DÉGRADATION DES DUNES CÔTIÈRES ALGÉROISES ENTRE PRESSION DE L'URBANISATION ET CONSÉQUENCES SUR L'ÉVOLUTION DE LA LIGNE DE RIVAGE

Housseyn OTMANI[1], Rabah BELKESSA[1], Walid RABEHI[2], Mokhtar GUERFI[3], Walid BOUKHDICHE[4]

[1]École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL, BP 19, campus universitaire Dely Brahim, Alger, Algérie), e-mail: otmani.housseyn@gmail.com, belkessarabah@yahoo.fr

[2]Centre des Techniques Spatiales, Agence Spatiale Algérienne (01 Avenue de la Palestine, BP 13 Arzew, Algérie), e-mail: wrabehi@cts.asal.dz,

[3]Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB, Alger, Algérie), e-mail: sguerfi@yahoo.fr

[4]Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed (UMBA, Oran, Algérie), e-mail: boukhedichewalid@gmail.com

Résumé. La baie d'Alger se présente comme un système côtier très diversifié et donne lieu à un conflit constant entre « pressions humaines » et « la fragilité environnementale » de ces côtes.

En effet, les besoins de loger les populations grandissantes d'une part et d'autre part, la présence d'une côte vulnérable mettent en péril la fragilité du littoral. La partie Est de la baie où se situe une multitude de plages sableuses et soutenues par un système dunaire très endommagé et vulnérable, est sujette à des érosions marquées durant les dernières décennies.

Alger est une des plus grandes métropoles du Maghreb. Elle est sujette à une urbanisation intensive. L'occupation de son espace littoral s'est déroulée en plusieurs épisodes et s'est faite progressivement au détriment de nombreux espaces dunaires (dunes actuelles meubles et dunes anciennes consolidées). Leur disparition s'est répercutée négativement sur l'alimentation naturelle en sédiments des plages dans cette zone.

Le suivi multi-temporel de l'espace côtier de la région « Alger Est », a permis d'établir un diagnostic des éventuels liens de cause-à-effet et des corrélations entre *urbanisation intensive*, la *destruction des espaces dunaires* et la *disparition des plages* dans la même période. Ceci permettra une meilleure compréhension du géosystème côtier algérois et une aide à la prise de décision en matière de protection côtière pour le futur dans la région.

Mot-clé : Algerie, dune littorale, trait de côte, SIG, télédétection, urbanisation, DGPS

Abstract. The Bay of Algiers is a very diversified coastal system, a site of a constant conflict between human pressures and the environmental fragility of these coasts.

The need to accommodate the growing population on the one hand and the presence of a vulnerable coast in the other, endanger the area, in particular the eastern part of the bay. Here there are a multitude of sandy beaches supported by a highly vulnerable dune system, and subject to marked erosion during the last decades.

Considered as one of the largest metropolitan city in the Maghreb, Algiers is subject to intensive urbanization. The occupation of its coastal area has taken place in several steps/periods of time/episodes and has gradually occurred at the expense of many dune areas (mobile or consolidated), which caused a negative impact on the natural sediment supply of the neighbouring beaches.

This work aims to highlight, through a multi-temporal monitoring of the „East Algiers" coastal area, and allows to establish a diagnosis of the possible cause-effect relations between *intensive urbanisation*, the *decrease of dune areas* and the *loss of beaches,* in order to offer a better understanding of the coastal geosystem of Algiers and to support future decision making for a an optimal coastal protection of this sensitive area.

Key word: Algeria, coast dune, coastline, GIS, remote Sensing, urbanization, DGPS

1. INTRODUCTION

Les littoraux constituent des environnements fragiles dans lesquels se manifestent de multiples facteurs d'évolution aux actions, interactions et rétroactions complexes. Les hommes doivent savoir utiliser ces milieux tout en respectant la ressource naturelle (Paskoff, 1992).

Les dunes constituent un système côtier multifonctionnel de très grande valeur environnementale (sédimentologique géomorphologique, écologique et de stabilité hydrodynamique) (Bounoua *et al.*, 2017). Du point de vue géomorphologique, elles stockent le sable dans la zone littorale active et tamponnent ainsi l'action érosive de la mer, elles protègent les terres et les infrastructures humaines et sont souvent un rempart contre les tempêtes marines (Heurtefeux *et al.*, 2007).

La baie d'Alger est une zone à haute attractivité démographique. Sur le plan géographique, elle présente de nombreux aléas naturels (sismicité, inondations et pluies torrentielles récurrentes etc.). Elle est également de plus en plus vulnérabilisée par les pressions anthropiques grandissantes (Rabehi *et al.*, 2018).

Alger, capitale algérienne connait un fort attrait socioéconomique (Belhai-Benazzouz et Djelal, 2010), son évolution en aire métropolitaine (plus de 6 millions d'habitants (Population data, 2015), engendre une plus forte pression sur l'espace et les ressources, qui se traduit par des impacts plus conséquents sur le milieu littoral.

Les dunes de la région centrale d'Alger répondent à un certain nombre de fonctions en matière de protection du littoral et du maintien de sa stabilité, grâce à leur capacité à compenser les déficits en matière de bilan sédimentaire (Ley de la Vega *et al.*, 2012).

2. CONTEXTE GÉNÉRAL

L'espace côtier algérois est un espace diversifié géomorphologiquement, composé de substrat meuble (argile, sable, grés) ou de substrat relativement compact (roche métamorphique, tel que les schistes et le gneiss etc.). Les littoraux de la baie d'Alger sont caractérisés par la présence de côtes rocheuses à l'Ouest. et des plages sableuses au centre et à l'Est. Ces dernières sont les plus sujettes à une érosion continue ces dernières années. Ceci est due à la perturbation des échanges sédimentaires, causée par des facteurs directs (vol de sédiments de plages, augmentation de l'hydrodynamisme, etc.) (Jungerius et Van der Meulen, 1988 ; Amarouche *et al.*, 2017) ou indirects, comme la dégradation des dunes côtières meubles pour des fins d'urbanisation (Łabuz, 2004).

La croissance démographique, par son besoin d'urbanisation/artificialisation, contribue à la fragilisation de la baie d'Alger (Mihoubi *et al.*, 2014), pouvant ainsi induire une perturbation de l'équilibre sédimentaire et de la santé des écosystèmes qui accroît le niveau de risque d'érosion sur le littoral (LEM, 1998), notamment dans les zones fortement occupées.

L'objectif de ce présent travail s'articule autour de la mise en évidence des éventuels liens directs ou indirects entre l'action de l'artificialisation de la zone côtière, et son impact sur les systèmes côtiers en fragile équilibre, ainsi que l'impact de ces deux variables sur l'évolution des rivages qui se localisent dans la zone influencée.

L'observation de la variabilité de l'expansion du tissu urbain (A) et *de facto* la réduction des espaces dunaires (B) dans une échelle multi-temporelle peut mettre en évidence l'éventuelle relation entre cette variabilité et les fluctuations de la ligne de rivage. L'intervalle de temps entre A et B correspond à un impact ressenti et peut ainsi aider les décideurs à réconcilier « respect de l'environnement et aménagement » (Maret et Cadoul, 2007) .

2.1. ZONE D'ÉTUDE

Le système côtier algérois subit de nombreuses pressions liées principalement au degré d'anthropisation. En effet, sur le site d'étude, la croissance démographique 1,9/an (ONS, 2017) ; les taux d'urbanisation sont supérieurs à 50 % (Rabehi, 2018)**,** l'activité touristique incontrôlée et l'érosion côtière sont perçues comme des contraintes fortes, induisant d'importants phénomènes de dégradation (Pinot, 1998).

L'hydrodynamisme sur les côtes algéroises se caractérise par une hauteur moyenne de vagues faible à moyenne (entre 0,2 et 3 m d'amplitude). Malgré l'absence de données précises sur l'hydrodynamisme de la région, la hauteur maximale des vagues observées, au cours des dix dernières années, est de 3 m (Larara *et al.*, 2012). Les hauteurs entre 2 et 3 m n'étant atteintes en Algérie que lors des épisodes spécifiques de haute énergie comme des tempêtes ou lors de séismes (Yelles-Chaouch *et al*, 2009), on retiendra la hauteur de 1 m correspondant aux hauteurs les plus significatives en baie d'Alger (Hemdane *et al.*, 2016).

La moyenne significative des marées est la différence verticale entre la marée la plus haute et la marée la plus basse. Dans le bassin algérois, la marée moyenne est de 0,16 m (Albérola *et al.*, 1995). Elle est considérée comme faible.

La zone d'étude se localise au nord de la wilaya d'Alger (Algérie) et constitue le secteur centre algérois (Fig. 1). Elle est comprise d'ouest en est entre les deux oueds El Harrach et El Hamiz, elle s'étale jusqu'à cinq kilomètres vers l'intérieur du pays et couvre dix communes dont cinq sont côtières.

