construction du Port d'Abidjan, de l'aéroport d'Abidjan, présence d'une zone industrielle, d'habitats et d'aménagements littoraux importants, etc. ; fig. 14A-C). Les houles exceptionnelles ont ainsi provoqué des dégâts considérables (fig. 7), essentiellement dans la zone littorale d'Abidjan (Baie de Port-Bouet). Le choc des vagues a ébranlé la paroi sableuse, provoquant la chute de certaines maisons habitées (fig. 7B) et l'éloignement de la route de promenade déjà coupée par une côte en érosion au phare de Port-Bouet (fig. 7C). Un bateau, déséquilibré par les houles de forte énergie du 14 août, s'est échoué sur la plage de Port-Bouet à l'approche (500 m) de l'entrée du Port Autonome d'Abidjan par le canal de Vridi (fig. 7B). Selon nos enquêtes de terrain, cet événement n'a occasionné aucune perte en vies humaines dans le quartier précaire construit sans autorisation préalable sur un cordon littoral naturellement en érosion, situé à l'est des pipe-lines de la Société Ivoirienne de Raffinerie (SIR, fig. 14B). Les vagues ont fait une centaine de sinistrés dont 27 familles, de même que 31 maisons ont été détruites. Le coût global estimé des dommages dépasse les 26.000.000 F.CFA (40 000 euros). A côté des

quartiers précaires qui sont des constructions informelles, des permis de construire avaient été délivrés à des opérateurs économiques intervenant dans le loisir, l'hôtellerie, la restauration et le tourisme (fig. 14A-B ; Yao et al., 2010 ; Konan 2011, 2012 ; Touré et al., 2012), ce qui augmenterait le risque en cas de situation similaire ou d'une vague plus violente que d'ordinaire.

5. Discussion

Le suivi pluriannuel de ces deux cordons littoraux a montré que l'épisode du 14 août 2007 était exceptionnel, du point de vue du bilan sédimentaire et de son impact morphologique sur les plages. Nous avons présenté l'évolution du trait de côte avant (1979-2007) et après (2007-2009) l'arrivée des houles exceptionnelles à l'est d'Abidjan ainsi que son impact sur les deux secteurs d'études. La vitesse moyenne de recul du trait de côte dans la baie de Port-Bouet, qui est de 1,29 m/an entre 1979 et 1989 et 0,50 m/an de 1990 à 2007, a été exacerbée par l'arrivée de houles exceptionnelles d'août 2007, engendrant un recul de 15 m en un cycle de marée. Alors que les prévisions du modèle de l'évolution morphologique réalisé par Abe (2005) pour le cordon littoral de Port-Bouet ont donné une valeur moyenne de recul de 0,5 m/an sur 20 ans, 15 m représenterait un recul correspondant à 11 ans de 1,29m/an et à 30 ans de 0,5 m/an. Le littoral au phare de Port-Bouet enregistre 40 m de recul en 13 ans (1971 à 1984), soit une vitesse moyenne de 3,07 m/an (Tastet, 1987). D'un point de vue morphologique, l'impact des houles du 14 août 2007 sur les plages étudiées revêt un caractère exceptionnel à l'échelle des vingt dernières années (Hs = 2,87 m pour une période de retour de 10 ans ; Tomety, 2013). En terme de comparaison, il faut remonter aux houles de 1944, 1954, 1968, 1984 et 1986 (tab. 3), particulièrement dévastatrices et qui avaient fait reculer la côte de 2,3 à 35 m (Paskoff, 1993 ; Abe, 2005 ; Konan, 2011, 2012 ; Touré et al., 2012, Konan et al., 2014).

