

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE DU LITTORAL DU DELTA DE MEDJERDA PAR IMAGERIE LANDSAT ET SIG

Mourad LOUATI *, Fouad ZARGOUNI *

* Laboratoire de géomatique et de géologie structurale et appliquée, Département de géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, Campus universitaire, 2092 Tunis, Tunisie ; mlouati2012@gmail.com,

Résumé : Cet article cherche à estimer les taux et tendances d'évolution du trait de côte de la bande littorale du Delta de Medjerda (Golfe de Tunis, Nord-Est de la Tunisie) et à préciser les principaux facteurs responsables de cette évolution. La méthode utilisée s'appuie sur le traitement numérique d'images satellitaires Landsat et les outils de mesure fournis par Arc-GIS. Sur la période d'étude, entre 1972 et 2003, l'analyse à base de transects de l'évolution de la ligne de rivage instantanée montre une nette variabilité spatiale. Sauf la plage au nord-est du port Ghar El Melh et autour de la présente embouchure de Medjerda ayant manifesté une tendance à l'accumulation, et la majeure partie de la plage de Raoued ayant été stable, le littoral étudié a affiché une tendance érosive plus ou moins importante. Les facteurs anthropiques responsables de cette érosion sont l'implantation du port de Ghar El Melh et des épis, la construction des barrages sur Medjerda et ses tributaires, l'extraction de sable et la dégradation de petites dunes par le piétinement fréquent. Le changement du lit de Medjerda lors des crues de 1973, et l'élévation du niveau marin accélérée par une subsidence naturelle forte caractérisant la plaine de Medjerda sont les principaux facteurs naturels aggravant les effets humains.

1. Introduction

Au cours des dernières décennies, l'occupation du littoral par les sociétés humaines devient de plus en plus dense. L'espace littoral tunisien n'échappe pas à cette situation. Il regroupe en effet sur près du quart du territoire les quatre cinquièmes de la population urbaine et le tiers de la population rurale de la Tunisie, dont la population totale est estimée à 10,5 millions (Institut National de la Statistique, 2009). Il représente aussi le principal foyer de l'activité économique, assure l'essentiel de la production agricole, industrielle, constitue l'espace touristique et balnéaire et assure les échanges extérieurs (Belhédi, 1996). La plaine du delta de Medjerda est l'une des vastes plaines côtières du pays. Elle est bien connue par sa richesse agricole, archéologique et environnementale. Dans un tel contexte, la connaissance des taux et tendances d'évolution du trait de côte apparaît comme l'un des préalables utiles à son aménagement.

2. Présentation du secteur d'étude

Le littoral sableux du Delta de Medjerda (Fig. 1), objet de cette recherche, fait partie du Golfe de Tunis. Ce littoral, très bas et long d'environ 40 km, s'étend entre Cap Farina et Cap Gammarth. Les plages sableuses qui en constituent sont plus ou moins larges et constituées de sédiment généralement fine ($D_{50} \sim 200 \mu\text{m}$) sur l'estran, et fine à très fine ($D_{50} \sim 100 \mu\text{m}$) sur l'avant-côte (El Arrim, 1996). Le Golfe de Tunis est soumis à un marnage microtidal, avec un marnage moyen de vive-eau de 30 cm (LCHF, 1982). Des enregistrements marégraphiques au port de La Goulette (Pirazzoli, 1986) et des observations issues des satellites altimétriques Topex/Poséidon (Lombard, 2005) estiment une vitesse d'élévation du niveau marin d'environ 1,5 mm/an en Tunisie durant le dernier siècle. Au large du Golfe, des données issues d'observations faites au cours de missions en mer (LCHF, 1965) et l'analyse théorique de la propagation des houles dans le Golfe montrent que les vagues de direction NNE à NE sont les plus fréquentes. Leur hauteur et leur période, acquises à partir de *KNMI/ERA-40 Atlas* (<http://www.knmi.nl/waveatlas>), relatives à la période 1971-2000 sont de 1,25 m et 4,5 s, respectivement. La houle et la dérive littorale qu'elle induit sont les principaux agents hydrodynamiques de l'évolution des plages du Golfe (El Arrim, 1996). Des calculs du transit sédimentaire à l'aide de la formule empirique du LCHF donnent des taux de l'ordre de 40.000 m³/an (Oueslati *et al.*, 2006). De 1954 à 1987, huit barrages ont été construits sur Medjerda et ses tributaires (Zahar *et al.*, 2008). Avant le début de construction de ces ouvrages hydrauliques, la charge solide en suspension atteignant la mer Méditerranée était de l'ordre de 17 Mt (Pimienta, 1959), alors qu'elle est actuellement de 5 Mt (Ben Mammou, 1998). Les travaux d'ingénierie