Le choix de la zone s'est fait en fonction de l'observation du secteur algérois sur différentes échelles temporelles**.** La présence des cours d'eau a permis l'existence d'un massif dunaire considérable, par les apports continus en matériaux sédimentaires. Le développement du tissu urbain, favorisé par l'emplacement et la topographie de la zone, s'est opéré d'une façon particulièrement rapide et perceptible au détriment des dunes sur place.

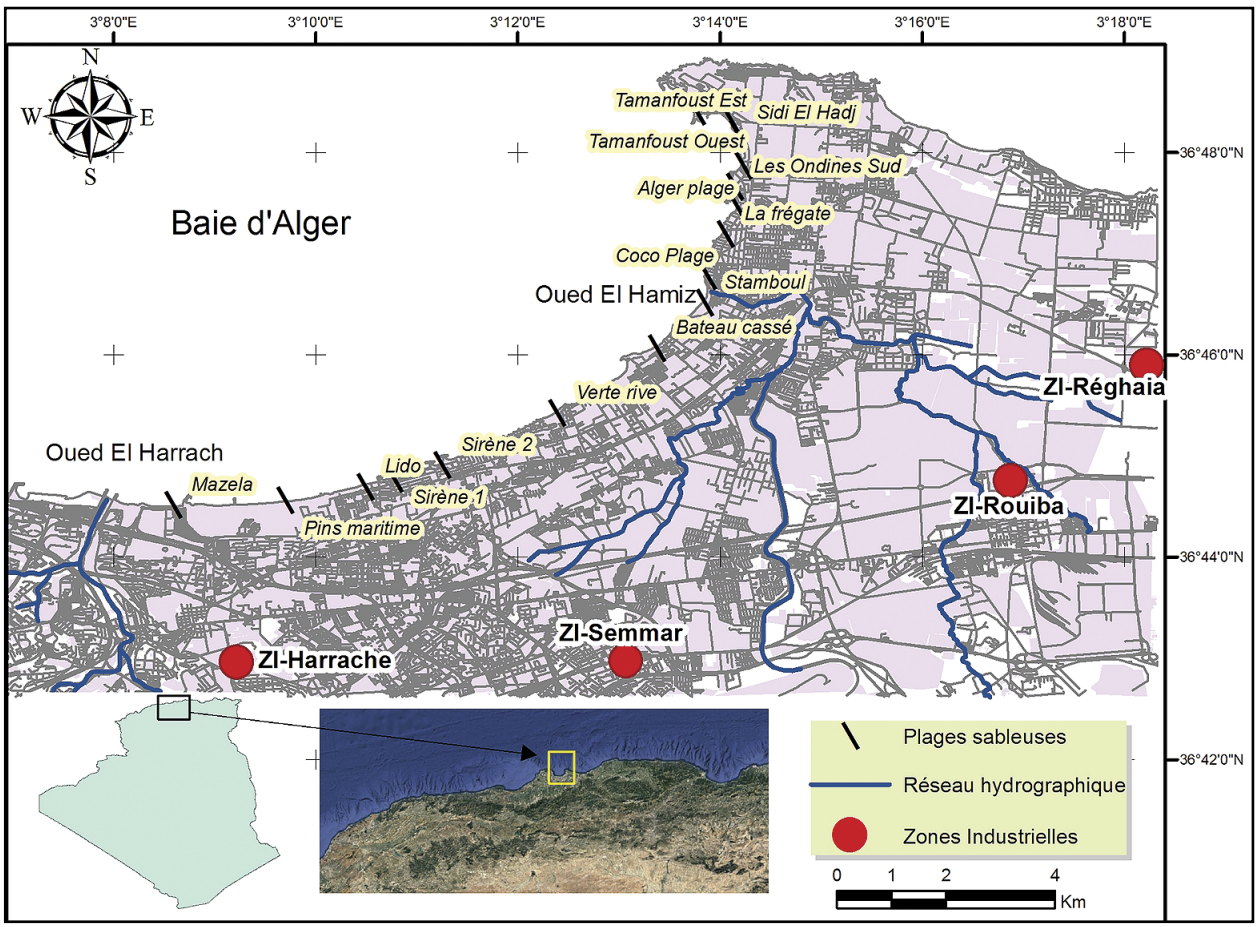


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (Partie Est de la baie d'Alger).

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Extraction cartographique des dunes côtières à Alger

La cartographie des dunes côtières est réalisée à partir de la carte géologique de la baie (feuille d'Alger, 1 :50000, publiée en 1964, mais réalisée entre 1948 et 1962), illustrant la nature géologiques des sols, notamment les dunes côtières de sable meuble « q^{3c} » et les dunes anciennes consolidées « q^{3bD}, q^{3aD} » (Fig. 2).

Les contours de ces terrains ont été extraits par digitalisation dans un SIG (système d'information géographique), sous un format vecteur plus flexible (mise à jour, sémiologie, superposition), dans un système de projection UTM Zone 31N, WGS-1984.

On observe que la majorité du massif dunaire sur la baie est localisée au centre et à l'Est (Fig. 3), secteurs de la majorité des plages sableuses de la baie, indiquant ainsi la dépendance structurelle entre la dune et la plage.

La superposition de ces dunes sur une image satellitaire montre que la majorité de ces anciennes dunes sont localisées sous de zones urbanisées (signe de dégradation ou d'enfouissement sous urbanisation).

3.2. Sélection des zones urbanisées (1960-1985-2000-2015)

L'extraction des taches urbaines multi-dates s'est faite à partir d'imagerie satellitaire de moyenne résolution (Archive Landsat) pour les dates 1985, 2000, 2015 (Tab I) et à partir d'une photographie aérienne ancienne (1959, échelle 1 : 50 000) pour l'année 1960 (Fig. 4).

Tout d'abord, les trois scènes Landsat sont normalisées radiométriquement (en valeur de réflectance). La photographie aérienne quant-à-elle est géoréférencée dans un SIG dans le même système de projection des images satellitaires.

Pour la photographie aérienne, une simple numérisation des zones urbanisées a été réalisée sous un SIG, pour l'extraction de la tache urbaine entre 1985-2000-2015, trois méthodes de télédétection ont été testées et comparées. L'algorithme « différenciation de bande spectrale» a été retenu, une matrice de confusion basée sur 50 points réalité terrain. Ce sont des points (format vecteur sous SIG) dont la table est alimentée manuellement pour identifier les zones urbaines apparentes sur le terrain et les comparer selon leur affectation *via* les méthodes de télédétection; cela permettra de dresser la matrice de confusion suivant un pourcentage et évaluer la qualité (Tab II).

