

ETUDE MORPHODYNAMIQUE D'UNE AVANT PLAGE A BARRES : CAS DE KALAAT ANDALOUS ET RAOUED, GOLFE DE TUNIS (MEDITERRANEE)

Thouraya BEN MOUSSA¹, O. AMROUNI², A. HZAMI¹ et S. ABDELJAOUAD¹

¹ Laboratoire Energétique, Ressources Minérales et Environnement, Université de Tunis- El Manar, Tunis 2092, Département de Géologie. Tunisie. Email : benmoussa_thouraya@yahoo.fr , saadi_abdeljaouad@yahoo.fr

² Laboratoire du Milieu Marin, Institut National des Sciences et Technologies de la Mer, Salammbô 2025. Tunisie. Email : oula.amrouni@instm.rnrt.tn

ملخص

دراسة مورفوديناميكية الشواطئ: شاطئ قلعة الاندلس و رواد، خليج تونس (البحر الأبيض المتوسط) : تمحور الهدف الاساسي لهذه الدراسة حول متابعة التغيرات المورفوديناميكية الرسوبية للواجهة الامامية (0 الى عمق 10 امتار) للشواطئ الرملية لخليج تونس (شاطئ قلعة الاندلس و رواد). قد تمت هذه الدراسة بالاعتماد على جمع عينات رسوبية (70 عينة قاعية) وإنجاز مسح قاعي جيومتري خلال الفصل الصيفي لسنة 2014 (جوان واوت). واعتمد تصنيف مورفوديناميكية الشواطئ على مؤشرين اثنين (Ω , ξ). لقد تبين من خلال دراسة مورفوديناميكية الرواسب السطحية ان الرسوبيات غالبا رملية من متوسطة الحجم الى دقيقة جدا وذلك في تدرج حجمي تنازلي متجانس نسبيا من عمق 0 الى 8 أمتار. غير ان بعض المناطق تميزت بتوزيع رسوبي غير متجانس وذلك في صدارة شاطئ قلعة الاندلس و قبالة مصب وادي مجردة برواد.

وبينت نتائج مسح الاعماق للمورفولوجية القاعية لواجهة شاطئ رواد، جنوب مصب وادي مجردة، وجود احزمة من الهضبات الرملية وذلك بين منطقة الشاطئ المائي القصير ($1-2$ أمتار) الى الأعماق (≈ 6 أمتار):

1-الهضبة الرملية الداخلية هلالية الشكل وتكاد تكون ملتصقة بالشاطئ:

Rhythmic Bar and Beach =RBB

2-الهضبة الرملية الخارجية وقد اتخذت شكل مورفولوجي متناسق تداولي متكون من قمم وحواف جوفاء:

Transverse Bar and Rip = TBB

كما اشار احتساب مؤشرات تصنيف الشواطئ ومؤشر انكسار الأمواج إلى أن شاطئ قلعة الاندلس يعدّ من نوع الشواطئ المبددة لطاقة الامواج بينما شاطئ رواد يعدّ من الشواطئ متوسطة التبدد.

تفسر المورفولوجيا الهلالية الشكل للحزام الرمي الداخلي لشاطئ رواد، تأثير تناوب التيارات البحرية الطولية والعرضية الناجمة على درجة زاوية انكسار الامواج المتأنية من الجانب الشرقي غالبا. وقد اكدت الدراسة الرسوبية هذا التشخيص وذلك بوجود حبيبات رملية متوسطة الحجم بتجويفات هذه الهضبات وهو ما يؤكد وجود تيارات بحرية جوفية قوية قادرة على جر الرسوبيات من الشواطئ الى الاعماق.

الكلمات المفاتيح: مورفوديناميكية، هضبات رملية بحرية، الواجهة الامامية للشاطئ، خليج تونس، البحر الأبيض المتوسط.

RESUME

Le suivi de la réponse morphodynamique d'une plage sableuse microtidale à barres soumise à des conditions météorologiques extrêmes ont fait l'objet de cette étude. Le secteur d'étude est localisé dans la baie occidentale du golfe de Tunis : les plages de Kalâat Andalous et de Raoued (Mer Méditerranée). L'étude morphodynamique a été effectuée grâce à une étude sédimentologique complétée par des mesures topo-bathymétriques de détail de l'avant côte (de 0 à - 8 m de profondeur). Les conditions météorologiques qui régissaient les campagnes de terrain étaient caractérisées par une tempête marine estivale de direction Sud-Est (Juin 2014). Le calcul du paramètre Ω et du *surf similarity index* ξ indique que les plages de Kalâat Andalous sont dissipatives ($\Omega = 11,4$ et $12,4$; $\xi = 0,54$ et $1,52$) à intermédiaires au niveau des plages de Raoued ($\Omega = 2,7$ et $12,4$; $\xi = 0,4$ et $1,33$).

La distribution texturale des sédiments de l'avant plage de Kalâat Andalous et de Raoued montre un granoclassement décroissant vers le large marqué par des zones hétérogènes. Le prisme littoral de la partie centrale de la baie est caractérisé par l'existence de deux barres d'avant-côte : 1- Une barre interne festonnée (Rhythmic Bar and Beach =RBB) et 2- une barre externe qui prend une forme transversale rythmique (Transverse Bar and Rip = TBB) moins uniforme. La barre interne révèle une instabilité sous le forçage du régime hydrodynamique des vagues incidentes de direction Sud-Est. Cette réponse morphodynamique tridimensionnelle des barres à l'action de la houle estivale de tempête Sud-Est se manifeste par le festonnage des barres internes et la périodicité des barres externes. L'analyse texturale et la nature des sédiments confirment ce diagnostic.

Mots clefs : Morphodynamique, barres sédimentaires, avant plage, Golfe de Tunis, Méditerranée.

ABSTRACT

Morphodynamic study of a sandbar beach: case of Kalâat Andalous and Raoued nearshore, Gulf of Tunis (Mediterranean) : The aim of this study is the monitoring of the morphodynamic response of a microtidal sandbars beaches under storm surge conditions. The workfield is located in the western bay of the Gulf of Tunis: Kalâat Andalous and Raoued beaches (Mediterranean Sea). The morphodynamic study was based on a

sedimentological surveys completed by a detailed topo-bathymetric measurement (from 0 to -8 m in depth). The field campaigns were conducted in a south to eastern wave dominated storm condition (June 2014).