côtiers les plus importants sont la construction des deux ports de Ghar El Melh (en 1974) et de Kalaat Landalous (en 1999), et l'implantation en 1993 de deux épis au nord-est du premier port (Oueslati, 2004).

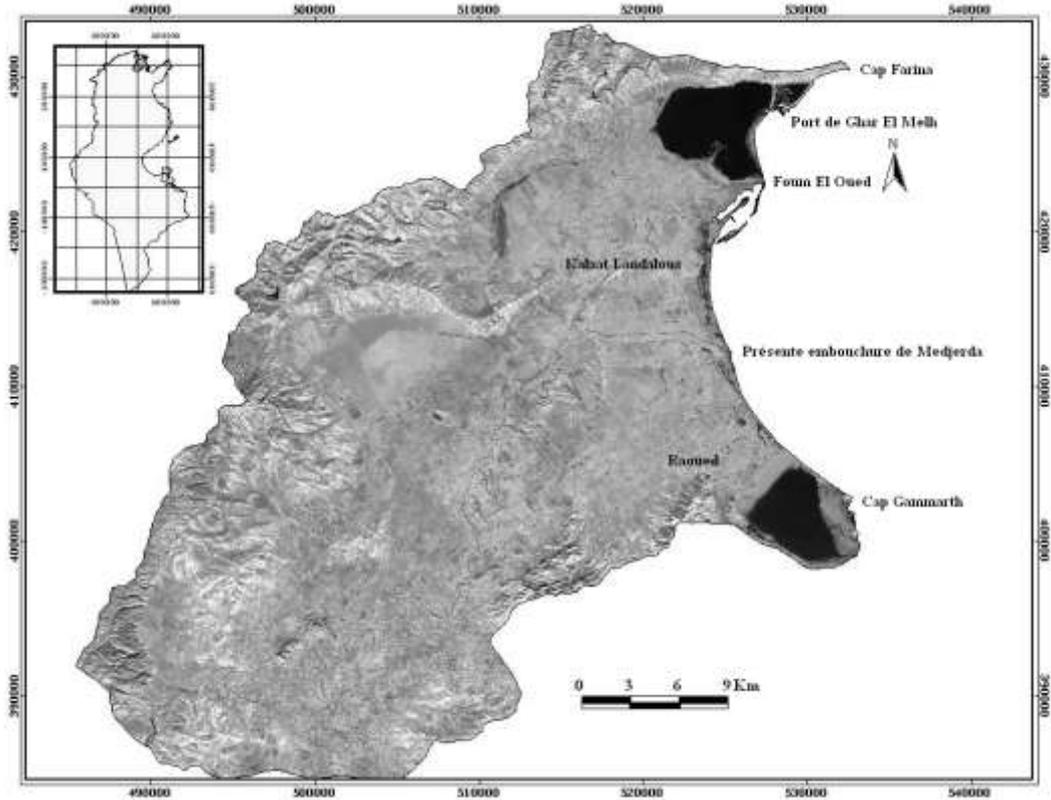


Fig. 1 : Localisation du secteur d'étude

3. Matériels et méthode

3.1. Matériels

Six scènes Landsat datant de 1972 à 2003 sont utilisées pour l'analyse locale de l'évolution du trait de côte des plages sableuses du delta de Medjerda (Tab. 1). Elles sont disponibles et téléchargeables gratuitement via les sites de l'*USGS Global Visualization Viewer* (<http://www.glovis.usgs.org>) et l'*USGS Earth Explorer* (<http://www.earthexplorer.usgs.org>). Les outils appropriés du système IDRISI selva sont utilisés pour préparer et traiter les scènes Landsat, alors que l'extension *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS 3.1) d'Arc-GIS 9.3 est exploitée pour effectuer les mesures d'évolution du trait de côte.

Tab. 1 : Caractéristiques des scènes Landsat utilisées

Satellite	Capteur	Date d'acquisition	Résolution spatiale
Landsat 1	MSS	11/08/1972	60 x 60 m
Landsat 5	TM	28/06/1985	30 x 30 m
Landsat 5	TM	05/08/1987	30 x 30 m
Landsat 7	ETM+	14/08/1999	30 x 30 m
Landsat 7	ETM+	31/05/2001	30 x 30 m
Landsat 5	TM	17/08/2003	30 x 30 m

3.2. Méthode

Le ratio de bandes est la principale technique à utiliser dans cette recherche. Pour cette raison, les images Landsat doivent présenter des caractéristiques les plus homogènes possibles de sorte que les ratios calculés puissent être associées à de réels états de la surface terrestre, et non à des artefacts liés aux conditions de prise de vues des images. Idéalement, les images doivent provenir du même capteur, claires, sans bruit, et la date d'acquisition doit varier le moins possible. En raison de diverses considérations, ces conditions idéales ne sont généralement pas toutes satisfaites. Afin de réduire le maximum possible l'influence de ces artefacts, les images doivent subir une correction géométrique et surtout radiométrique. En effet, les facteurs comme l'angle d'élévation du soleil, la géométrie de visée, les conditions atmosphériques et la calibration des capteurs affectent la valeur numérique des pixels (Lillesand et Kiefer 2000 ; Mather et Koch, 2011). Si ces conditions ne sont pas remplies, l'analyste peut interpréter comme des différences de ratios, ce qui est lié à des sites différents ou non liées aux réflectances des objets sur la surface terrestre (Song *et al.*, 2001 ; Mather et Koch, 2011).

3.2.1. Prétraitement d'images

Dans l'ordre des corrections, la radiométrie précède la géométrie afin de minimiser les effets d'altération au niveau des valeurs radiométriques générés par l'interpolation pendant la correction géométrique. En premier lieu, IDRISI Selva dispose de l'outil *ATMOSC* (*ATMOSpheric Correction*) qui permet d'atténuer l'effet atmosphérique en fournissant le modèle de soustraction d'objet foncé (Chavez, 1996), de compenser les différences des conditions de prise de vues, et de calibrer les capteurs. Les paramètres additionnels nécessaires (angles d'élévation solaire et de visée, *Offset/Gain...*) sont fournis par les métadonnées accompagnant l'acquisition des scènes Landsat. En ce qui concerne les effets topographiques, il est connu que, d'une part, ces effets sont minimisés dans le cas des secteurs à faible relief (Teillet *et al.*, 1982 ; Lillesand *et al.*, 2000 ; Mather et Koch, 2011). Or, telle est la situation du secteur d'étude, où les altitudes sont faibles. D'autre part, les ratios présentent une sensibilité réduite à la variabilité des conditions topographiques (Dewidar, 2000 ; Singh, 2010). En second lieu, la correction géométrique a commencé par l'image Landsat 5-TM du 5 août 1987 qui a été géoréférencée avec le datum Carthage et la projection UTM (32) en se basant sur les cartes topographiques (au 1/25.000) des années 1980. Ensuite, cette image maîtresse fut utilisée comme référence pour géoréférencer les scènes Landsat restantes. