DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DE LA FLECHE SABLEUSE DE KALAAT ANDALOUS (DELTA DE LA MEDJERDA, MEDITERRANEE)

Abderraouf HZAMI^{1*}, O. AMROUNI², F. SABATIER³ et S. ABDELJAOUED¹

¹Laboratoire de Ressources Minérales et Environnement, Université de Tunis El Manar, Tunis 2092, Département de Géologie. Tunisie.

²Laboratoire du Milieu Marin, Institut National des Sciences et Technologies de la Mer, Université de Carthage 2025. Tunisie.

³Université d'Aix–Marseille, CNRS, IRD, Coll de France, CEREGE, 13545 Aix en Provence, France * abderraouf.hzami@fst.utm.tn

ملخص

متابعة التطور المورفوديناميكي للحاجز الرملي بقلعة الأندلس: تندرج هذه الدراسة ضمن برنامج البحث MOSBIOCLIM في فترات (LROZINSTMO4)، وتتمثل في متابعة التطور المورفوديناميكي للحاجز الرملي بقلعة الأندلس (الخليج الغربي لخليج تونس، تونس) في فترات زمنية متعددة. وتمكن متابعة التطور الزمني للشريط الساحلي للمدة المتراوحة بين سنة 1882 و2016 من فهم الديناميكية الرسوبية السريعة التي ساهمت في نشأة وتطور البحيرة الساحلية. إن انخفاض تدفقات رواسب نهر مجردة في مصبه القديم (فم الواد) بسبب تغيير مجراه الطبيعي باتجاه الجنوب، اضافة الى إنشاء السدود في تجمعات المياه يفسر الإنجراف الحاد للشاطئ بمعدل 15.95- 71.0± م/ سنة وإنشاء حاجز رملي بإعادة التوزيع الجانبي للرواسب من جراء التيارات الساحلية. وتم في إطار هذا البحث دراسة قصيرة المدى لأعماق التضاريس الرسوبية سنة 2019. تبين النتائج وجود مسطحين رمليين مائيين في شكل هلالي ومواجه لاتجاه امواج البحر العاصفة، وهو دليل على تعديل ومحاولة تأقلم هذه الحواجز الرملية نتيجة لنقص الرواسب.

الكلمات المفاتيح: مورفوديناميكة، شريط ساحلي، الحواجز الرسوبية، DSAS، التعرية، البحر الأبيض المتوسط.

RESUME

Dans le cadre du programme de recherche institutionnel MOSBIOCLIM du LR02INSTM04, une étude multi approches a été entreprise pour suivre l'évolution morphodynamique multi-temporelle de la flèche sableuse de Kalâat Andalous (baie ouest du golfe de Tunis, Tunisie). L'analyse des variations du rivage entre les dates 1882 et 2016 permet de décrire sa genèse rapide dont l'allongement et le déplacement ont contribué à la création d'une lagune côtière. La diminution des apports fluviaux de l'embouchure historique de la Medjerda (Foum El oued) du fait de son avulsion vers le sud et la mise en place de barrages sur le bassin versant expliquent le recul très sévère du rivage EPR (*End Point Rate*) de -15,95 m±0.17 /an et de la construction de la flèche par redistribution latérale des sédiments charriés par la dérive littorale. A ces observations à long terme nous ajoutons une description morphologique inédite de la bathymétrie des petits fonds réalisée en 2019. La morphologie festonnée des corps sableux suggère un impact quasi frontal des houles lors des tempêtes marines ce qui contribuerait aussi à son ajustement dû au déficit sédimentaire.

Mots clefs: Morphodynamique, trait de côte, barres sédimentaires, DSAS, flèche sableuse, érosion, Méditerranée.

ABSTRACT

Sediment dynamic of the sandy spit of Kalâat Andalous (Delta of Medjerda, Mediterranean): As a part of the MOSBIOCLIM institutional research program of the LR02INSTM04, a multi-approaches study has been undertaken to monitor the multi-temporal morphodynamic evolution of the coastal sandy spit of Kalâat Andalous (western bay of the Gulf of Tunis, Tunisia). The methodology is based on the monitoring the spatial evolution of the shoreline position from 1882 to 2016 in order to describe the rapid sandy barrier creation and the migration of the coastal lagoon sandy barriers. The reduction of the Medjerda River yields due to the displacement of the historic natural course (Foum El Oued) southward and the built up of dams on the watershed plain explain the alarming retreat of the shoreline with an average rate of EPR (End Point Rate) of -15.95 m ±0.17 /yr and the creation of the sandy spit by spatial redistribution of sediment under the coastal drift current. The long-term spatial observation was completed by the nearshore bathymetric surveys of the sandy spit in 2019. The crescentic inner sandbar morphology is a response to the wave-dominated swells during marine storms which would also contribute to its reduced sediment balance.

Keywords: Morphodynamic, coastline, sedimentary bars, DSAS, sandy spit, erosion, Mediterranean.

INTRODUCTION

sableux et sont Les rivages deltaïques particulièrement sensibles à l'érosion côtière, y compris pour les grands deltas méditerranéens (Frihy et al., 1988; Jimenez et al., 1997; Sabatier et al., 2009; Vespremeanu-Stroe et al., 2017). Encore récemment, Besset et al., (2017) et Benmoussa et al., (2019) soulignent le déficit sédimentaire chronique de ces environnements en relation avec les travaux d'aménagement des bassins versants (barrages). Dans le détail, lorsque la charge sédimentaire fluviale devient insuffisante, les embouchures reculent ce qui induit une redistribution latérale des sédiments via les dérives littorales dominantes et induit quelques fois la formation d'une flèche sableuse. En Méditerranée, ce mécanisme s'observe particulièrement embouchures du Danube (flèche Sakalin), du Rhône (flèche de la Gracieuse), du Po (flèche du Goro) et de la Medjerda (flèche de Kalâat Andalous). Si ces flèches sont bien connues, leur rythme d'évolution, leur genèse et leur rôle dans la morphologie générale de leur delta respectif demande encore à être précisés. Ce travail, centré sur le système flèche-lagune de Kalâat Andalous à proximité de l'ancienne embouchure de la Medjerda (baie de Tunis, Tunisie), apporte des éléments de réponses sur ce thème et complète les travaux antérieurs (Louati et al., 2014; Hzami et al., 2018; Benmoussa et al., 2019). De plus, la connaissance morphodynamique du littoral est devenue cruciale ici puisque la lagune est équipée d'une digue portuaire pour répondre à des activités de pêche.

Site d'étude

Le secteur d'étude, constitué par la flèche sableuse de Kalâat Andalous longue aujourd'hui de 5 km et qui isole la lagune du même nom, se situe au centre de la baie ouest du Golfe de Tunis à 12 km environ au Sud du Cap Ferina et à 11 km au Nord de la plage de Raoued (Fig.1). Avec une longueur de 460 km, un bassin versant de 23.700 km² et un débit moyen de 30 m³/s environ, la Medierda constitue le cours d'eau le plus important de la Tunisie et débouche aujourd'hui en Méditerranée par le canal Henchir Tobias. Au moins depuis le XIXème siècle, et jusqu'au creusement du canal de Henchir Tobias en 1939, l'unique embouchure (Foum El Oued) se localisait plus au nord. Entre 1939 et 1973, la Medjerda connaissait donc deux embouchures ce qui a contribué à diminuer les apports sédimentaires au Foum El Oued et explique l'érosion de ce dernier (Paskoff, 1985). Lors des crues de Mars 1973, la Medjerda a subi un changement total de lit vers son nouvel exutoire (canal de Henchir Tobias). A partir de cette date les apports en sédiments à l'ancienne embouchure de Foum El Oued deviennent nuls (Kotti et al., 2018). La flèche n'étant plus alimentée, elle cesse de s'engraisser et s'amincit en s'allongeant (Oueslati, 2004). A ces changements d'embouchures s'ajoutent barrages Lakhmes (1966), Kasseb (1968), Bouhertma (1976), Siliana (1987), Sidi Salem (1981) et R'Mil (1999), le plus grand du pays, qui permettent de limiter les crues mais qui bloquent aussi la charge sédimentaire de la Medjerda vers la mer.