The calculation of Ω parameter and surf similarity index ξ indicates that beaches are ranging from dissipative for Kalâat Andalous ($\Omega = 11,4$ and $12,4$; $\xi = 0,54$ and $1,52$) to intermediate for Raoued ($\Omega = 2,7$ and $12,4$; $\xi = 0,4$ and $1,33$).

Sediments textural distribution of Kalâat Andalous and Raoued nearshores shows a decreasing of the grain size pattern toward seaward marked by heterogeneous zones. The coastal prism of the central bay's area is characterized by the existence of two nearshore sandbars: 1- A crescentic inner bar (*Rhythmic Bar and Beach = RBB*) and 2- A rhythmic transversal shaped outer bar (*Transverse Bar and Rip = TBB*) less uniform. The inner bar reveals an instability under the forcing of the southeast incident waves' hydrodynamic regime. In fact, the three-dimensional shape of the sandbars reflected the morphodynamic response to the action of the summer Southeast swell. Both of the textural analysis and the nature of the sediments confirm this diagnosis.

Keywords: Morphodynamic, sandbar, nearshore, Gulf of Tunis, Mediterranean.

INTRODUCTION

Les interfaces côtières sont parmi les lieux les plus dynamiques de la planète. Il s'agit d'un domaine soumis à des processus morphodynamiques très variables dans le temps et dans l'espace. Ces processus dépendent des apports sédimentaires variables qui sont en interaction avec les agents de forçage hydrodynamiques (vagues, courants et marées). Toutefois, les plages sableuses sont l'une des composantes les plus variables des systèmes côtiers imprévisibles. La variation morphologique spatio-temporelle des plages sableuses a été sujette des plusieurs travaux scientifiques. Les modèles d'états morphologiques séquentiels (Wright et al. 1982 ; Wright et Short, 1984 ; Short, 1999 ; Masselink et Short, 1993) prédisent les effets temporels et spatiaux des vagues incidentes sur l'évolution des plages à barres.

Un accent particulier a été mis sur l'existence des barres sédimentaires d'avant-côte qui en sont, en effet, un trait caractéristique. Ce système de sédiment mobile constitue tantôt un réservoir sédimentaire qui alimente le prisme littoral via les courants longitudinaux et/ou sagittaux tantôt une barrière de protection naturelle contre les vagues incidentes (Van Rijn, 1998). La morphodynamique des barres sableuses représente donc un thème très étudié (Greenwood et Davidson-Arnott, 1979 ; Barousseau et Saint-Guilly, 1981 ; Ruessink et al., 2000 ; Certain, 2002 ; Amrouni, 2018). Elle s'appuie notamment sur la distinction préliminaire de trois états morphodynamiques types de plage soient dissipatives, intermédiaires et réfléchives (Gourlay, 1968 ; Wright et Short, 1984). Cependant, la compréhension du fonctionnement de ces systèmes est encore entachée d'une insuffisante connaissance de l'ensemble des littoraux mondiaux.

Le bassin méditerranéen a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche essentiellement focalisés sur la morphodynamique des plages sableuses pour une meilleure compréhension des interactions morphologiques, hydrodynamiques et sédimentaires (Sabatier, 2001 ; Certain, 2002 ; Castelle, 2004 ;

Castelle et Bonneton, 2004). A cet égard, des études récentes ont été entreprises sur les côtes de Tunisie pour une meilleure compréhension de la boucle morphodynamique du système littoral (Amrouni, 2008 ; Bardi, 2010 ; Yahyaoui et Rebai, 2014 ; Amrouni et al., 2018).

Le secteur d'étude localisé dans la baie ouest du golfe de Tunis, a fait l'objet des plusieurs investigations indiquant que la plage est soumise à un déséquilibre morpho sédimentaire relativement important (Brahim et al., 2007 ; 2015 ; Saidi, 2013). La résultante de ce déséquilibre s'est manifesté par des vitesses de recul du rivage allant de 0,5 à 1,5 m/an à -5 m/an (Oueslati, 1994) ; de -1,11 m/an (Saidi, 2013) et pouvant atteindre -42,6 +/-1,1 m/an (Louati et Saidi 2014) et $-20,7 \pm 3$ m /an (Hzami et al., 2018) par endroits.

On se propose de présenter les résultats d'une étude morphodynamique qui définit les caractères du régime hydrodynamique dans la baie ouest du golfe de Tunis à travers l'étude de la morphologie et de la sédimentologie de l'avant-côte.

Site d'étude

La baie occidentale du golfe de Tunis est située entre deux promontoire rocheux, le Cap Ferina au nord et le Cap Gammarth au sud, au Nord-Est de la Tunisie entre les coordonnées géographiques respectives $36^{\circ}50'$; $37^{\circ}00'N$ et $10^{\circ}00'$; $11^{\circ}00'E$ dans le bassin Méditerranéen (Figure 1).

La zone littorale est formée depuis la transgression Holocène (Pimienta, 1959 ; Jauzein, 1971) par une succession de dépôts fluvio-continentaux de l'oued de la Medjerda. Des sédiments anciens, de nature alluviale du quaternaire sont déposés au niveau de l'ancienne embouchure de l'oued Medjerda (plage de Ghar El Melah) ainsi que des alluvions récents formés d'argiles sableuses, de sable et des graviers (Paskoff, 1983 ; Paskoff et Troussset, 1992 ; Paskoff, 1994). Les dépôts du Quaternaire marin affluent essentiellement sur la zone côtière et se déposent sous forme de cordons littoraux (El Arrim 1996).

La baie abrite un ensemble des plages sableuses plus au moins larges réparties sur 60 km de linéaire côtier. Du Nord au Sud, on distingue plusieurs systèmes côtiers ouverts à semi-fermés et des paysages

géomorphologiques tels que : la lagune de Ghar El Melah, la flèche sableuse de Kalâat Andalous, la lagune de Kalâat Andalous, les marais du delta de la

Medjerda, et le champ de dunes côtières de Raoued-Hessiane (Figure I A).

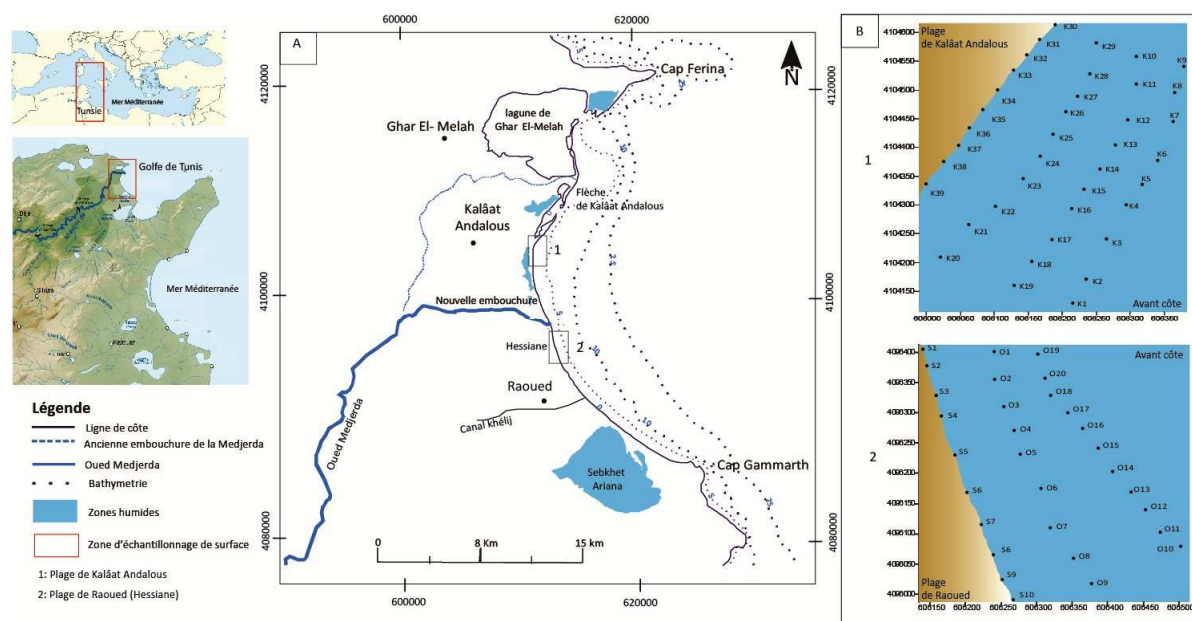


Figure I : A/ Carte de localisation du secteur d'étude au niveau de la baie ouest du golfe de Tunis, Tunisie. B/ Positions de prélèvement sur les deux sites ateliers : la plage de Kalâat Andalous et la plage de Raoued.

Climat et hydrologie

Le golfe de Tunis se caractérise par un régime semi-aride, soumis à un faible marnage compris entre 0 et 0,20 m NGT (*Niveau Général de la Tunisie*) (Ben Charrada et Moussa, 2009). Les vents terrestres Ouest à Nord-Ouest sont les plus fréquents et les plus forts. Cependant, l'analyse statistique des données journalières pour l'année 2012, montre une variabilité saisonnière. La période hivernale est marquée par des vents forts et fréquents des secteurs Nord et Nord-Ouest. Pendant la période estivale, ce sont les vents des secteurs Est et Sud-Est qui balayent le golfe (INM, 2012).

D'après plusieurs études menées sur le même site d'étude (Kouki, 1984 ; El Arrim, 1996 ; Saidi, 2004 ; Amrouni, et al., 2014) la houle est considérée parmi les agents hydrodynamiques primordiaux influençant l'évolution morphodynamique des plages sableuses. Les données statistiques des houles montrent que les directions les plus actives proviennent du quadrant secteurs Nord-Nord Est et Nord Est. La valeur de la hauteur significative de la houle est égale à $H_s=1,25$ m avec une période T égale à 4,5 s. Toutefois, le secteur d'étude se caractérise occasionnellement, par un régime de houles énergétiques de direction Est à Sud-Est (LCHF, 1982). La vitesse des courants étant estimée à $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ (SOGREAH, 1974 ; LCHF, 1982). La dérive littorale générale est de direction Nord-Sud

(Paskoff, 1981 ; Kouki, 1984 ; El Arrim, 1996 ; Brahim et al., 2007). Des courants secondaires antagonistes sont responsables du transport sédimentaire de Sud vers le Nord pendant la période estivale (Amrouni et al., 2014).

Le régime hydrographique de la côte ouest du golfe de Tunis est commandé par l'oued Medjerda et le canal artificiel Khelij. La Medjerda constitue le cours d'eau le plus important en Tunisie qui alimente le golfe de Tunis dans sa partie septentrionale (Rodier et al., 1981). Il prend naissance dans les plateaux constantinois en Algérie. Son débit annuel moyen est de l'ordre d'un milliard de mètre cube. Son bassin versant couvre le 23500 km^2 . Le lit principal de l'oued s'étend sur 485 km. Une ancienne embouchure débouche dans la mer au Nord-Ouest du golfe de Tunis au niveau de la lagune de Ghar El Melah. Une nouvelle embouchure atteint la mer au niveau de la plage de Kalâat Andalous (Figure I A). La Medjerda est interrompu par plusieurs barrages dont le plus grand est celui de Sidi Salem.

Le canal Khelij reçoit quelques apports descendants des pentes nord du Jebel Ammar. Il draine les eaux pluviales de l'oued El Hessiane et les eaux usées épurées des stations d'épuration de Tunis nord. Son bassin versant est de l'ordre de $126,2 \text{ km}^2$. Son canal débouche sur la mer au niveau de la plage El Hessiane.

MATERIEL ET METHODES

Echantillonnage et analyse des sédiments superficiels

L'analyse sédimentologique de l'avant plage a été effectuée grâce à deux campagnes d'échantillonnage suite à une tempête estivale du vent marin Sud-Est (26 Juin 2014). Le protocole d'échantillonnage de sédiment de surface a été effectué selon une grille de maille serrée (30 m × 40 m) respectivement sur le profil de plage longitudinal et transversal (de 0 à -4 m de profondeur) (Figure IB). Les Coordonnées géographiques des positions d'échantillonnage ont été prises par un DGPS de type « *Gamin Montana 600 Séries* ». Un total de 70 échantillons a subi une analyse granulométrique par tamisage (tamis de progression *AFNOR*). L'exploitation numérique, en vue de caractériser les distributions granulométriques, a été faite par le calcul des indices classiques (Mode, dimension moyenne M_z , indice de triage σ , indice d'asymétrie SK_1 et indice d'angulosité K_G) selon Folk et Ward (1957).