En plus de l'effet dévastateur des vagues, de la pression anthropique, du déficit du budget sédimentaire, l'érosion est exacerbée par l'étroitesse du plateau continental en face d'Abidjan (fig. 2) qui facilite l'entrée des vagues avec toute leur énergie. Les plages larges possèdent une meilleure capacité à amortir les crises que les plages étroites (Paskoff, 1993 ; Cazes-Duvat, 2001 ; Suanez et al., 2011). Et il est évident qu'une plage déjà en érosion comme celle d'Abidjan Port-Bouet est d'autant plus vulnérable qu'elle a reculé très rapidement au cours des dernières décennies. Il en résulte un envahissement par la mer de cette zone littorale, occasionnant des dégâts considérables sur les habitations et les infrastructures de ce segment de côte. Ces conditions environnementales favorisent, dans le cadre d'un

Tab. 5 – Valeurs moyennes de mobilité du trait de côte à Abidjan entre 1928 et 1987 (Affian et al., 2003).

Tab. 5 – Average values of mobility of the coastline of Abidjan between 1928 et 1987 (Affian et al., 2003).

	1928-1956	1956-1960	1960-1971	1971-1984	1984-1987
Lido	- 4,82	1,25	- 3,63	- 1,9	
Cakpo	- 3,66	0	0	0	0
Akwaba	- 2,14	- 3,75	- 1,82	- 0,77	- 3,33
Bidet	0,53	0	0	0	0
Eglise			0,35	- 1,92	- 1,66
Phare			- 0,46	- 2,69	- 3,33
Cabanon				- 0,77	- 3,33

Tab. 6 – Etude comparative des vitesses d'érosion moyennes, normales et exceptionnelles des sites d'étude faisant ressortir le caractère exceptionnel des houles d'août 2007 (Paskoff, 1993 ; Abe, 2005 ; Konan et al., 2009).

Tab. 6 – Comparative study of normal and exceptional average speed of erosion of study areas highlighting the exceptional waves of the August 2007 (Paskoff, 1993; Abe 2005; Konan et al., 2009).

Segment de côte	Vitesse moyenne de recul entre 1979-1989	Vitesse moyenne de recul entre 1990-2007	Recul en une journée 14 Août 2007 (HE)	Recul en une journée 1984 (HE)	Recul en une journée 1986 (HE)	7 mai 1944 (HE)	23 au 24 juin 1944 (HE)	Vitesse moyenne annuelle (normale)
Abidjan	1,29 (m/an)	0,5 (m/an)	15 à 18 m	10 à 20 m	10 à 30 m	27 m	35 m	1 à 2 m/an
Km 26			18 m					Stable
	2,15 (m/an)	Stable (± 0,1m/an)						
Grand-Bassam			10 m					0,5 à 1 m/an
Assinie		- 1,85 m/an	6 à 8 m	Non obtenu	Non obtenu	Non obtenu	Non obtenu	Stable
Aforenou (Ghana)		+ 3,5 m/an	- 2,3 m					Stable

(HE : Houles exceptionnelles)

système de vagues peu énergétiques, une érosion permanente qui est accrue par l'impact morphologique de certaines houles exceptionnelles. Suanez et Cariolet (2010) et Touré et al. (2012) indiquent que l'action érosive des houles de forte énergie est d'autant plus exacerbée, et aura des effets d'autant plus durables, que ces plages connaissent depuis plusieurs décennies un déficit sédimentaire chronique. Parmi les facteurs à l'origine de cette dynamique, figurent l'importance des activités humaines et la morphologie du plateau continental. A la hauteur d'Assinie, des phénomènes fréquents de submersion sont observés de mai à juillet, se prolongeant parfois en août. Ainsi, plusieurs portions de côte rendues vulnérables sont régulièrement inondées à l'occasion des grandes marées. D'autre part, l'arrivée des houles qu'on pourrait qualifier d'exceptionnelles compte tenu de leur impact morphogène inhabituel et enregistrées sur les côtes ivoiriennes en 1984 (20 à 30 m), en 1986 (20 m) et en 2007 (15 à 18 m ; Paskoff, 1993 ; Abe, 2005 ; Konan et al., 2009) ont provoqué d'importants reculs (15 à 30 m) en un cycle de marée. Ces houles, influencées par les conditions hydrodynamiques et anthropiques, pourraient expliquer les effets dévastateurs et les dégâts observés à chaque fois sur le littoral dans la baie de Port-Bouet (Abidjan). Cependant, on note cette dernière fois un recul du trait de côte au Km 26 (18m), alors que cette zone est réputée stable (Abe, 2005 ; Abe et al., 2014), même avec l'arrivée des houles de forte énergie en 1986. En effet, plusieurs études (Abe, 2005 ; Abe et al., 2014) ont montré que du point de vue de la dynamique sédimentaire, les secteurs de plage basse tels que ceux d'Assinie pouvaient être considérés comme stables, malgré les submersions par les vagues enregistrées régulièrement lors de marée de fortes vives-eaux des mois de mai à août. Sur une période de 23 ans (1984-2007), le recul du trait de côte du cordon d'Abidjan à Grand-Bassam, lié aux événements exceptionnels, est de 45 m à 68 m (Paskoff, 1993 ; Abe, 2005 ; Konan et al., 2009 ; Konan, 2011). La vitesse de l'érosion est comprise entre 1,95 et 2,83 m/an, soit une vitesse moyenne de 2,39 m/an. Les différences constatées dans les résultats démontrent que la variabilité de la vitesse de recul dans le temps et dans l'espace est fonction des conditions hydrodynamiques, de la morphologie du plateau continental et du littoral et des activités anthropiques. Ces observations vont dans le même sens que les résultats acquis dans le cadre des études sur les tsunamis (Nobuo, 2007 ; Bourgeois, 2009), qui sont des sources de forte énergie. Il a été démontré par ces auteurs que l'ampleur de l'érosion et l'épaisseur des dépôts mis en place à la suite des tsunamis varient non seulement en fonction des conditions hydrodynamiques mais qu'elles évoluent largement du centimètre au mètre en fonction de l'état physique des sites et que ces phénomènes peuvent déplacer des roches de grande taille.

L'analyse des résultats sur la résilience des plages des cordons étudiés montre que les plages d'Assinie sont moins menacées par les houles en termes d'érosion mais sont plus exposées aux inondations. Ces plages peu aménagées possèdent des stocks sédimentaires importants qui leur permettent de se reconstituer très vite (2 mois). Par contre, les nombreuses infrastructures, la pression anthropique importante et l'urbanisation incontrôlée ne permettent pas aux plages de la baie d'Abidjan de se reconstituer entièrement. Ces résultats sont corroborés par les travaux de Paskoff (1993, 1994, 1998, 2007) et Cazes-Duvat (2001) qui précisent que là où une distance minimale entre le trait de côte et les constructions n'est pas respectée, les crises érosives se traduisent par la disparition des plages au pied des constructions (fig. 7A, C, 14B) parce que la réflexion sur les surfaces bâties accroît leur énergie. Après les crises, il n'y a en général pas de recharge (fig. 7A, C). Dans la baie d'Abidjan, le recul du trait de côte a atteint 18 m, causant des dommages aux constructions.

6. Conclusion

Le couplage de la photographie aérienne et du levé topographique a permis de réaliser cette cartographie temporelle et annuelle du risque d'érosion du sud-est du littoral ivoirien. La confrontation de ces données confirme l'effet de l'impact morphologique instantané des houles exceptionnelles et fait ressortir deux secteurs aux caractéristiques morpho-sédimentaires et hydro-dynamiques opposées. Au niveau de la baie de Port-Bouet à Abidjan, le bilan sédimentaire global n'est pas favorable à la régénération des plages. En effet, cette plage est rendue fragile et très sensible aux vagues par la diminution considérable des stocks sédimentaires nécessaires à son maintien depuis 70 ans. Ces prélèvements de sable, d'une pratique courante sur les plages (construction des épis, digues et musoirs en 1943 et 1975 pour la protection des infrastructures portuaires) entament sérieusement le stock sédimentaire du fait de la réduction des apports et de leur rétention par un cordon fortement urbanisé et anthropisé. Dans cette même zone, l'étude de l'évolution historique du trait de côte entre 1979 et 2007 détermine une érosion généralisée dans la baie de Port-Bouet (Abidjan), avec des vitesses évoluant entre 0,5 et 2,58 m/an. Les secteurs de Mondoukou et Km 26 sont restés stables dans l'ensemble. Les vitesses de recul sont exacerbées par l'arrivée de houles exceptionnelles en août 2007. En effet, le cordon littoral Abidjan-Grand Bassam indique des reculs allant de 10 à 18 m qui représenteraient 5 à 36 années normales d'érosion, en considérant les 18 m de recul liés aux vagues et la vitesse de recul de 0,5 à 2,58 m/an. Ces valeurs traduisent l'importance des flux sédimentaires mobilisés à l'échelle événementielle. Les houles exceptionnelles représentent donc une cause majeure d'instabilité de l'espace littoral et pré-littoral. L'étude historique du cordon littoral à partir des profils (1990-2007) a montré que les plages d'Assinie connaissent un engraissement de 3,5 m/an à l'est, quand l'ouest s'érode à la vitesse de 1,85 m/an. Ces vitesses de recul, qui ont été exacerbées en août 2007, avec des reculs de 2,3 à 6,8 m en un cycle de marée (24h), représenteraient 1,5 à 4 années normales d'érosion. Les reculs enregistrés sur la zone d'étude varient d'un secteur à l'autre selon l'intensité des activités anthropiques, la densité de la population littorale, la géomorphologie du littoral, celle du plateau continental et les stocks sédimentaires disponibles pour le maintien des plages. L'arrivée de houles exceptionnelles moins fréquentes mais plus énergétiques, apparaissent donc déterminantes en termes de bilan. Elles déplacent les sables vers le large (reculs de 2,3 m à 18 m en un cycle de marée), faisant reculer le rivage. Elles engendrent d'énormes modifications soudaines de la topographie littorale et des dégâts matériels importants.

Cette étude a mis en évidence que le cordon littoral dans la baie de Port-Bouet à Abidjan, déjà en érosion, présente une sensibilité élevée aux vagues exceptionnelles et que les plages ne se reconstituent pas. En ce qui concerne le critère de stabilité, on peut conclure à une reconstruction partielle (Baie de Port-Bouet à Abidjan) et totale (Km 26 et Mondoukou à Grand-Bassam et Assinie-Aforenou) de la plage sur l'ensemble de cette zone d'étude quelques mois (2 à 7 mois) après les événements. Les plages de Km 26 à Mondoukou (Grand-Bassam) subissent pour l'essentiel les réajustements saisonniers qui leur confèrent à l'année un équilibre dynamique alors que les plages d'Assinie (Ouest de l'embouchure de la lagune Aby), facilement inondables, sont des zones à risque.

Les communes littorales concentrent de plus en plus d'enjeux sur leur territoire, ce qui augmente d'autant plus les risques côtiers engendrés par de tels phénomènes. La gestion de ces espaces devient donc quelquefois difficile, notamment dans le contexte actuel d'élévation du niveau marin et de dérèglement climatique, qui prévoit une augmentation de la fréquence des tempêtes. Cet article constitue le début d'une analyse prévisionnelle générale (évolution régulière)

et d'exception (houles exceptionnelles) de l'érosion du littoral du sud-est d'Abidjan, zone densément peuplée où sont implantés plus de 60 % des entreprises ivoiriennes. Dans un contexte de migration importante de populations (concentration des activités économiques, recherche d'emplois, déplacements massifs de population liés aux remous sociaux de 2010, etc.), il serait intéressant de mettre en place un observatoire du littoral pour suivre et estimer la période de retour de tels phénomènes sur les côtes ivoiriennes avec une détermination précise des facteurs. Dans les conditions actuelles d'élévation du niveau marin et de changement climatique, la gestion de ces espaces littoraux devient indispensable. Il s'agit de réévaluer les zonages réglementaires réservés aux investissements et à l'urbanisme, en prenant en compte les effets des événements exceptionnels (tempêtes et tsunamis) et de l'érosion. L'évaluation de leur impact sur le long terme nécessite une analyse approfondie des phénomènes.