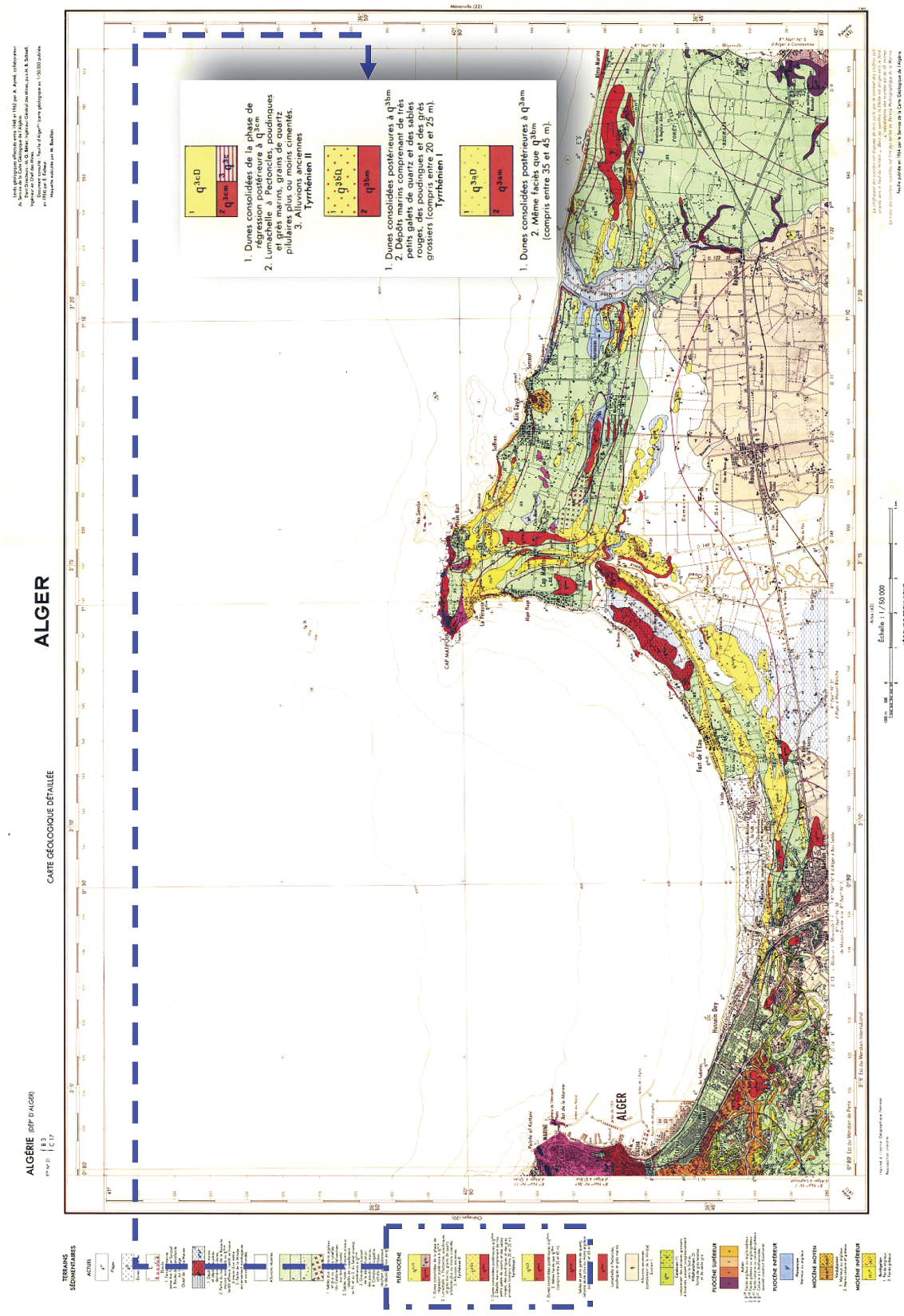


Figure 2. Sol dunaire dans la carte géologique de la baie d'Alger (IGN-INC, 1948-1962).

Figure 3. Localisation des dunes (1960) sur la partie Est de la baie d'Alger.

Tableau I. Caractéristiques des images Landsat utilisées.

Date de la scène	Capteur	Résolution spectrale	Résolution spatiale
12-04-1985	Landsat MSS	Multispectrale : 30m	B1 : 0,45-0,52 µm B2 : 0,52-0,6 µm B3: 0,63-0,69 µm B4: 0,76-0,9 µm
19-08-2000	Landsat TM	Multispectrale: 30m Panchromatique: 15m	B1 : 0,45-0,52 µm B2 : 0,53-0,61 µm B3: 0,63-0,69 µm B4: 0,78-0,9 µm
02-06-2015	Landsat 8 OLI	Multispectrale : 30m Panchromatique: 15m	B2 : 0,45-0,515 µm B3: 0,525-0,6 µm B4: 0,63-0,68 µm B5: 0,845-0,885 µm

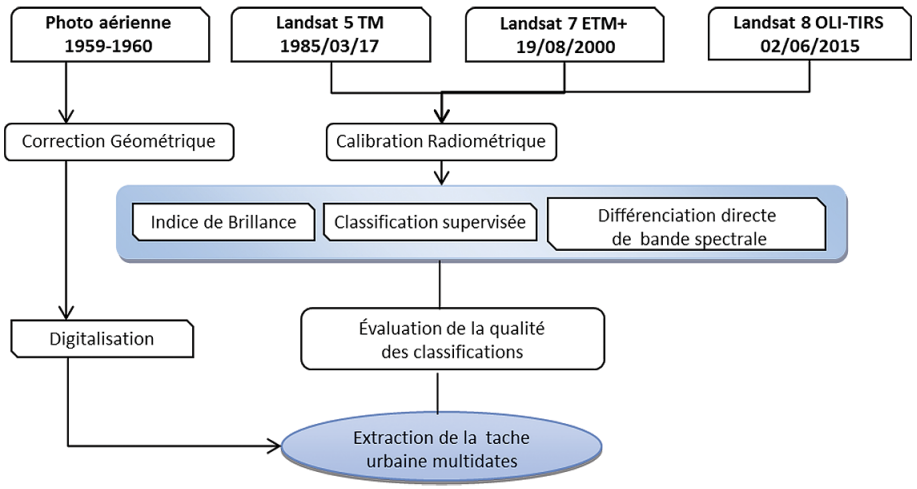


Figure 4. Schéma relatif à la méthodologie de cartographie utilisée.

Tableau II. Qualité des algorithmes de différenciation.

Algorithme de détection du changement	Matrice de confusion (Qualité en %)
Différenciation univariée directe de l'image	85,7
Classification supervisée	78,1
indice de brillance	79,4

3.2.1. Différenciation directe par valeur spectrale

En observant les différentes bandes spectrales présentes sur les capteurs Landsat, trois bandes sont présentes sur les 3 capteurs (TM, ETM+, et OLI), notamment les bandes « Bleu, Vert et Rouge ».

La bande bleue est la bande la plus sensible aux zones artificialisées; en parcourant empiriquement les signatures spectrales des objets urbains sur l'image, les seuils discriminant cette classe (valeurs de réflectance) sont synthétisés (Tab. III), notamment les valeurs supérieures à «0,15» (valeurs de réflectance).

Sur une grille de vérité terrain (250 points), alimentée par divers supports de validation multidates (carte topographique de 1987, images aériennes de 1999 et une image de très haute résolution de 2016), une matrice de confusion a été générée, qui donna un pourcentage de 89,1% d'exactitude.

3.3. Méthodologie d'analyse de l'évolution du trait de côte

Le trait de côte généralement est la ligne qui sépare la terre et la mer, mais avec la complexité de la morphologie côtière, il est souvent très difficile de le déterminer sur terrain. Pour analyser ces changements, une définition du « trait de côte » doit être donnée de manière à prendre en compte les différentes configurations géomorphologiques des littoraux ainsi que les notions d'évolution temporelle relative (Le Berre *et al.*, 2008).

Pour cette étude, le trait de côte tracé à base des indicateurs géomorphologiques a été retenu, la limite du trait de côte choisie est la ligne de rivage instantanée « En mer calme » (Sabatier, 2001 ; Bouakline, 2009 ; Bouabdallah et Larue, 2009)

L'évolution du trait de côte est un phénomène naturel engendré par la relation d'un certain nombre de processus hydrodynamiques liés aux caractéristiques géomorphologiques des systèmes littoraux. Mais ces phénomènes naturels sont exacerbés par des actions anthropiques qui perturbent l'équilibre dynamique des milieux littoraux (Daniel et Hubaud, 1996). La compréhension et le suivi de l'évolution du trait de côte sont primordiaux dans l'aménagement du littoral. Cet espace fragile très convoité, concentre une grande part de la population et des activités économiques (JEGO, 2003).

Le choix de la méthodologie de suivi du trait de côte doit être fait en fonction des caractéristiques du milieu, des moyens et outils disponibles ainsi que les besoins en matière de précision. Dans le cadre de ce travail, nous avons opté pour la méthodologie proposée par le BRGM (Bureau de la Recherche Géologique et Minière) (Mallet et Michot, 2012). L'organigramme synthétise l'application de ces différentes étapes sur notre zone d'étude (Fig. 5)

3.3.1. Modes d'acquisition des levés du trait de côte

L'acquisition des positions de la ligne de rivage pour l'analyse multi-temporelle s'est faite à travers deux modes de hautes précisions, la photographie aérienne et le GPS différentiel (DGPS). Les images satellitaires, quant à elles, ont été écartées pour ne pas altérer la qualité des résultats vu leur marge d'erreur qui reste assez importante par rapport aux deux précédents modes.

Tableau III. Seuillage de la bande bleue

	Longueur d'onde Bande bleue (µm)	Seuil spectral des objets urbains
Landsat 5 TM	B1 (0.45-0.52)	> 0.16
Landsat 7 ETM+	B1 (0.45-0.52)	>0.16
Landsat 8 OLI-TIRS	B2 (0.45-0.515)	>0.15

Tableau IV. Sources, années et échelles des data du trait de côte.

Type	Année de la compagne	Échelle	Résolution
Photos ariennes	1959	1 :25 000	Métrique
Photos ariennes	1980	1 :10 000	Métrique
Photos ariennes	1999	1 :10 000	Métrique
Levés DGPS	2015	/	Centimétrique

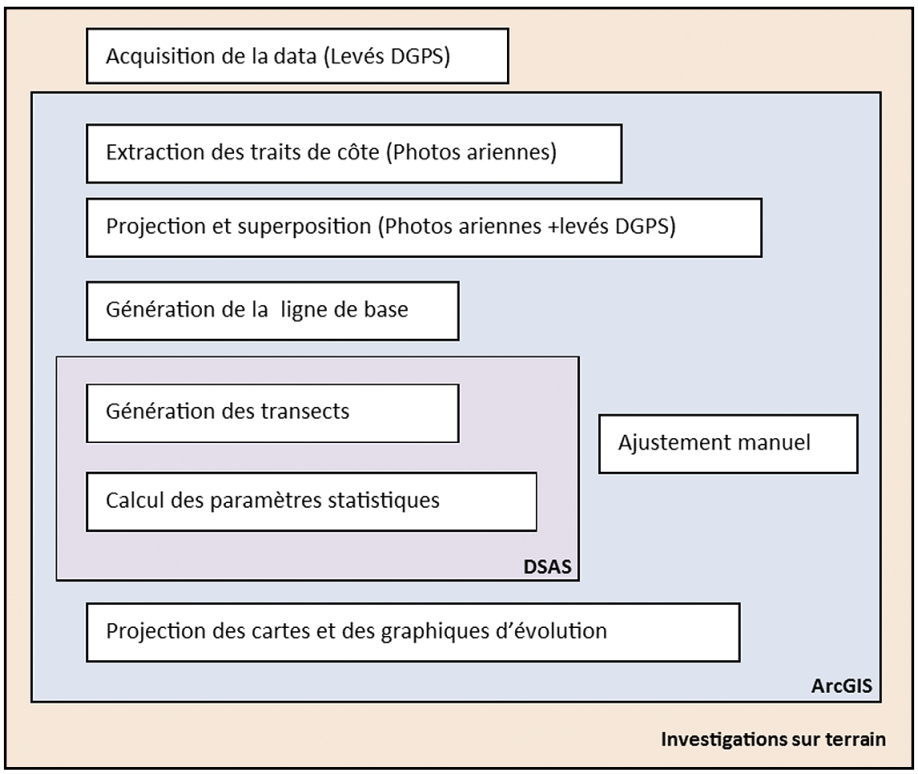


Figure 5. Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte.

3.3.2. Traitement des données

Les données de terrain nous ont permis de traiter les levés du trait de côte. L'évaluation de sa cinématique a été faite par l'application de l'extension DSAS (Digital Shoreline Analysis System) sur l'environnement ArcGIS 10.2. Cet outil permet de réaliser un calcul statistique des taux d'évolution à partir de différents traits de côte (Mallet et Michot, 2012).

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Analyse de la dégradation dunaire sur les zones urbanisées

En vue de quantifier les surfaces dunaires dégradées, une superposition spatiale de cartes des dunes extraites précédemment sur les zones d'urbanisation multi-temporelle est réalisée (Fig. 6).

La superposition montre globalement un étalement urbain sur la majorité des massifs dunaires (dunes meubles ou dunes consolidées), les dunes épargnées subissent quant-à-elle**s** un fort morcellement.

Le tableau V, ci-dessous, synthétise les principales statistiques de la régression des surfaces dunaires.

L'artificialisation au détriment des zones dunaires a été continue durant ces six dernières décennies. En effet, la zone Est de la baie a perdu environ 69% de son massif dunaire (Tab V), les plus grands taux de défrichement ont été réalisés entre 1960 et 1985 (lors de l'urbanisation économique du pays « post- indépendance »), à raison de 24 Ha/an. Ce taux de défrichement, même s'il a baissé (13,4 Ha/an entre 1985 et 2000 et 13.6 Ha/an entre 2000 et 2015), demeure toujours très élevé**.** Ceci est dû aux pressions démographiques sur le foncier (périodes d'exode rural / habitat précaire des années 1990 ou politique étatique de logement durant les années 2000).

On note aussi la dégradation considérable des dunes consolidées, localisées surtout dans les communes intérieures de la baie, (Heuraoua, Bab Ezzouar)**.** En effet, ces anciennes dunes défrichées (ou enfouies sous zones urbaines), perdent leur lien écosystémique avec les plages du fait de l'artificialisation intensive, et tendent à disparaitre définitivement (les sols dunaires consolidés sont des terrains très favorables à la construction).

Tableau V. Surfaces dunaires urbanisées dans la zone d'étude de 1960 à 2015 (en hectares).

	Surface jusqu'à 1960	Surfaces défrichées (Ha)					Surfaces restantes	
		Urbanisation 1960	Urbanisation 1985	Urbanisation 2000	Urbanisation 2015	Total	Hectares	%
Dunes	507,70	24,96	234,06	16,50	51,50	327,02	180,68	35,59
Dunes consolidées	1089,72	78,21	387,32	185,33	153,18	804,04	285,67	26,22
Total	1597,41	103,16	621,39	201,83	204,68	1131,06	466,35	30,90

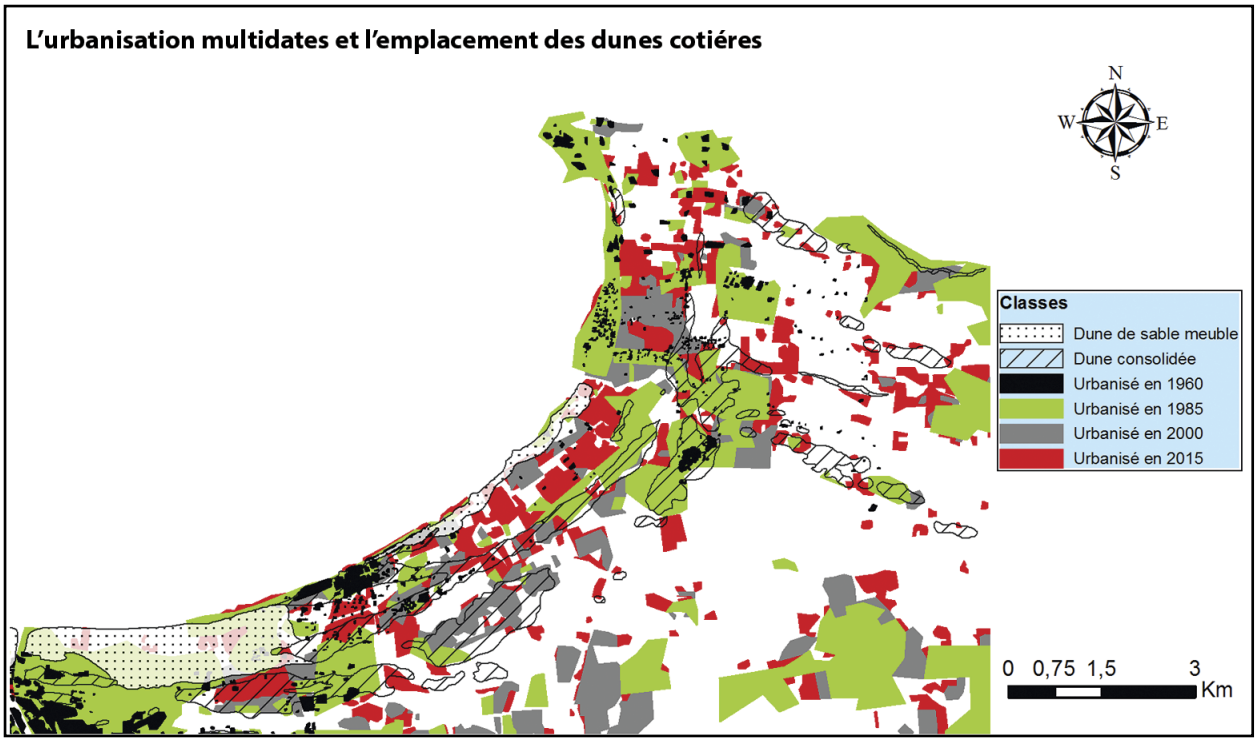


Figure 6. Évolution dans le temps de l'urbanisation sur les espaces dunaires dans l'Est de la baie d'Alger.

Cette disparition massive des dunes côtières, dégradées sous la pression de la crise foncière et de la croissance démographique sur la capitale**,** se traduit par la construction d'agglomérations urbaines. Ceci a causé par la suite « indirectement » des épisodes récurrents d'érosion côtière, au centre et à l'est de la baie d'Alger.

4.2. Évolution des espaces dunaires

La zone d'étude est située sur la baie d'Alger, une zone parmi les plus attractives du pays qui subit une pression anthropique due à l'attrait socio-économique de la capitale algérienne (Belhai-Benazzouz et Djelal, 2010)**.** Son évolution en aire métropolitaine, engendre une plus forte pression socio-économique, se traduisant par des impacts plus conséquents sur le milieu littoral et ses ressources environnementales.

Cette expansion urbaine est demeurée longtemps incontrôlée (Kacemi, 2011) et s'est faite lentement au détriment des espaces naturels, malgré la présence d'instruments législatifs interdisant l'urbanisation littorale dans diverses bandes de servitude (loi littorale 2002-02, Plan directeur d'aménagement et d'urbanisme (PDAU, etc.) (Ghodbani, 2013).

En effet, il a été relevé trois pics d'expansion urbaine à savoir:

- Un premier, dû à l'installation des infrastructures industrielles, d'une ligne de chemin de fer (pôles industriels de Hamiz Harrach, Rouiba, Regharia et Semmar) dans la période qui précédait les années 1985. Ceci a permis l'attraction socio-économique par le biais de création d'emplois avec possibilité d'installation dans la zone périphérique.
- La seconde expansion s'est opérée durant les années 1990, essentiellement pour des raisons d'insécurité, l'exode s'est fait majoritairement de façon anarchique, et relativement rapide sur la zone.
- Le dernier épisode d'urbanisation se développe à partir des années 2000, plus contrôlé, il se traduit essentiellement dans des projets de logements étatiques (AADL, social, etc.) (Rabehi, 2018).

La croissance démographique, bien que stabilisée dans les années 2000 par rapport aux périodes d'exode rural des années 1990, continue son allure montante**.** La zone connait également un autre mouvement démographique en raison de la crise foncière. Une migration des populations a eu lieu vers les nouveaux pôles d'urbanisation (communes intérieures, dites aussi «arrière-littorales» : Baraki, Sidi Abdallah, Douira, Bab Ezzouar, Reghaia, Heraoua, Les Eucalyptus, etc.).

Les zones qui présentent des formes dunaires consolidées peuvent être considérées comme une source indirecte de matériaux sédimentaires, notamment quand les facteurs érosifs, à savoir les précipitations et le réseau hydrographique, y sont favorables (arrachement et charriage).

En effet, à l'instar des apports sédimentaires assurés par les dunes et l'hydrodynamisme, les apports des oueds El Hamiz et El Harrach sont aussi significatifs (Larbi, 2017), et semblent pouvoir combler en partie le manque d'approvisionnement causé par la perte de dunes.

La présence du barrage d'El Hamiz en 1990 (36°35' N, 3°20'E, situé à 23 Km de l'embouchure, au sud de la capitale,

dans les monts de l'Atlas Blidéen « Commune de Meftah-Blida), réduit considérablement ses apports solides vers la mer (Hattabi et Kaddour, 2018), ce qui augmente le risque et l'ampleur de l'érosion.

Le tableau VI issu des données collectées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH, 2014) permet de constater la réduction en apports solides de ces cours d'eau, mais un manque important de données a rendu impossible la couverture de la totalité de la période d'étude.

Le défrichement et l'occupation des espaces dunaires dans la région peuvent induire dans le temps une réduction des apports, ceci semble se répercuter sur les plages comprises entre les principaux cours d'eau et la zone adjacente à ces derniers.

La région située entre oued El Hamiz et oued El Harrach a connu un fort changement durant la période d'étude. Ceci s'est traduit par une forte augmentation du tissu urbain qui s'est effectué au détriment des surfaces possibles, notamment les espaces dunaires. Le tissu urbain est passé de 103 hectares en 1960 à environ 204 hectares en 2015, tandis que les espaces dunaires côtiers ou consolidés à l'intérieur des terres ont vu leur superficie être réduite, la perte est donc estimée à plus de 69% des espaces dunaires dans la même durée.

4.3. Évolution de la ligne de rivage

Les calculs des variations de la ligne de rivage ont été effectués le long des 683 transects, répartis le long des dix plages de la partie orientale de la baie d'Alger à l'exception des secteurs des Pins Maritimes (Commune de Mohammedia) inaccessibles en 2015 (zone militaire).

Les résultats sont présentés en EPR (End Point Rate) (m/an) et NSM (Net Shoreline Mouvement) (m), ils matérialisent les minimums, les maximums ainsi que les vitesses moyennes des changements de la ligne de rivage.

Une analyse diachronique du trait de côte a été effectuée sur trois périodes distinctes 1959-1980, 1980-2003, 2003-2015, les dates ont été sélectionnées afin de rendre l'impact du défrichement dunaire plus visible.

4.3.1. Période allant de 1959 à 1980

La figure 7 montre que pour cette période l'EPR moyen est de + 0,72 m/an et le NSM global de 15,18m. Ces valeurs montrent que la zone présente une forte accrétion qui dépasse parfois le +1 mètre/an, mais qui reste non généralisée, vu que les plages qui se localisent dans le secteur adjacent des oueds semblent subir une érosion considérable due à la dynamique naturelle des embouchures.

L'état positif de l'évolution qualifié de naturel, peut être expliqué :

Tableau VI. Débits solides des cours d'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2014)

	Oued El Harrach	Oued El Hamiz
Apports solides As (m^3/an)		
1985	--	716732
1999	220688	176722
2014	107114	100226

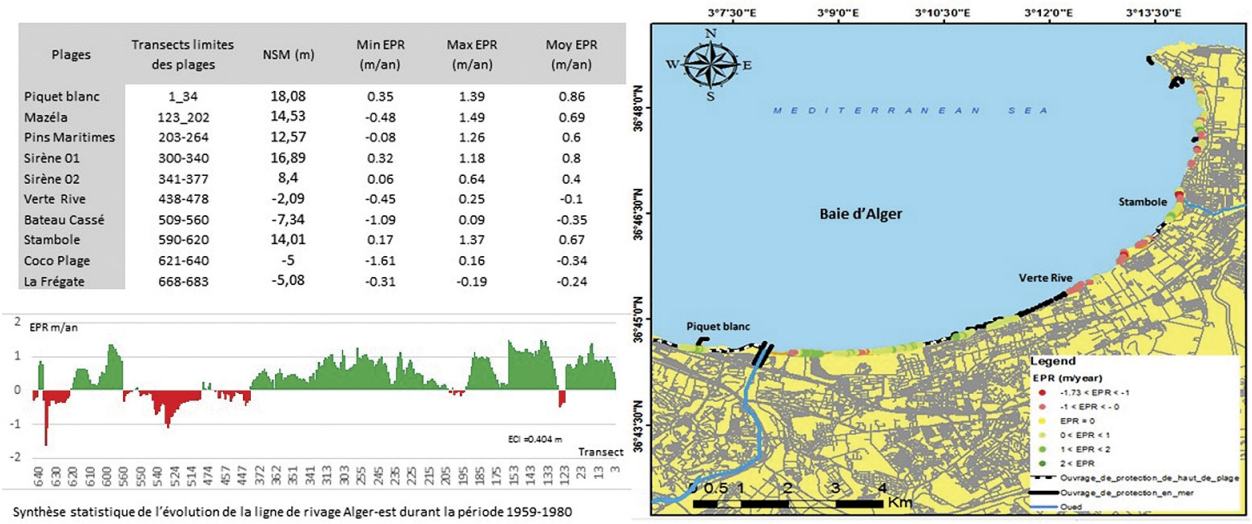


Figure 7. Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie est de la baie d'Alger durant la période 1959-1980.

- par la nature texturale de la zone, plus particulièrement la lithologie relativement fragile (grés) (Bouhamadouche, 1993), permettant un apport sédimentaire régulier,
- par l'absence d'ouvrages ou de formes de protection consistantes pouvant induire un changement de la dynamique sédimentaire de ce secteur.

4.3.2. Période allant de 1980 à 2003

Durant cette période, la zone connait une érosion alarmante. Seules quelques plages sont épargnées par ce phénomène d'érosion. Les plages de la commune de (Bordj El Kiffan) Fort-de-l'eau présentent les maximums de reculs avec des taux d'érosion moyens de l'ordre de -0,41 m/an (Fig. 08).

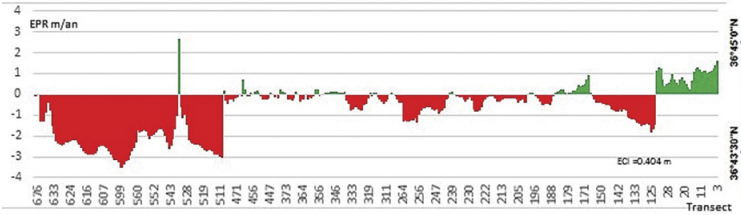
L'EPR moyen pour cette période est de -0,54 m/an, le NSM est de -6,5 m. Ces résultats peuvent être expliqués par l'effet de l'attaque frontale de la mer et la dégradation des dunes durant cette période**.** Ceci semble être les principales causes de ce phénomène traduisant ainsi, la forte vulnérabilité et la tendance à l'érosion à laquelle la zone fait face.

Par ailleurs, les enregistrements de l'ONM (Office Nationale de la Météorologie) au niveau de ces stations (région Alger-Est) ont permis de détecter un nombre important de tempêtes qui ont fortement influencé l'évolution de la zone. La diminution des apports solides des cours d'eau (tab. V), ainsi que la comparaison avec résultats de Bouakline (2009), renforcent ce constat.