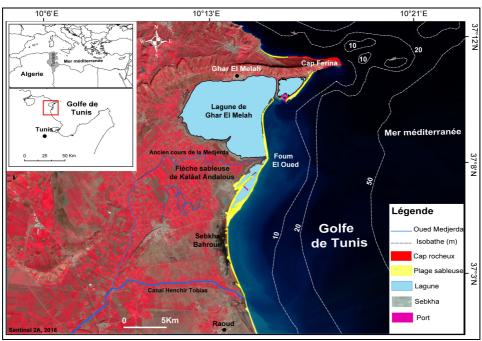


Figure 1 : Localisation de la flèche-Lagune de Kalâat Andalous (Golfe de Tunis, Mer Méditerranée)

La marée du Golfe du Tunis est du type semi diurne et microtidale avec une amplitude de marnage variant de 0,12 m (eau morte) à 0,24 m (eau vive) (Brahim et al., 2015). En relation avec le régime des vents, les houles les plus actives sont issues du cadran Nord à Nord Est alors que celles du cadran Est à Sud sont saisonnières, moins actives mais plus intenses. Cette organisation du climat de houle et la bathymétrie du site induisent des dérives résultantes dirigées vers le Sud-Ouest depuis Foum El Oued et vers le Nord-Ouest depuis l'embouchure actuelle (Fig.2). Par conséquent, ces dérives convergent dans la partie distale de la flèche, là où elle se raccorde à la plaine deltaïque (Amrouni et al., 2014; Amrouni et al., 2019a). L'action de la houle Sud Est saisonnière devient de plus en plus dominante à cause de l'augmentation de la fréquence des tempêtes estivales. Cette hypothèse a été validée en 2007 sur les plages de Mahdia (Golfe de Hammamet) en 2007, sur les plages de la baie ouest du golfe de Tunis en 2014 (Amrouni et al., 2007; 2014). La partie sud de la flèche a été comblée en 2010 via cette dérive Sud Est /Nord Ouest alimentée par les nouveaux apports de la Medjerda charriés du sud vers le nord.

MATERIEL ET METHODES

Analyse diachronique de l'évolution du trait de côte

Les variations du rivage sont étudiées à partir cartes topographiques (1936, 1950 et 1974), des cartes bathymétriques (1882), des photographies aériennes (1974 et 2000), et des images satellitaires Spot 1 (1988), Spot 4 (1999) et Sentinel 2A (2016). L'analyse de l'évolution de la ligne de côte est réalisée au moyen DSAS (Digital Shoreline Analysis System) couramment utilisé aujourd'hui dans les études d'évolution du rivage (Thieler et al., 2009; Amrouni et al, 2019b). Les résultats statistiques exploitées sont l'EPR (End Point Rate) sont exprimés en m/an. Cet indice est calculé selon la méthode des points extrêmes qui utilise la position la plus ancienne et la plus récente de chaque ligne de référence (Hzami et al., 2021; Dolan et al., 1991). Le NSM (Net Shoreline Movment) correspond à la distance de mouvement entre le trait de côte le plus ancien et le trait de côte le plus récent. L'erreur de l'interprétation des variations du rivage est calculée par l'équation RMS (Root Mean Square) selon Van der Wal et Pye (2003). Afin d'homogénéiser les comparaisons, nous utilisons une moyenne de marge d'erreur de +/- 0,17 m/an.

Mesures topo-bathymétriques

Un levé topo-bathymétrique de l'avant côte de la flèche sableuse a été réalisé en août 2019 entre les niveaux +1.3 m et -6 m environ au moyen d'un DGPS différentiel *Trimble* série 4000, et un

échosondeur bilatéral à une fréquence de 208 kHz (la marge d'erreur verticale est estimée à ±0,5 m environ). Les données, restituées en WGS 84 (World Geodetic System 1984) avec une projection UTM (Transverse Universelle de Mercator), sont analysées sous le logiciel Surfer® (profils et Modèles Numériques de Terrain–MNT).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Evolution du trait de côte de la flèche sableuse de Kalâat Andalous

Evolution naturelle de l'embouchure (1882-1936)

La période 1882–1936 est marquée par une progradation moyenne de l'ancienne embouchure de l'oued Medjerda de +155 ±24,8 m, soit +2,27 ±0,18 m/an environ traduisant l'importance des apports de l'oued Medjerda pour construire son delta (Fig. 2 et Tableau 1). On remarque toutefois que la morphonologie de l'embouchure passe d'une forme en proue en 1882 à une forme plus évasée en 1936 sur laquelle on distingue un allongement nord sud suggérant le rôle de houles à redistribuer les sédiments de la Medjerda. Il est possible que dès la fin de cette période, les apports sédimentaires du fleuve au littoral aient déjà commencé à diminuer.

Genèse de la flèche puis de la lagune (1950-2016)

Le rivage de 1950 montre que la forme d'éventail sédimentaire de l'embouchure observé précédemment a disparu et qu'une flèche sableuse longue de 2,4 km prend naissance vers le sud (Fig. 2). Ensuite, les traits de côte révèlent une évolution rapide de la flèche (Fig. 2) qui recule à des vitesses variant de 20 à 30 m/an au cours de la période de 1950-1974-1988 (Tableau 1) et s'allonge en direction du SSO à des vitesses de migration de 54 m/an à 35 m/an respectivement. La diminution des apports alluviaux au niveau de l'ancienne embouchure, causée par le canal d'Henchi Tobias en 1939 et la crue exceptionnelle de 1973, a permis aux vagues d'éroder et transporter les sédiments pour former la flèche sous l'effet de la dérive littorale de direction N/S (Paskoff, 1978). Depuis 1999, le déplacement de la flèche a isolé une lagune. Entre 1950 et 1999, les surfaces de la flèche varient peu (entre 0,52 et 0,64 km²) témoignant ainsi d'un enroulement sédimentaire de la flèche sur elle-même malgré des vitesses de reculs parmi les plus élevées du monde.

Cependant, en 2016, la superficie de la flèche augmente significativement (0,90 km²) en relation avec l'élargissement de la partie distale qui s'est raccordée au continent ce qui contribue à son élargissement (Fig.2).

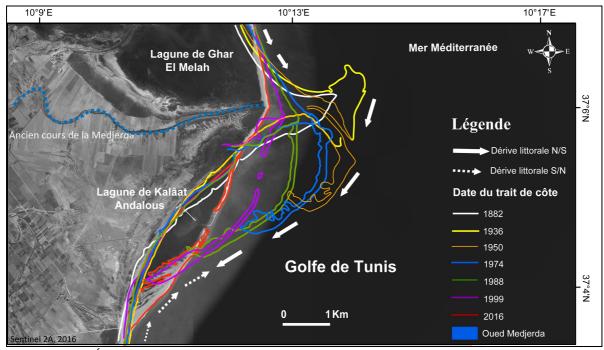


Figure 2 : Évolution spatio-temporelle de la flèche sableuse de Kalâat Andalous entre 1882 et 2016.

Si les surfaces restent donc globalement identiques durant les phases de reculs intenses, des passes se forment aussi, probablement en relation avec de fortes tempêtes frontales de direction Est et obliques de direction SE. L'image Sentinel de 2016 montre une que la flèche s'est divisée en deux cordons parallèles qui migrent vers le sud avec une direction Nord-Est Sud-Ouest (Fig. 2).

Néanmoins, la période de 1999 et 2016 est marquée par une chute considérable de la vitesse de migration de la flèche à 11m/an associée à un recul très sévère du trait de côte de -15.95 m/an (Fig.2 et Tableau 1). La déviation du cours principal de la Medjerda associée aux ouvrages hydrauliques en amont de son bassin versant ont complètement réduit les apports sédimentaires qui alimentent la plage.