Remerciements

Nous voudrions exprimer nos sentiments de profonde gratitude pour l'attention et l'intérêt que le Dr Bamba S. Barthélémy (Directeur du C.R.O, ex ORSTOM) et le Dr Koffi Koffi Philibert (C.R.O) ont accordé à ce travail. Nous remercions les relecteurs qui, par leurs remarques et leurs suggestions nous ont permis d'améliorer le contenu de ce texte. Un grand merci au Pr Djagoua Eric M'Moa Valère (Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection) pour son soutien au traitement des photographies aériennes. Nous n'oublions pas le Pr Hauhouot Célestin (Institut de Géographie Tropicale/ Côte d'Ivoire) pour ses enquêtes et pour son aide apportée aux dernières lectures.

Références

- Abe J. (1993)** – Coastal impacts of climate change through integrated coastal zone management. In: Côte d'Ivoire Coastal Zone Management Centre Publication 4. Proceedings, 2, 795-801.
- Abe J. (2005)** – Contribution à la connaissance de la morphologie et de la dynamique sédimentaire du littoral ivoirien (cas du littoral d'Abidjan). Essais de modélisation en vue d'une gestion rationnelle. Thèse de Doctorat d'Etat, Sc. Nat., Univ. Cocody, 337 p.
- Abe J., N'doufou, G. H. C., Konan K. E., Yao K. S., Bamba S. B. (2014)** – Relations entre les points critiques d'érosion et le transit littoral en Côte d'Ivoire. *Africa Geoscience Review*, 21 (1-2), 1-14.
- Adopo K. L. (2009)** – Caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire d'un environnement estuarien en zone tropicale : cas de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand-Bassam (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Cocody). 154 p.
- Asecna (2007)** – Le climat de la Côte d'Ivoire. Service Météorologique d'Abidjan. Ministère des Travaux Publics, des Transports, de la Construction et de l'Urbanisme. Côte d'Ivoire 32 p.
- Bird E.C.F. (1985)** – *Coastline Changes: A Global Review*. John Wiley, Chichester, 219 p.
- Bourgeois J. (2009)** – Geologic effects and records of tsunamis. In: Robinson A.R. and Bernard E.N., *The Sea*. Harvard University Press, 15, 53-91.
- Brabant M. (2003)** – Maîtriser la topographie: Des observations au plan. Eyrolles, 539 p.
- Cazes-Duvat V. (2001)** – A beach vulnerability index and its implementation in the islands of Seychelles. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 7 (1), 31-40. doi: 10.3406/morfo.2001.1084
- Crowell M., Leatherman S.P., and Buckley M.K. (1991)** – Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7 (3), 839-852.
- Crowell M., Douglas B.C., Leatherman S.P. (1997)** – On forecasting future US shoreline positions: a test of algorithms *Journal of Coastal Research*, 13 (4), 1245-1255.
- Dolan R., Hayden B.P., May P., May S. (1980)** – The reliability of shoreline changes measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48 (4), 22-29.
- Dolan R., Fenster S.M., Homes S.J. (1991)** – Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7 (3), 723-743.
- Douglas B.C., Crowell M., Leatherman S.P. (1998)** – Consideration for shoreline position prediction. *Journal of Coastal Research*, 14 (3), 1023-1025.
- DCGTx (1985)** – Direction et Contrôle des Grands Travaux. Erosion du littoral de Port-Bouet. Propagation de la houle à la côte. Plans de vagues, 20 p.
- Guillemot E., Thomas Y.F. (1985)** – Evolution de la flèche sableuse de Los Torunos (Espagne). *Photo-Interprétation*, 4 (2), 11-16.
- Guillen J., Stive M.J.F., Capobianco M. (1999)** – Shoreline evolution of the Holland Coast on a decadal scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24 (6), 517-536. doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(199906)24:6
- Hauhouot C. (2000)** – Analyse et cartographie de la dynamique du littoral et des risques naturels côtiers en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 289 p.
- Hauhouot C. (2008)** – Morphologie et dynamique du trait de côte en Côte d'Ivoire. In: *Géographie du littoral de Côte d'Ivoire. Eléments de réflexion pour une politique de gestion intégrée*. CNRS-LETG UMR 6554, Géolittomer (France) et IGT-Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 37-50.
- Ibe A.C., Quelenec R.E. (1989)** – Méthodologie d'inventaire et de contrôle de l'érosion côtière dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. *Rapports et Etudes mers régionales*, PNUE, Nairobi, 107 p.
- Ibe A.C. (1990)** – Adjustements to the impacts of sea level rise along the west and central african coasts. In *Changing Climate and the Coast*, 2, 3-12.
- Ibe A.C. (1994)** – Implications of Expected Climate Change in the West and Central African Region: An Overview. UNEP: Nairobi. UNEP Regional Seas Reports and Studies, 148, UNEP, 43 p.
- Koffi K.P., Abe J., Amon K.J.B. (1991)** – Contribution à l'étude des modifications hydrosédimentaires consécutives à la réouverture artificielle de l'embouchure du Comoé à Grand Bassam. *Ivoir. Océanol. Limnol. Abidjan*, I (2), 47-60.
- Kolawole S.A. (1990)** – The gulf of Benin: Implications of sea level rise for Togo and Benin. In *Changing Climate and the Coast*, 2, 13-24.
- Kolawole S.A. (1998)** – L'évolution géomorphologique de la plaine côtière dans le Golfe du Bénin. Département de Géographie, Université Nationale du Bénin. In *Near shore Dynamics and Sedimentology of the Gulf of Guinea*, 143-150.
- Konan K.E. (2004)** – Contribution à l'étude morphologique et sédimentologique du littoral entre Grand-Bassam et Assouindé. Mémoire de DEA, Abidjan, Université de Cocody, 80 p.
- Konan K.E., Bamba S.B., Abe J., Aka K. (2009)** – Impact des tempêtes récurrentes sur le modèle du périmètre littoral de Vridi Port Bouet. *European Journal of Scientific Research*, 28, 186-192.
- Konan K.E. (2011)** – Impacts des vagues géantes d'aout 2007 sur le cordon littoral ivoirien: cas du littoral d'Abidjan à Grand-Bassam (Côte d'Ivoire). Mémoire de Master, Université de Liège, 60 p.
- Konan K.E. (2012)** – Etude morpho-dynamique et sensibilité aux événements «exceptionnels» du cordon littoral sableux ivoirien à l'Est d'Abidjan (Abidjan-Aforenou). Thèse Unique de Doctorat,

- Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, 206 p.
- Konan K.E., N'Guessan Y.A., Djagoua E.M.V., Affian K. (2014)** – Influence des houles exceptionnelles sur un cordon littoral étroit ivoirien à Azzureti. *Geo-Eco-Trop*, 38 (1), 179-186.
- Laïbi R. (2011)** – Dynamique actuelle d'une embouchure fluviale estuarienne à flèche sableuse : la bouche du Roi, Bénin, Golfe de Guinée. Thèse de Doctorat, Universités UAC et ULCO, 100 p.
- Martin L. (1977)** – Morphologie, sédimentologie et paléogéographie au Quaternaire récent du plateau continental ivoirien. *Trav. Doc. ORSTOM*, 61, 266 p.
- McBride R.A., Byrnes M.R. (1997)** – Regional variations inshore response along barrier island systems of the Mississippi river delta plain: historical change and future prediction. *Journal of Coastal Research*, 13 (3), 628-655.
- Monde S. (1997)** – Nouvelles approches de la cartographie du plateau continental de Côte d'Ivoire : aspects morphologiques et sédimentologiques. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, Fac. Sci, Université Abidjan, 175 p.
- Monde S. (2004)** – Etude et modélisation hydrodynamique de la circulation des masses d'eau dans la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat es Sciences Naturelles, 397/2004, Université Cocody, 325 p.
- N'Doufou G.H.C. (2012)** – Contribution morpho-sédimentologique et exoscopique à l'évolution du secteur du littoral ivoirien entre Sassandra et Abidjan. Thèse Unique de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, 190 p.
- N'Guessan Y.A., Konan K.E., Diangone E., Wango T.E., Affian K., Monde S., Aka K. (2013)** – Caractérisation sédimentologique des faciès sableux de la lagune Potou (littoral de la Côte d'Ivoire). *Revue Bioterre*, 13, 43-58.
- Nobuo S. (2007)** – Examples and hydrodynamic explanation of topographic changes caused by tsunamis. *Nihon University Tokyo, Japan, The Quaternary Research*, 46 (6), 509-516. doi: 10.4116/jaqua.46.509
- Paskoff R. (1993)** – Côtes en danger. Coll. «Pratiques de la Géographie», Paris, Masson, 250 p.
- Paskoff R. (1994)** – Les littoraux: Impact des aménagements sur leur évolution. Paris, Masson, 255 p.
- Paskoff, R. (1998)** – Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution. 3^e édition, A. Colin, Paris, 257 p.
- Paskoff, R. (2007)** – L'érosion des plages, les causes, les remèdes. Monaco, éd. Institut océanographique, coll. Propos, 184 p.
- Robin M. (2002)** – Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. In: *Le littoral : regards, pratiques et savoirs*. Éditions Rue d'Ulm, Presses de l'École normale supérieure, Paris, 230 p.
- Sabatier F. (2001)** – Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du Delta du Rhône. Mémoire de thèse de Doctorat de l'Univ. Aix-Marseille III, 274 p.
- Sabatier F., Suanez S. (2003)** – Evolution of the Rhône delta coast since the end of the 19th century. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 9 (4), 283-300. doi: 10.3406/morfo.2003.1191
- Shoshany M., Golik A., Degani A., Lavee H., Gvirtzman G. (1996)** – New evidence for the sand transport direction along the coastline of Israel. *Journal of Coastal Research*, 12 (1), 311-325.
- Suanez S. (1997)** – Dynamiques sédimentaires actuelles et récentes de la frange littorale orientale du delta du Rhône. Université de Provence, Aix-en-Provence, 282 p.
- Suanez S., Cariolet J.M. (2010)** – L'action des tempêtes sur l'érosion des dunes, impacts morphogéniques des tempêtes : les enseignements de la tempête du 10 mars 2008. *Norois*, 215, 77-99. doi: 10.4000/norois.3212
- Suanez S., Fichaut B., Magne R., Arduin F., Corman D., Stephan P., Cariolet J.M. (2011)** – Changements morphologiques et budget sédimentaire des formes fuyantes en queue de comète de l'archipel de Molène (Bretagne, France). *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 17 (2), 187-204. doi:10.4000/geomorphologie.9397
- Thieler R., Danforth W.W. (1994)** – Historical shoreline mapping (I): improving techniques and reducing positioning errors. *Journal of Coastal Research*, 10 (3), 549-563.
- Tastet J.P. (1985)** – Le littoral ivoirien : géologie, morphologie et dynamique. *Ann. Univ. Abidjan, Sér. C*, 21 B, 189-218.
- Tastet J.P. (1987)** – Effets de l'ouverture d'un canal d'accès portuaire sur l'évolution naturelle du littoral d'Abidjan (Afrique de l'ouest). *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, 41, 177-190.
- Tastet J.P., Caillon L., Simon B. (1985)** – La dynamique sédimentaire littorale devant Abidjan. Impact des aménagements. Université nationale de Côte d'Ivoire, rapport Port Autonome d'Abidjan (PAA), 39 p.
- Tomety S.F. (2013)** – Analyse des statistiques de vagues au Nord du Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Ghana, Bénin, Nigéria) dans le cadre du suivi de l'érosion côtière. Mémoire master of science en océanographie physique et applications (CIPMA-Chaire UNESCO), Univ Abo. Cal., Benin, 40 p.
- Touré B., Kouamé K.F., Souleye W., Collet C., Affian K., Ozer A., Rudant J.P., Biémi J. (2012)** – L'influence des actions anthropiques dans l'évolution historique d'un littoral sableux à forte dérive sédimentaire : la baie de Port-Bouët (Abidjan, Côte d'Ivoire). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 18 (3), 113-126. doi: 10.4000/geomorphologie.9990
- Varlet F. (1958)** – Le régime de l'Atlantique près d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *Essai d'océanographie littorale. Etudes Eburnéennes*, 7, 97-257.
- Yao K.S., Abe J., Bamba S.B., Konan K.E., Aka K. (2010)** – Dynamique d'un périmètre littoral portuaire: la côte de San-Pedro, sud-ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Paralia*, 3, 2.1-2.12. doi: 10.5150/revue-paralia.2010.002
- Yao K.S. (2012)** – Etude de la dynamique sédimentaire du littoral occidental ivoirien entre Tabou et Sassandra: Approches morpho-bathymétriques, sédimentologiques et exoscopiques. Thèse de doctorat unique, université Félix Houphouët Boigny de Cocody-Abidjan, 197 p.

Sites internet

- The Global Sea Level Observing System:
http://www.gloss-sealevel.org/data/africa_and_west_indian_ocean/#.UrlOvvu0uHc%2%A0 (consulté le 13 décembre 2013).
 USGS 2011:
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map> (consulté, le 10 septembre 2011).
 National Weather Service:
<http://www.weather.gov/iwx> (consulté, le 14 mai 2015).

Abridged English version

The objective of this article is to analyze the morphologic impact of swells occurring on August 14, 2007 on the sedimentary budget in beaches located east of Abidjan (Abidjan-Grand-Bassam and Assinie-Aforenou, fig. 1) and from there, conclude on the general issue of the exceptional high energy wave action on coastal erosion in Côte d'Ivoire. This work deals also with the resilience capacity of the sand bars of the littoral.

To achieve this objective, a study based on the analysis of the beach aerial photographs provided a regular velocity of the coastline is



historical evolution (tab. 5; fig. 5) on the mid-term. These outcomes, as compared with field topographical works made with a construction level relied on a series of profiles established since 1984 of the Ivorian coastline; they were used to assess the impact of exceptional waves on the studied area. In accordance with the least squares method (Brabant, 2003), mobilized sediment budgets have been estimated (fig. 12) from superposition of envelope curves representing the beach profiles. The method chosen to assess the damage is a survey based on homeowners and tenants systematic interview. Significant correlations have confirmed the extent of degradation of the coastal segments in the area. This allowed characterizing the morphodynamics of the beach taking into account anthropogenic pressures related to intense industrial activities and uncontrolled urbanization, the steepness of their slope (slope of erosion) and the extent of the continental shelf, the available sediment stocks, and wave motions (energy). These results confirm the presence of exceptional waves on these sand ridges in the night of 14 August, 2007 (Konan et al., 2009; Konan, 2011) probably of

seismic origin (earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/).

The implementation of the developed approach highlighted the impacts generated by the arrival of exceptional waves in terms of sediment deficit and erosion on the two segments of coast:

- From Abidjan to Mondoukou damage was recorded as shown in Figure 7 as well as a coastline retreat from 10 to 18 m (fig. 6) which is generated by the arrival of the exceptional waves of 14th August 2007 unlike previous work which had considered a setback not exceeding 1.5 m per year (Tastet et al., 1985; Tastet 1987; Abé, 2005) after the construction of groynes in 1945 and 1975.

- The Assinie-Aforenou coastal strip saw a coastline retreat between 2.3 and 6.8 m (fig. 10-11) in one tidal cycle due to the waves in this relatively stable area according to Abé (2005).

- The Assinie-Aforenou beaches were restored fully in October 2007 (fig. 12B) over two months resilience however those of Abidjan are not fully reconstituted (fig. 6A, 7A-B) while the Km 26 had seven months resilience (fig. 8B).