4.3.3. Période allant de 2003 à 2015

Nous observons durant cette période une rapide évolution négative avec des EPR de -1,32 m/an et un NSM de l'ordre de 1,8 m pour la zone. En effet, l'expansion de l'urbanisation a induit l'augmentation des effets et avec cela, le besoin de protéger les biens installés sur la zone côtière, comme cela a été le cas, suite aux épisodes de tempêtes de 2007.

plages	Transects limites des plages	NSM (m)	Min EPR (m/an)	Max EPR (m/an)	Moy EPR (m/an)
Piquet blanc	1_34	17,08	0.26	1.59	0.9
Mazéla	123_202	-8,51	-1.81	0.94	-0.45
Pins Maritimes	203-264	-9,51	-1.35	0.14	-0.5
Sirène 01	300-340	-6,34	-0.79	0.09	-0.33
Sirène 02	341-377	-0,34	-0.33	0.24	-0.02
Verte Rive	438-478	-1,34	-0.45	0.7	-0.07
Bateau Cassé	509-560	-38,39	-3.04	0.69	-2.02
Stambole	590-620	-54,36	-3.54	-2.32	-2.86
Coco Plage	621-640	-35,24	-2.47	-0.41	-1.86
La Frégate	668-683	-1,27	-0.1	-0.03	-0.07



Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage Alger-est durant la période 1980-1999

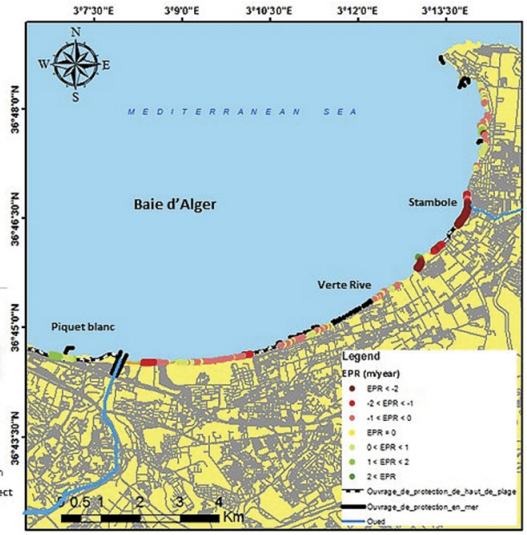
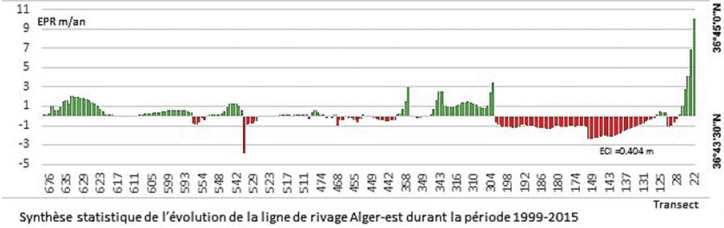


Figure 8. Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie est de la baie d'Alger durant la période 1980-2003.

plages	Transects limites des plages	NSM (m)	Min EPR (m/an)	Max EPR (m/an)	Moy EPR (m/an)
Piquet blanc	1_34	35,58	-1.06	10.01	2.19
Mazéla	123_202	-18,83	-2.39	0.54	-1.16
Pins Maritimes	203-264	Zone inaccessible			
Sirène 01	300-340	22,31	0.78	3.45	1.37
Sirène 02	341-377	8,18	-0.46	2.97	0.5
Verte Rive	438-478	-3,22	-0.98	0.58	-0.2
Bateau Cassé	509-560	-0,88	-3.89	1.33	-0.05
Stambole	590-620	4,14	-0.13	0.64	0.25
Coco Plage	621-640	20,96	0.19	2.06	1.29
La Frégate	668-683	1,95	0.02	0.23	0.12



Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage Alger-est durant la période 1999-2015

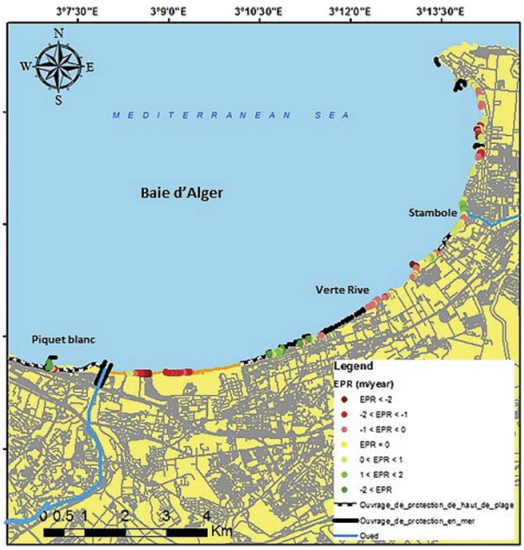


Figure 9. Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie est de la baie d'Alger durant la période 2003-2015.

Les ouvrages lourds de défense installés depuis 2008, ont eu un fort impact sur le transit du sédiment, impliquant la formation de surfaces d'accumulation, ils ont entrainé un déficit dans le budget sédimentaire en accentuant l'érosion dans certaines parties des zones adjacentes (Otmani, 2014).

4.4. Corrélation entre les différentes variables étudiées

La majorité des dunes défrichées en 1960 se situent à proximité du rivage (principalement des dunes côtières), les dunes consolidées, situées plus à l'intérieur (arrière-côte), sont défrichées régulièrement entre 1985 et 2015 (Fig. 10)

Les lits des 2 principaux oueds (Fig. 10) montrent une nette liaison géomorphologique entre les dunes arrières-littorales (consolidées), les dunes et la plage, les deux oueds « Hamiz / Harrach ». Leurs affluents jouent un rôle de transporteur (de la dune vers la plage), la disparition – défrichement de ces sources précieuses de sédiment, ainsi que l'urbanisation des berges et des lits des oueds créent un déséquilibre visible (Fig. 11b).

Le tableau VII présente une matrice de corrélation entre les différentes combinaisons possibles. Dans cette étude nous avons opté pour un coefficient de corrélation linéaire type simple, dit de Bravais-Pearson (ou de Pearson), qui représente une normalisation de la covariance par le produit des écarts-type des variables, selon l'équation suivante :

$$R_{xy} = \frac{COV(X,Y)}{(\sigma x \times \sigma y)}$$

4.4.1. Lien fort

On constate une forte corrélation entre l'urbanisation totale et les dunes défrichées (0,96 et 0,99); cela traduit l'aspect de l'urbanisation algéroise qui s'est implantée au détriment de surface dunaire, la corrélation étant plus élevée avec les dunes consolidées, car elles ont connu les plus grandes surfaces de défrichement.

Tableau VII. Corrélation entre urbanisation - dunes - trait de côte.

	Urbanisation totale	Dune meubles	Dunes consolidées	Surface TC perdue (m^2)	Surface TC gagnée (m^2)
Urbanisation totale	1				
Dunes meubles urbanisées	0,961030293	1			
Dunes-cons défrichées	0,995460991	0,9486945	1		
Surface perdue (m^2)	-0,052968617	0,174133597	-0,128663885	1	
Surface gagnée (m^2)	0,336585713	0,578745309	0,29170333	0,840512267	1

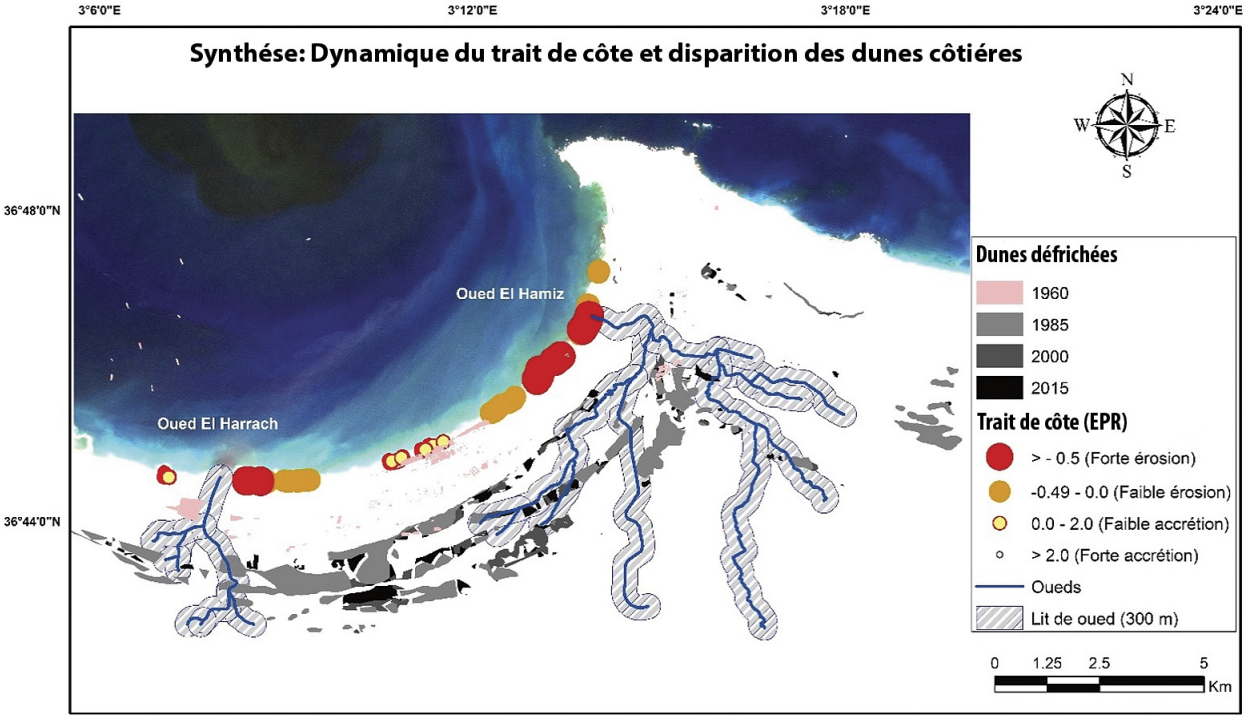


Figure 10. Synthèse de la dynamique du trait de côte et de la disparition des massifs dunaires dans la partie est de la baie d'Alger.

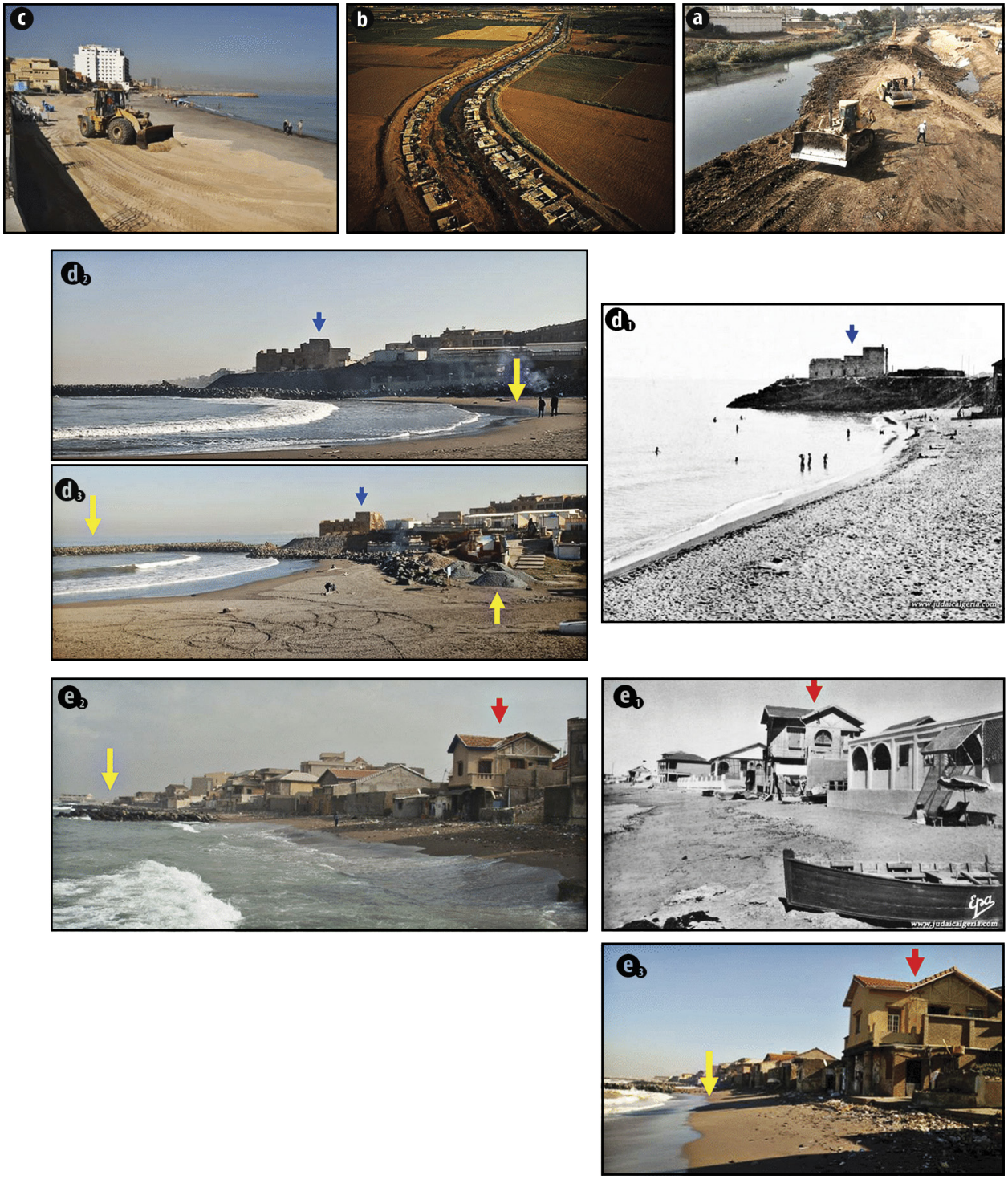


Figure 11. Galerie de photos**. (a)** Rejet des matériaux sédimentaires dans l'Oued El Harrach, **(b)** Urbanisation des rives de l'Oued El Hamiz (Photo de Yann A.B) **(c)** travaux de rechargement plage Sirène 2016 (Photo de Djerrai N.E) **(d_1)** La plage Sirène 1958 **(d_2)** La plage Sirène 2019 (Recul du trait de côte) **(d_3)** La plage Sirène 2019 (ouvrage de protection et travaux d'aménagement) **(e_1)** La plage Verte Rive 1958 **(e_2)** La plage Verte Rive 2016 installation des ouvrages de protection (Photo de Djerrai N.E) **(e_3)** La plage Verte Rive 2019 (Stabilisation de la ligne de rivage)

4.4.2. Lien faible

Les surfaces perdues du trait de côte sont liées (0,17) au défrichement des dunes côtières (proches des plages), le fait que ce lien soit faible est probablement dû à la présence d'autres facteurs pouvant alimenter la plage et compenser l'érosion (apport des courants de dérive (Fig. 11e_2), apport des oueds depuis l'intérieur du pays etc.).

Les surfaces gagnées (accrétion), sont également positivement liées à l'urbanisation (0,33), au défrichement des dunes/dunes consolidées (0,57 et 0,29) de manière « hypothétiquement improbable », car souvent l'urbanisation côtière s'est vue accompagnée de « rechargement artificiel de plage et d'implantation d'ouvrages de protection sur certaines plages » (Fig. 11c, d_3, e_2), ce qui a contribué à l'augmentation du bilan sédimentaire des plages / trait de côte.

En effet, afin de pallier aux soudaines érosions marines, les ouvrages de protection ne semblent pas suffisants, la complémentarité de sédiments d'emprunt est souvent préconisée.

Dans notre matrice (-0,05), l'urbanisation est très faiblement liée aux surfaces perdues du TC (trait de côte) car deux variables dans la même période temporelle sont comparées, or le rapport de cause à effet est souvent reporté dans le temps (l'érosion du trait de côte n'a lieu que des années plus tard).

Le rapport est faible entre « dune consolidée » et « surface perdue des plages » (-0,12), car les dunes consolidées sont structurellement moins meubles et moins aptes au transport sédimentaire que les dunes littorales de proximités, parfois elles sont enfouies et fixées par l'urbanisation ou des formes de végétation (arbustes).

Dans certains cas aussi, le défrichement des dunes consolidées près des oueds peut intensifier ce rapport négatif, par le biais des sables rejetés dans les oueds et alimentant les plages par la suite (Fig. 11a).

Il est à noter que certaines des faibles corrélations sont dues à la complexité des processus naturels s'opérant au sein du système côtier et qui malheureusement n'ont pas pu être très bien détaillé dans ce travail. En effet, sur le plan hydrodynamique et selon Larbi (2017) les houles dominantes sont de secteur nord-est et sont susceptibles d'engendrer des courants de dérive est-ouest. La dérive littorale étant un facteur important de mobilisation des sédiments, sa considération pourrait apporter des éléments pertinents d'explication pour les résultats obtenues dans de ce travail.

La faible corrélation entre quelques combinaisons des variables abordées peut être reliée à la perte d'une certaine quantité d'information lors du passage de la 3D à la 2D. Il s'agit notamment des dunes sableuses et des profils de plages. Ceci représente d'ailleurs une des limites de cette étude qui doit être reprise dans le futur (avec une mise à disposition de fonds nécessaires, et une volonté des acteurs locaux).

Rabehi (2018) avance l'hypothèse que les plages ayant un lien direct avec ces anciennes dunes, se trouvent dépourvues de sources d'alimentation en sédiment. Il faut noter que d'autres facteurs intervenant et influant sur les processus de transport sont à prendre en considération (hydrodynamisme, apports solides des cours d'eau) (Fig. 11b).

5. CONCLUSION

La présente étude avait pour objectif d'évaluer le degré d'influence de l'expansion urbaine sur le fonctionnement des systèmes côtiers. La disparition systématique des espaces dunaires et les fluctuations engendrées au niveau des plages ont eu un impact sur l'expansion du tissu urbain.

L'analyse temporelle a montré une tendance à l'occupation des dunes, phénomène déjà remarqué en 2015 (70% déjà urbanisées). Un plan d'occupation adapté et des systèmes de surveillance seraient indispensables à développer et à déployer pour accompagner l'évolution et pérennité de ce processus.

L'évolution des variables abordées durant la période allant de 1959 jusqu'à 2015 a montré une forme de lien cause-à-effet assez complexe entre les processus côtiers opérant dans l'Est algérois**.** Elle démontre que le bilan surfacique global concernant les plages semble rester stable**.** Cette stabilité a été acquise grâce à la mise en place des ouvrages de protection (brise lames). Il faut noter que la pénurie sédimentaire engendrée par le défrichement des dunes reste omniprésente entrainant un impact ressenti sur le terrain.

L'hypothèse conceptuelle au départ de ce travail, « une dégradation supposée directe des plages après dégradation des dunes nurseries » a été contredite par des taux de corrélations faibles. Il existe une multitude de variables à prendre en compte (rechargement artificiel des plages, digues de protection etc.) ou encore d'autres informations historiques émanant du terrain, tels certains cas de rejets sédimentaires de dunes défrichées dans les oueds.

Cette contribution a permis ainsi de mettre en exergue pour la première fois à l'échelle nationale une quantification surfacique de l'ampleur de disparition des dunes côtières, notamment à travers le couplage des techniques géo-spatiales, en l'occurrence l'utilisation des SIG/Télédétection.

Ce monitoring spatial de l'artificialisation de la côte couplé à des outils de calculs géostatistiques, a donné des résultats satisfaisants en matière de tendance globale (urbanisation – défrichement – érosion – accrétion). Afin d'avoir un diagnostic plus approfondi et de maitriser l'ensemble des facteurs intervenant dans les processus sédimentaires, il est nécessaire de combiner les données in-situ et de fournir un support statistique, pour la prise de décision en matière de gestion intégrée des littoraux algérois

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs remerciements, les plus vifs aux membres du laboratoire des écosystèmes marins et littoraux (EcoSysMarl) de l'École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL), un grand merci est tout autant adressé à toute l'équipe du Centre des Techniques Spatiales (CTS-Arzew, Département Observation de la Terre) de l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL) pour la précieuse collaboration sans laquelle ce travail n'aurait pas été possible.

Ce document est également dédié à la mémoire du défunt Dr Mohamed Larid, ex-enseignant à l'ENSSMAL.

BIBLIOGRAPHIE

Albérola A., Rousseau S., Millot C., Astraldi M., Font J., Garcia-Lafuente J., Gasparini G. P., Send U., Vangriesheim A., (1995). Tidal currents in the western Mediterranean Sea, *Oceanologica Acta* **18**, *2*, 273284.

Amarouche K., Bachari N.I., Houma F., Boughrira A. (2017). Development of a numerical code to simulate the hydrodynamic energy potential, applied at Bou Ismail bay. Revue des Energies Renouvelables, **20**, *3*, 377-388.

ANRH, 2014. Rapport, Agence Nationale des Ressources Hydriques, Alger.

Belhai-Benazzouz A., Djelal N. (2010). Le foncier vecteur de l'étalement urbain Algérois, In Symposium: Identity and territorial competitiveness, du 20 au 22 Septembre 2010 ASRDLF-AISRE.

Bouabdallah M., Larue J.P. (2009). Évolution du littoral de la baie de Saïdia: dynamique naturelle et impacts des aménagements (Maroc oriental). Physio-Géo,Géographie Physique et Environnement, **3**, 121-132.

Bouakline S. (2009). Variation historique de la ligne de rivage et érosion cotière le long de la cote Est algéroise entre Cap Matifou et l'embouchure de l'oued Réghaia. Thèse de doctorat, USTHB. Alger

Bouhamadouche T. (1993). Sédimentologie du plateau continentale Est algérois (Boumerdes-Boudouaou el Bahri) «morphologie, minéralogie, mécanisme hydrosédimentaire, érosion et protection du littoral. Mémoire de magistère USTHB. Alger, 142 p.

Bounoua N., Kaci S., Otmani H., Khelil N. (2017). Etude des écosystèmes dunaires algérois : étude comparative entre les deux ensembles dunaires du Mazafran et d'El Kadous., ENSSMAL. Alger.

Daniel F., et Hubaud M. (1996). Érosion côtière des systèmes littoraux sableux, s.l.: ODEM.

Ghodbani T. (2013). La littoralisation dans l'Ouest algérien : analyse multiscalaire des interactions hommes-espaces-écosystèmes «,. Espace populations sociétés , Volume **2013**/*1-2*, DOI : 10.4000/eps.5488 .

Hattabi M., Kaddour H. (2018). Impact de l'élévation de niveau de la mer et des tempêtes sur l'évolution morpho dynamique de la région Est de la baie d'Alger : simulation numérique des processus hydro-sédimentaires. ENSSMAL. Alger.

Hemdane Y., Bouhmadouche M., Atroune F., (2016). Identification des zones côtières à fort potentiel en énergie marine renouvelable (vagues/houles) à travers l'étude de la morphologie côtière et sous-marine et hydrodynamique*, Revue des énergies renouvelables* **19**, *4*, 543-552.

Heurtefeux H., Grosset S., Valantin P.Y. (2007). « Une approche alternative de la gestion des risques côtiers, l'exemple de la petite Camargue »,. Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement, **1**, 3-13.

Jego R. (2003). Evolution du trait de côte : du suivi des érosions côtières.

Jungerius P.D., Van der Meulen F. (1988). Erosion processes in a dune landscape along the dutch coast. CATENA, **15**, 217-228.

Kacemi M. (2011). Protection and development of the coastal areas in Algeria : Legislation and instruments, The Case of Oran's Coastal areas. Etudes Caribéene DOI: 10.4000/etudescaribeenes.5959.

Łabuz T.A. (2004). Coastal dune development under natural and human influence on Swina Gate Barrier (Polish coast of Pomeranian Bay). Coastline Reports, **2**, 129-138.

Larara M., Nedjari A., Maouche S., Benhamouche A., Meghraoui M., (2012). Littoral algérien et risques de Tsunamis, *Bulletin du service géologique national* **23**, *3*, 241-251.

Larbi N. (2017). Etude de protection et d'aménagement de la zone de Verte Rive. ENSSMAL. Alger.

Le Berre I., Hénaff A., Devogèle T., Mascret A., Wenzel F. (2008). SPOT5 : un outil pertinent pour le suivi du trait de côte ? *Norois. Environnement, aménagement, société*, **196**, 23-35.

LEM (Laboratoire des études maritimes) (1998). Etude de délimitation d'une zone d'extraction de Sable sur la baie d'Alger.

Ley de la Vega C., Favennec J., Gallego-Fernández J., Pascual Vidal C. (2012). Conservation des dunes côtières. Restauration et gestion durables en Méditerranée occidentale. UICN, Gland, Suisse et Malaga, Espagne. 124 p.

Maret I., Cadoul T. (2007) . « Peut-on concilier risques côtiers et planification viable ? ». Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement, **1**, 83-95.

Mallet C., Michot A. (2012). Synthese de référence des technique du suivi du trait de cote : Rapport d'activité., France : Bureau des recherches géologiques et minieres BRGM/RP-60616-FR..

Mihoubi M.K., Belkessa R., Latreche M.A. (2014). Study of the Vulnerability of Coastal Areas of the Algerian Basin with the GIS,. International Journal of Environmental Science and Development, **5** (*6*), 522-525.

ONS (2017). Rapport, Office National des Statistiques, Alger. http://www.ons.dz/-Habitat-.html

Otmani H. (2014). Impact des infrastructures maritimes sur le littoral : cas du port de Cap Djinet. Thése de Magister éd. ENSSMAL. Alger.

Paskoff R. (1992). Les dunes littorales, s.l.: Annales de Géographie, **101** (*563*).

Pinot J.P. (1998). La gestion du littoral, (vol. **1**). Institut océanographique. Paris.

Population data. (2015). Atlas des populations des pays du monde, https://www.populationdata.net.

Rabehi W., Guerfi M., Mahi H. (2018). Cartographie de la vulnérabilité des communes de la baie d'Alger, Approche socio-économique et physique de la côte. Méditerranée, Volume Varia, 1-17.

Rabehi W. (2018). Détermination spatio-temporelle de l'expansion urbaine sur la baie d'Alger et impact environnemental sur la bande côtière, Algérie: Thése de Doctorat, ENSSMAL.

Sabatier F. (2001). Fonctionnement et dynamiques morphosédimentaires du littoral de delta du Rhône. Thèse de doctorat, Aix-Marseille 3.

Yelles-Chaouche A., Roger J., Deverchere J., Bracene R., Domzig A., Hebert H., Kherroubi A., (2009). The 1856 Tsunami of Djidjelli (Eastern Algeria): Seismotectonics, Modelling and Hazard Implications for the Algerian Coast, Pure and applied geophysics **166**, 283-300.