Tableau I : L'analyse de l'évolution du trait de côte de la flèche sableuse de Kalâat Andalous. Le Net Shoreline Movement (NSM) et le End–Point Rate (EPR) pendant la période 1882–2016.

Site	Date	Max EPR (m/an)	Min EPR (m/an)	Moyenne EPR (m/an)	Max NSM (m)	Min NSM (m)	Moyenne NSM (m)
Flèche sableuse de Kalâat Andalous	1882–2016	-11.57	2.55	-4.31 (± 0.18)	-1550.86	342.02	-578.6 (±24.8)
	1882–1936	-9.77	15.32	2.87 (± 0.27)	-527.59	827.27	154.78 (± 14.6)
	1936–1974	-41.37	3.83	-11.61 (± 0.22)	-1571.88	145.50	-441.24 (± 6)
	1936–1950	-39.38	-15.35	-20.32 (± 0.22)	-551.32	-214.9	-284.48 (± 3.08)
	1950–1974	-40.2	-12.08	-20.86 (± 0.20)	964.8	289.92	-500.64 (± 4.8)
	1974–1988	-58.18	4.55	-24.56 (± 0.18)	-814.57	63.72	-343.84 (± 2.8)
	1988–1999	-88.33	0.34	-32.64 (± 0.20)	-971.64	3.74	-359.04 (± 2)
	1999–2016	-26.21	-4.52	-15.95 (± 0.17)	-445.58	-76.91	-271.15 (± 3.06)

Morphologie sous-marine de l'avant plage de Kalâat Andalous

En partant du rivage, on distingue une barre interne, BI, à des profondeurs comprises entre 0.5 et -1,25 m,

localisée entre 50 et 100 m du rivage. Cette barre présente une morphologie rectiligne vers le nord de la flèche qui se transforme en barre festonnée vers le centre et le sud (Fig. 3).

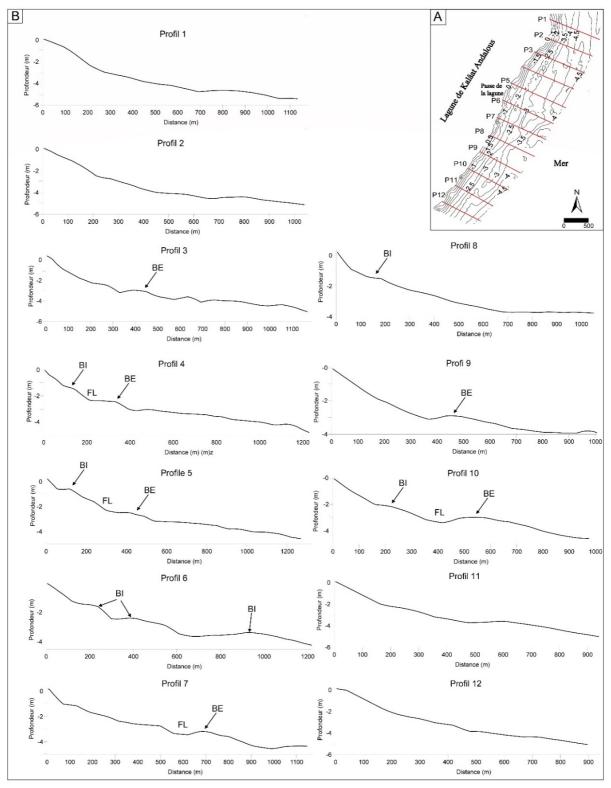


Figure 3: A/ Localisation des profils. B /Modèle Numérique de Terrain (MNT) en 2D du système des barres d'avant côte de Kalâat Andalous, Août, 2019, Golfe de Tunis. BI : barre interne ; BE : barre externe et FL: Fosse de lévigation.

La barre interne ne dépasse pas une hauteur de 1,2 m et une largeur de l'ordre de 60 m. Plus loin vers le large, à une distance de 200 m depuis le rivage, au niveau de la zone de déferlement, apparait une barre externe, BE, vers -3 et -4 m de profondeur (Fig. 3). Elle se caractérise par une morphologie parallèle au rivage aux deux extrémités de la flèche et une forme transversale au centre de la zone. La morphologie des barres suggère une alternance de zones mobiles séparées par des fosses de lévigation FL (Fosse d'inter-barre) (Fig.3). En relation avec morphologie des barres, la pente moyenne de l'avant côte est plus douce dans la partie centrale (2%) que dans les secteurs Nord (5%) et Sud (7%) de la flèche sableuse.

Dans le sens de la dérive littorale dominante, le passage de la morphologie de la barre d'une forme rectiligne à festonnée indique une évolution du couplage morphodynamique entre l'hydrodynamique, la morphologie et la granulométrie. Dans les fosses on observe brassage granulométrique des sédiments (Amrouni et al, 2019a) ce qui suggère des courants puissants et/ou antagonistes. A ce stade, nos données, malgré leurs caractères inédits, ne permettent d'établir de conclusions définitives. Nous faisons l'hypothèse de houles plutôt obliques au rivage dans la partie nord et moins incidentes à partir de la passe et vers le sud, favorisant la morphologie des barres longitudinales puis festonnées. Néanmoins les festons se confondent avec la localisation de la passe et peuvent aussi s'expliquer par la présence d'un (modeste) delta de jusant qui perturbe l'hydrodynamique et la dérive littorale dirigée ici vers le sud. Les apports sédimentaires charriés via la dérive littorale du Nord vers le Sud sont constitués par un mélange de stock hérités de l'ancien prodelta de la Medjerda, et par les apports éoliens (Amrouni et 2018). A ce stade donc, l'explication morphodynamique balance entre l'influence de l'hydrodynamique et celle du bilan sédimentaire mais il est probable que ces deux paramètres agissent rétroactivement. Enfin, les apports de la Medjerda sont très réduits depuis la défluviation en 1973 et les apports sableux sont donc sans doute très faibles (comme en atteste le recul de l'embouchure), aussi ils ne semblent pas (plus) déterminant dans la morphologie de l'avant côte de la flèche, témoigne d'une évolution morphologique du prisme sédimentaire en disette sous l'effet des conditions de tempête.

CONCLUSION

Les variations du rivage depuis 1882 renseignent sur l'importance de la redistribution sédimentaire par les courants de houle d'une embouchure en déficit sédimentaire. L'allure en proue formée lors d'apports massifs par le fleuve est démantelée par la houle pour

former une flèche qui s'allonge et recule jusqu'à s'accrocher à la plaine deltaïque et isoler une lagune. Notre étude documente la formation des lagunes en Méditerranée et suggère une formation légèrement plus rapide (70 ans) que pour les flèches similaires des deltas du Rhône, Danube et Pô. Il est possible que les faibles profondeurs de cette partie du littoral de la Medjerda expliquent la vitesse de déplacement de la flèche. La morphologie de l'avant côte de la flèche Kalâat Andalous révèle dans la partie centrale des barres festonnées qui suggèrent un impact quasi frontal des houles lors des tempêtes. Enfin, notre étude confirme la vulnérabilité de ce système flèchelagune et participera probablement à sa gestion sédimentaire par les aménageurs et les décideurs.

BIBLIOGRAPHIE

Amrouni O, Souissi R, Barusseau J.P, Abdeljaouad S, Pauc H, and Certain R: Grain-size and morphodynamical state of the bay-of-Mahdia shoreface (Tunisia). Contribution to the assessment of Coastal sensitivity. Journal of GeoEcoMarina, n°13. pp 5-19. 2007.

Amrouni, O., Hermassi, T., Abdeljaouad, S., Messaoudi, S.: Contribution of Grain-size Trend to Sediment of a Microtidal Beach. Case of the Gulf of Tunis Bay (Cape Ferina-Cape Gammarth, Tunisia). Research Journal of Environmental Sciences, 8, 161–177, doi: 10.3923/rjes.2014.161.177, 2014.

Amrouni, O., Medina, R., et Abdeljaouad, S.: 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, 2018.

Amrouni, O., Sánchez, A., Khélifi, N., Benmoussa, T., Chiarella, D., Mahé, G., Abdeljaouad, S., McLaren, P.: Sensitivity assessment of the deltaic coast of Medjerda based on fine-grained sediment dynamics, Gulf of Tunis, Western Mediterranean. J CoastConserv, 23, 1-17, https://doi.org/10.1007/s11852-019-00687-x, 2019a.

Amrouni, O., Hzami, A., Heggy, E.: Photogrammetric assessment of shoreline retreat in North Africa: anthropogenic and **ISPRS** Journal natural drivers. ofPhotogrammetry and Remote Sensing 157C. 73-92. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.001, 2019b.

Benmoussa, T., Amrouni, O., Hzami, A., Dezileau, L., Mahe, G., Condomines, M., Saadi, A.: Progradation and retrogradation of the Medjerda delta during the 20th century (Tunisia, Western Mediterranean). Comptes

- Rendus Geosciences. https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.10.004, 2019.
- Brahim, M., Atoui, A., Sammari, C., & Aleya, L. Surface sediment dynamics along with hydrodynamics along the shores of Tunis Gulf (north-eastern Mediterranean). Journal of African Earth Sciences 103: 30-. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.11.014, 2015.
- Dolan, R., Fenster, M.S., Holme, S.J.: Temporal analysis of shoreline recession and accretion. J. Coast. Res. 7(3):723–44, 1991.
- Frihy, O. E.: Nile Delta shoreline changes: aerial photographic study of a 28-year period. Journal of CoastalResearch, 597-606, 1988.
- Hzami, A., Amrouni, O., Romanescu, G., Stoleriu, C.C., Pintilie, A., & Abdeljaouad, S. 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. https://doi.org/10.5194/piahs-377-83-2018, 2018.
- Hzami, A., Heggy, E., Amrouni, O. et al. Alarming coastal vulnerability of the deltaic and sandy beaches of North Africa. Sci Rep 11, 2320. https://doi.org/10.1038/s41598-020-77926-x, 20221.
- Jimenez, J.A.; Sanchez-Arcilla, A.; Bou, J.; Ortiz,
 M.A. Analysing short-term shoreline changes along the Ebro delta using aerial photographs.
 Journal of Coastal Research, 13(4), 1256-1266, 1997.
- Kotti, F., Dezileau, L., Mahé, G., Habaieb, H., Bentkaya, M., Dieulin, C., and Amrouni, O.: Etude de l'impact des barrages sur la réduction des transports sédimentaires jusqu' à la mer par approche paléohydrologique dans la basse vallée de la Medjerda, Proc. IAHS, 377, 67–76, https://doi.org/10.5194/piahs-377-67-2018, 2018.

- Louati, M., Saidi, H., Zargouni, F.: 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. https://doi.org/10.1007/s12517-014-1472-1, 2014.
- Oueslati, A.: Littoral et aménagement en Tunisie, Orbis, Tunis, 534 p, 2004.
- Paskoff, R.: Evolution de l'embouchure de la Medjerda (Tunisie) Revue Photo-interprétation, n°5, pp. 1-6, 1978.
- Paskoff, R.: Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution ; Editions Armand Colin, Paris, 260 p, 1985.
- Sabatier, F., Maillet, G., Provansal, M., Fleury T. J., Suanez, S., & Vella, C. Sediment budget of the Rhône delta shoreface since the middle of the 19th century. Marine Geology 234, 143-157, 2006.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ayhan, E.: Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.3. An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. https://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/DSAS/, 2009.
- Van der Wal, D., and K. Pye.: The use of historical bathymetric charts in a GIS to assess morphological change in estuaries. The Geographical Journal 169: 21–31, 2003.
- Vespremeanu-Stroe, A., Zainescu, F., Preoteasa, L., et al.: Holocene evolution of the Danube delta: An integral reconstruction and a revised chronology. Marine Geology 388:38–6, 2017.