Levés et traitement des données topo-bathymétriques

Un levé de détail de l'avant plage de Raoued en sondage bathymétrique a été réalisé en août 2014 entre la ligne de rivage et les fonds de 10 m. Ce levé a été dressé selon 40 profils perpendiculaires à la côte, sur un linéaire de 6 km, longs en moyenne de 800

mètres (1 km par endroit). La densité de points relevés en x, y, z est supérieure à 500 km⁻² par un DGPS différentiel (*type Trimble, série 4000*) et un échosondeur bilatéral à une seule fréquence (208 kHz) lié aux satellites. Le document a été restitué en coordonnées Lambert nord et a fait l'objet d'un traitement par Surfer®. Des Modèles Numériques du Terrain (MNT) géoréférencés sous formes des cartes en 2D et en 3D de l'avant plage ont été générés.

Les conditions météorologiques qui ont précédé la campagne topo-bathymétrique sont caractérisées par de forts coups de mer de direction Est à Sud-Est (vitesses de 9 à 33 km.h⁻¹).

Classification morphodynamique des plages

Le calcul de l'indice de Gourley Ω a été réalisé en utilisant le modèle empirique de classification de la morphologie des plages microtidales. Cet indice est calculé avec des paramètres granulométriques et hydrodynamiques (w_s , H_b , T) développé par Gourlay (1968) et ajusté par Wright et al., (1982), Short et Hesp (1982) et Wright et Short (1984). La classification des plages a été aussi établie en calculant l'indice ξ_b (surf similarity parameter) développé par Iribarren et Nogales (1949) ; et ajusté par Battjes (1974). Cet indice est basé sur les paramètres morphodynamiques (β , H_b , T). Le principe de classification des différents types des plages est résumé dans le tableau I

Tableau I : Principe de classification morphodynamique des plages selon les indices ξ et Ω (Short, 1999)

Classifications des plages	Réflexive	Intermédiaire	Dissipative
Ω	< 1	2-5	> 6
ξ_b	>1	1-0,23	< 0,23

Soient :

- Indice de Gourly : $\Omega = \frac{H_b}{w_s \cdot T}$
- L'indice de Similarity index : $\xi_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{L_0}{H_b}}}$

Avec:

L_0 : longueur d'onde au large (m) w_s : vitesse de chute de sédiment (m.s⁻¹) H_b : hauteur de la vague au déferlement
 T : période des vagues (s) $\tan \beta$: tangente de pente de la plage (°)

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats de l'analyse granulométrique des sédiments superficiels de l'avant cote des plages de

Kalâat Andalous et de Raoued sont illustrés dans le tableau II.

Tableau II : Résultats des indices granulométriques des sédiments sableux de l'avant plages de Kalâat Andalous et de Raoued (Hessiane), Golfe de Tunis (Juin 2014) prélevés dans la zone de swash (0 à -2 m de profondeur) et la zone de surf (de -2 à -5 m). Mode (μm); (Mz =échelle phi); Ecrat type (σ); l'indice d'Asymétrie (SK_I) et l'indice d'angulosité (K_G) selon Folk and Ward (1957)

Secteur	Echantillons	Mode (μm)	Plage de Kalâat Andalous				Plage de Raoued (Hessiane)			
			Mz	σ	SK_I	K_G	Mz	σ	SK_I	K_G
Ligne de côte (0 m)	k30	200	1,94	0,35	0,02	0,89				
	k31	200	1,99	0,32	0,10	1,31				
	k32	250	1,87	0,30	0,11	1,61				
	k33	200	2,12	0,31	0,04	1,22				
	k34	250	1,98	0,29	0,12	1,18				
	k35	250	2,00	0,32	-0,02	0,95				
	k36	200	2,08	0,28	0,13	0,85				
	k37	250	2,04	0,31	-0,11	1,18				
	k38	200	2,12	0,29	-0,20	1,17				
	S1	315					1,57	0,42	-0,18	1,22
	S2	400					1,27	0,43	0,05	1,18
	S3	315					1,43	0,40	0,04	1,06
	S4	125 ; 400					1,25	0,44	-0,17	1,07
	S5	315					1,41	0,36	-0,03	1,12
	S6	400					1,29	0,31	-0,08	1,17
	S7	315					1,34	0,35	0,05	0,97
	S8	315					1,02	0,34	0,03	1,76
	S9	315					1,36	0,35	0,10	1,28
	S10	400					1,18	0,32	-0,11	1,01
Zone de Swash (0 à -2 m)	k20	200	1,90	0,45	0,16	0,94				
	k21	160	2,61	0,56	-0,06	1,20				
	k22	200	2,17	0,32	0,16	1,55				
	k23	160	2,44	0,36	0,18	1,33				
	k24	200	2,15	0,46	0,10	1,19				
	k25	160	2,32	0,36	0,11	1,61				
	k26	200	2,40	0,20	-0,02	2,26				
	k27	160	2,31	0,27	-0,01	1,11				
	k28	160	2,29	0,32	0,16	1,27				
	k29	160	2,20	0,43	0,18	1,06				
	O1	63 ; 125 ; 500					1,94	0,83	-0,13	0,79
	O2	125 ; 315					2,02	0,83	0,17	0,84
	O3	125 ; 315					2,73	0,48	0,11	2,16
	O4	160					2,62	0,30	-0,07	1,75
	O5	160					2,37	0,37	0,12	1,00
	O6	160					2,42	0,37	0,08	1,64
	O7	125					2,61	0,39	0,21	1,67
	O8	160					2,57	0,35	0,08	1,22
	O9	125					2,84	0,47	-0,30	2,03
Zone de Surf (-2 m ; -3 m)	k10	160	2,44	0,52	0,12	1,11				
	k11	125	2,67	0,32	-0,07	1,41				
	k12	125	2,86	0,28	-0,12	1,19				
	k13	100	3,06	0,87	-0,39	4,02				
	k14	125	2,82	0,28	0,13	1,25				
	k15	125	2,78	0,27	0,05	1,38				
	k16	100 ; 160	2,67	0,34	-0,82	1,20				
	k17	125	3,18	0,49	-0,59	2,26				
	k18	125	3,01	0,30	-0,04	1,79				
Zone de Surf (-3 m ; -5 m)	k19	100	3,05	0,30	-0,19	1,41				
	K0	100	3,15	0,31	-0,25	1,14				
	K1	100	3,10	0,37	0,30	1,14				
	K2	100	3,25	0,35	-0,14	1,14				
	K3	125	3,07	0,30	-0,18	1,11				
	K4	100	3,10	0,37	-0,16	1,13				
	K5	100	3,15	0,39	-0,33	1,15				
	K6	125	3,07	0,30	-0,38	1,13				

	K7	125	2,87	0,45	0,01	1,22				
	K8	125	2,72	1,01	-0,28	1,21				
	K9	125	2,74	0,54	0,20	1,29				
	O10	125					2,97	0,32	-0,24	1,15
	O11	125					3,12	0,33	-0,05	1,11
	O12	125					3,13	0,48	-0,30	1,20
	O13	100					3,16	0,42	-0,37	1,23
	O14	100					3,21	0,41	-0,16	0,82
	O15	100					3,26	0,43	-0,19	1,20
	O16	100					3,21	0,41	-0,30	1,20
	O17	100					3,05	0,38	-0,06	1,15
	O18	100					3,29	0,44	-0,11	1,27
	O19	125					3,21	0,45	-0,03	1,15
	O20	125					3,04	0,42	-0,19	1,18

Caractérisation sédimentologique de l'avant plage de Kalâat Andalous

Les sédiments prélevés sont majoritairement unimodaux soient 97 % (Modes compris entre 100 μm et 250 μm). Ils sont essentiellement sableux (98%) et bien à très bien classés (σ variant de 0,2 à 0,56 Φ). Les sédiments prélevés sur la ligne de côte (berme) sont caractérisés par des sables moyens (1,94 < M_z < 2,12 Φ). Les sables deviennent du type fins à moyens (respectivement $M_z = 2,44$ et 3,15 Φ) dans la zone de swash entre les isobathes -0 m et -2 m. Les sables de la zone de surf sont du type fin à très fin (M_z variant de 2,44 à 3,25 Φ). L'indice d'asymétrie montrent que dans 33 % des cas, les sables sont asymétriques à très asymétriques vers les grossiers ($SK_1 = -0,11$ à $-0,82$) (i.e. = K5 ; K6 ; K12 ; K13 ; K16 ; K17) au niveau de la zone de surf (isobathe -3 à -5m). Tandis que 28 % des sédiments sont symétriques, et uniquement 3% de cas présentent une asymétrie vers la fraction fine. La distribution texturale des fractions est majoritairement leptokurtique dans presque 60 % des cas ($K_G \approx 1,41$) (Figure II A et Tableau II).

Caractérisation sédimentologique de l'avant plage de Raoued

Les sédiments sont du type sableux (100 %) et montrent une distribution unimodale à 90 % des cas (Modes compris entre 100 μm et 400 μm). On observe une bimodalité dans les échantillons prélevés à l'embouchure de la Medjerda (zone de swash) (Tableau II B).

L'avant côte de Raoued est caractérisée par des sables du type moyen au niveau de la berme ($M_z = 1,02$; 1,57 Φ), vers des sables fins dans la zone de swash ($M_z = 2,02$; 2,97 Φ) et des sables très fins dans la zone de surf (isobathe : -2,8 m) avec un indice M_z compris entre 3,12 et 3,29 Φ . Certaines anomalies sont observées vers les isobathes -1,5 m et -2 m où le sable est du type moyen avec M_z égal à 1,94 Φ (Figure IIB). L'indice de classement indique une distribution majoritairement très bien classée ($\sigma = 0,31$) avec des sédiments modérément classés à l'embouchure de l'oued Medjerda ($\sigma = 0,83$ Φ) (Tableau II).

L'indice d'asymétrie SK_1 montrent que dans 50% des cas la distribution est asymétrique vers des grossiers ($-0,1 < SK_1 < -0,3$) (au niveau de la berme et dans la zone de swash), à presque symétrique dans 27% des cas et asymétrique à très asymétrique vers les fins dans 23% des cas (zone de surf). La distribution texturale est majoritairement leptokurtique avec 44 % à très leptokurtique (27%), parfois mésokurtique (23%) et exceptionnellement platykurtique (7%) (Figure 2 B).

Morphologie sous marine de l'avant plage de Kalaât Andalous et de Raoued

L'étude bathymétrique révèle une morphologie sous marine relativement hétérogène. On remarque la présence de deux types de barres sédimentaires : une barre interne dans la zone de swash entre les isobathes -0,5 et -2 m, parfois doublée en face de l'embouchure de la Medjerda à -4 m de profondeur et une deuxième barre externe multiple vers les isobathes -3 à -4 m.

Système de barres d'avant côte

La barre interne, est située à des profondeurs comprises entre 0,5 et -1 m et culmine à -2 m, entre 50 et 80 m du rivage. Bien qu'elle soit remarquable sur les Modèles Numériques du Terrain en 3D, les hauteurs sont comprises entre 0,5 et 1 m au maximum *in situ*. La morphologie de cette barre est en croissant formant des alternances de petites cornes et des fosses sous-marines. Ces formes sédimentaires rythmiques (des crêtes et des creux) montrant une longueur d'onde de 200 m (Figure 3 A et B). La deuxième barre interne apparaît entre les isobathes -3,5 m et -4 m, éloignée de 400 m du rivage. Sa hauteur moyenne est de l'ordre de 0,5 m. La longueur d'onde est de l'ordre de 100 m.

La morphologie tridimensionnelle de la barre interne montre une forme festonnée, (*Rhythmic Bar and Beach = RBB*), orientée obliquement par rapport à la ligne de rivage avec une pente relativement forte (35°) sur le flanc externe de la barre. Ces entités sédimentaires sont orientées par rapport à la direction Sud-Est des vagues énergétiques (Figure 3 B).

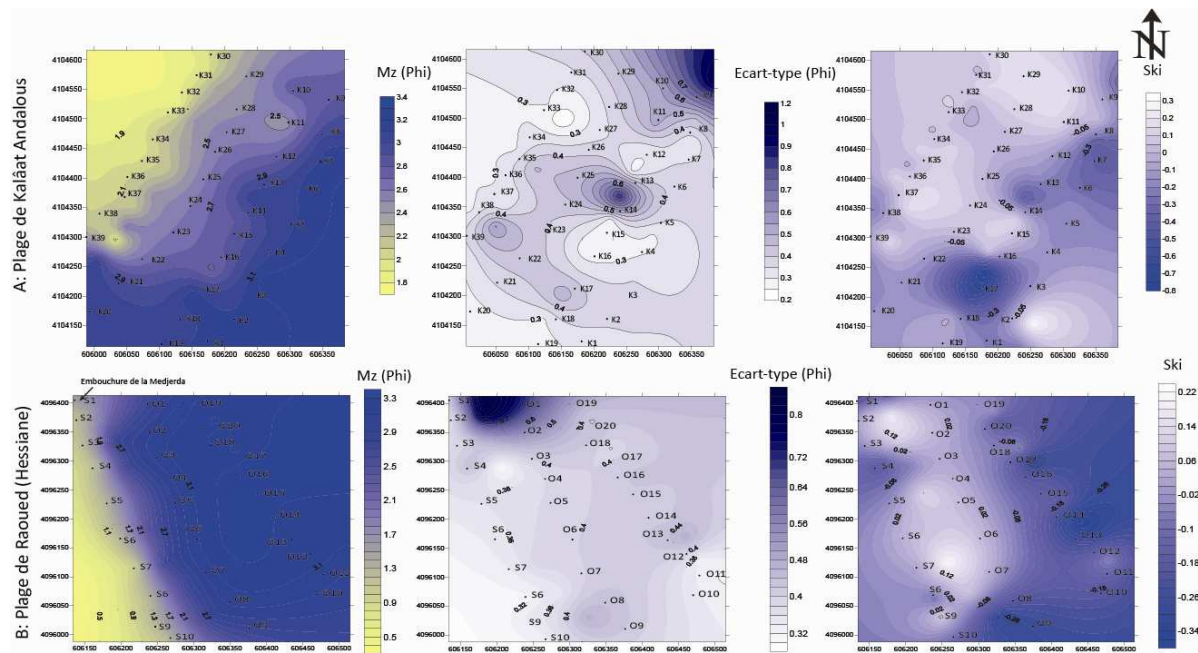


Figure 2: Cartes de répartition spatiale des indices granulométriques des sédiments de l'avant côte de la baie ouest du Golfe de Tunis, Juin 2014. A/Avant plage de Kalâat Andalous. B/Avant plage de Raoued ; Mz: la taille moyenne granulométrique en échelle Phi ; σ : Indice de classement ; SKI : skewness coefficient d'asymétrie, selon Folk and Ward (1957)

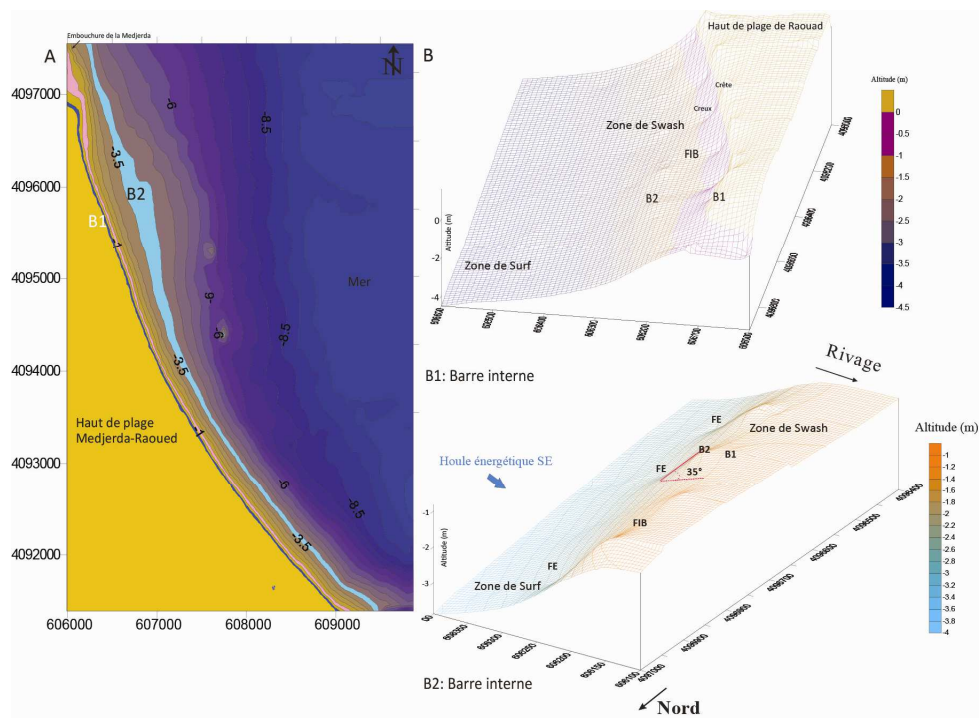


Figure 3 : A /Modèle Numérique de Terrain MNT en 2D du système des barres d'avant côte de la baie ouest du golfe de Tunis (plage de Raoued, Août, 2014) B/ MNT en 3D de la barre interne (-0,5 m ; -1 m ; -3 m) festonnée (*crescentic bars*). B1= Première barre interne ; B2=deuxième barre ; FE = fosse externe ; FIB= fosse inter-barres ; FI=fosse interne

La barre externe apparait plus vers le large à peu près à 1 km du rivage (vers les isobathes - 6 à -7 m). Elle se présente en morphologie non uniforme et multiple avec une hauteur de 1 m. La barre externe prend une

forme transversale rythmique (*Transverse Bar and Rip = TBB*). Sa longueur d'onde séparant les deux cornes successives est de l'ordre de 150 m (Figure 4)

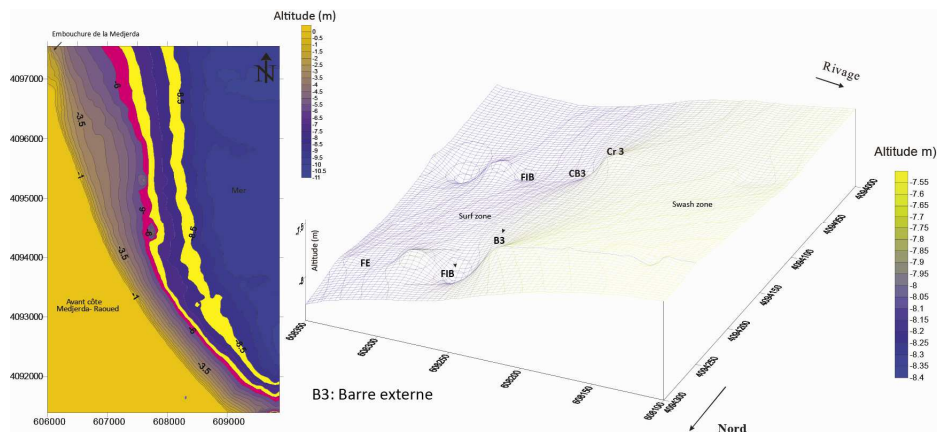


Figure 4 : A/MNT en 2D de la barre externe transversale rythmique (*Transverse Bar and Rip = TBB*) de l'avant plage de Raoued, Août, 2014. B/ MNT en 3D de la barre externe (-7 m ; -8 m). B3= barre externe. FIB= fosse inter-barres ; FE = fosse externe ; CB3= creux de la barre externe ; Cr 3= Crête de la barre externe

La morphologie tridimensionnelle des barres suggère une alternance de zone mobiles (crêtes/ creux) séparés par des fosses de lévigation. La morphologie dynamique de ces entités sédimentaires corrobore avec la distribution texturale spatiale de l'avant côte. En effet, l'anomalie granulométrique de la taille moyenne des grains associée à l'asymétrie vers les grossiers dans les zones de surf semblent être le résultat de la réponse morphologique des fonds (i.e barres de déferlement) aux agents hydrodynamiques. Le brassage granulométrique se manifeste surtout, dans les creux des barres et dans les fosses de lévigation (-1,5 m et -2 m). Les vagues énergétiques provenant du secteur Sud-Est sont incidentes aux

crêtes des barres avec un angle oblique. Le déferlement engendré par les vagues crée des courants sagittaux (de retour et/ou des courants d'arrachement) qui sont responsables du transport des sédiments vers le large. Ce qui explique par conséquent le mélange des types sédimentaires dans les fosses de lévigrations.

Classification morphodynamique des plages

Le calcul des indices de classement de Gourley Ω et d'Iribarren ξ_b montrent que la plage de Kalâat Andalous est dissipative. Cependant, la plage de Raoued est du type intermédiaire. (Tableau III).

Tableau III: Classification morphodynamique des plages microtidales de la baie ouest du golfe de Tunis (Kalâat Andalous et Raoued) selon Short and short (1964) ; ξ_b = *Surf similarity index* $\xi_b = \tan\beta (H_o/L_o)^{0.5}$ (Battjes, 1974); Ω = Indice de Gourley (Gourlay, 1964); $\Omega = H_b/TW_s$ (Wright and Short, 1984); H_b = Hauteur de déferlement des vagues ; T = période de la vague (s) ; W_s = vitesse de chute de sediment; H_o = Hauteur significative de la vague (m); L_o =longueur d'onde de la vague (m); β = pente de la plage ($^\circ$); $D50$ = taille moyenne des grains (mm).

Secteur	Stations	D50	$\beta(^{\circ})$	$\tan\beta$	Ω	ξ_b	Type des plages
Plage de Kalâat Andalous	K40	0,23	0,09	0,09	12,45	0,54	Dissipative
	K33	0,24	0,25	0,25	11,43	1,02	Dissipative
Plage de Raoued (Hessiane)	S1	0,35	0,22	0,22	5,37	0,33	Intermédiaire
	S2	0,375	0,11	0,11	4,68	0,66	Intermédiaire
	S3	0,44	0,14	0,14	3,40	0,84	Intermédiaire
	S4	0,38	0,08	0,08	4,56	0,48	Intermédiaire
	S5	0,415	0,11	0,11	3,82	0,66	Intermédiaire
	S6	0,39	0,12	0,12	4,33	0,72	Intermédiaire
	S7	0,49	0,09	0,09	2,74	0,54	Intermédiaire
	S8	0,38	0,1	0,10	4,56	0,60	Intermédiaire
	S9	0,45	0,08	0,08	3,25	0,48	Intermédiaire
	S10	0,331	0,15	0,15	6,01	0,90	Dissipative

CONCLUSION

La présente étude a permis une caractérisation morphodynamique des avant plages de Kalâat

Andalous et de Raoued respectivement du type dissipatives à intermédiaires. Ces plages sont tapissées par deux barres de déferlement : 1- Une barre interne parfois dédoublée dans la zone de swash

et 2- Une barre externe dans la zone de surf. Ces barres sableuses prennent des formes rythmiques en croissant et festonnées avec une succession de crêtes et de creux principalement orientées en fonction de l'angle d'incidence des vagues. La réponse morphodynamique à l'action de la houle estivale de tempête (Sud-Est) se manifeste par le festonnage des barres internes et la périodicité de la barre externe. La réponse sédimentaire se manifeste par des anomalies granulométriques (bimodalité et enrichissement en fraction grossières) dans les fosses de lévigation sous l'influence des agents hydrodynamiques énergétiques notamment les courants sagittaux (de retour et d'arrachement).

Remerciements

Cette étude a été élaborée dans le cadre du programme institutionnel de l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer, Laboratoire du Milieu Marin (LR11INSTM04).

BIBLIOGRAPHIE

- Amrouni O., 2008. - Morphodynamique d'une plage sableuse microtidale à barres : côte nord de Mahdia (Tunisie orientale). *Thèse de doctorat*, Univ, Tunis II, 297 p.
- Amrouni O., Hermassi T., Adbdeljaouad S. et Messaoudi S., 2014. - Contribution of grain-size trend to sediment of a microtidal beach .Case of the Gulf of Tunis bay (Cape Ferina – Cape Gammarth, Tunisia). *Resarch Journal of Environmental Sciences* .Vol 8, Number 4, 161-177.
- Amrouni O., Medina R. et Abdeljaouad S., 2018. - Morphodynamique d'une plage microtidale à barres subtidales en condition de tempête : cas de l'avant plage de Mahdia. *Bul. de l'Inst. Sci., Rabat*, Section Sciences de la Terre, n° 40, 01-19.
- Battjes J.A., 1974. - Surf similarity, Proceedings of 14th Coastal Engineering Conference, Copenhagen, Denmark, American Society of Civil Engineers, New York, pp.466-480.
- Bardi I., 2010. - Morphodynamique de la côte sableuse microtidale à barres le long de la frange littorale «Gabès – Oued Ferd » (Golfe de Gabès -Tunisie). *Thèse de doctorat* de Géologie. Fac. Sci. Tunis, p 202.
- Barusseau J.P. et Saint-Guily B., 1981. - Disposition, caractères et mode de formation des barres d'avant-côte festonnées du littoral Languedoc-Roussillon (France). *Oceanologica Acta*, 4, 3, 297-304.
- Battjes J. A., 1974. - Surf similarity. *Proceedings of the 14th International Conference of Coastal Engineering*, 466-480.
- Ben Charrada R. et Moussa M., 2009. - Modélisation de l'hydrodynamique et de la qualité des eaux côtières du golfe de Tunis, *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime*, Hammamet, Tunisie. pp 167-170.
- Brahim M., Koutitonsky V., Béjaoui B. et Sammari C., 2007. - Simulation numérique du transport des sables sous l'effet des vents dans le golfe de Tunis. *Bull. Inst. Natn. Scien. Tech. Mer de Salammbô* 34: 157-165.
- Brahim M., Atoui A., Sammari C. et Aleya L., 2015. - Surface sediment dynamics along with hydrodynamics along the shores of Tunis Gulf (north-eastern Mediterranean), *Journal of African Earth Sciences* 103: 30-41.
- Castelle B., 2004. - Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire au-dessus des barres sableuses soumises à l'action de la houle : application à la côte aquitaine. *Thèse de doctorat*, Université Bordeaux 1, 295 p.
- Castelle B. et Bonneton P., 2004. - Modeling of tidal modulation and magnitude of wave- induced currents over the intertidal transverse bar systems on the French aquianian coast. *Proceeding of the 9th International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay*, Pau.
- Certain R., 2002. - Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres : le golfe du Lion (Languedoc-Roussillon). *Thèse de doctorat*, Univ de Perpignan, 209 p.
- El Arrim A., 1996. - Étude d'impact de la dynamique sédimentaire sur la stabilité du littoral du Golfe de Tunis . *Thèse de doctorat* de Géologie, Université de Tunis El Manar, 208 p
- Folk R.L. et Ward W.C., 1957. - Brazos river bar: a study in the signification of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 1, 3-26.
- Gourlay M.R., 1968. - Beach and Dune Erosion Tests. Tech. Rep. m935/m936. Delft Hydraulics Lab.
- Gourlay M. R., 1985. - Beaches: states, sediments and set-up. Preprints *7th Australasian Conf. on Coastal and Ocean Eng.*, Christchurch, New Zealand, 1985, Vol. 1, pp. 347-356.
- Greenwood B. et Robin G. D. Davidson-Arnott., 1979. - Sedimentation and equilibrium in wave-formed bars: a review and case study. *Revue canadienne des sciences de la Terre* 16(2): 312-332.
- Hzami A., Amrouni O., Romanescu G., Stoleriu C.C., Pintilie A. et Abdeljaouad S., 2018. - Satellite images survey for the identification of the coastal sedimentary system changes and associated vulnerability along the western bay of the Gulf of Tunis (northern Africa). *Proc. IAHS*, 377, 83-89. Error! Hyperlink reference not valid.
- INM, 2012 : Institut National de Météorologie, Tunis.
- Iribarren C. R. et Nogales C., 1949. - Protection des

- ports. *Proceedings of the 17th International naval Congress*, 31-80.
- Jauzein A., 1971. - Les agents de la morphogenèse - Les eaux courantes. *Trav. Lab. Géol. E.N.S.*, 5, 177 p.
- Kouki A., 1984. - Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans le petit golfe de Tunis. Thèse de doctorat. de 3^{ème} cycle. Spécialité Géol Sédim. Marine, 168 pp.
- LCHF., 1982. - Protections des plages sud de Tunis. 1 ère partie : diagnostique sédimentologique. Minist. Equip. Dire. Serv. Aériens et maritimes.
- Louati M., Saidi H. et Zargouni F., 2014. - Shoreline change assessment using remote sensing and GIS techniques: a case study of the Medjerda delta coast, Tunisia, *Arab J Geosci*, Vol. 8, N. 6, p 4239.
- Masselink G. et Short A.D., 1993. - The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model Gerhard. *Journal of Coastal Research*, Volume 9, Number 4, p 785-800.
- Oueslati A., 1994. - Les côtes de la Tunisie, recherches sur leur évolution au Quaternaire. Publication de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 402 pp.
- Paskoff R., 1983. - Geomorphology and Hydrology of the Gulf of Tunis from LANDSAT 2 Imagery», Coastal problems in the Mediterranean sea, *E.C.S. Bird et P. Fabbri*, Éd. pp. 121-127.
- Paskoff R. et Troussat P., 1992. - L'ancienne baie d'Utique: Du témoignage des textes à celui des images satellitaires. *Mappe monde*, 1/92, pp. 30-34.
- Paskoff R., 1994. - Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution, Paris, Masson, coll. *Géographie*, 254 p.
- Pimienta J., 1959. - Le cycle pliocène-actuel dans les bassins paraliques de Tunis. Univ of Paris, France.
- Rodier J. A., Colombani J, Claude J et. Kallel R. 1981. - Le bassin de la Mejerda. Monogr. hydrol. ORSTOM, 451 p.
- Ruessink B.G., Van Enckevort I.M.G., Kingston K.S. et Davidson M.A., 2000. - Analysis of observed two and three-dimensional nearshore bar behaviour. *Marine Geology*, 169, 161-183.
- Sabatier F., 2001. - Fonctionnement et dynamiques Morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhone. Thèse de doctorat en Geosciences de l'Environnement, option Géographie physique. Université d'Aix- Marseille III. 272p.
- Saidi H., 2004. - Caractérisation granulométrique et minéralogique des sédiments de surface de la frange littorale Sidi Bou Said- la Goulette. *Bull. Inst. Natn. Scien. Tech. Mer de Salammbô*, 31, p 97-106.
- Saidi H., 2013. - Etude sédimentologique et morphodynamique des côtes sableuses du golfe de Tunis (Tunisie nord-orientale). Thèse de doctorat. Fac. des Sci. de Tunis, 217 p.
- Short A.D. Hesp P.A., 1982. - Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia, *Marine Geology*, Vol. 48, Issues 3-4, p 259-284.
- Short A.D., 1999. - Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. Wiley. 379 p. ISBN 0-471-965707.
- SOGREAH., 1974. - Etude de l'engraissement des plages du Nord de Tunis. Rapport Minist. Equip. Tunisie, T. 3, 105p.
- Van Rijn L. C., 1998. - Principles of coastal morphology. 4. Sand coasts. *Aqua Publication*, Amsterdam. 539 p.
- Wright L., Guza R. et Short A., 1982. - Dynamics of a high energy dissipative zone. *Mar. Geol.*, 45, 41-62.
- Wright L., Nielsen P., Short A. et Green M.O., 1982. -Morphodynamics of a macrotidal beach, *Mar. Geol.*, vol, 50, p 97-128.
- Wright L. et Short A. D., 1984. - Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.*, 56: 93-118.
- Yahyaoui Z. et Rebaï N., 2014. - Étude de l'évolution morphosédimentaire à court et moyen terme du système dune/plage de Korba (façade orientale du Cap Bon, Tunisie). *Revue internationale de géomatique* – num. 4- p 471- 500.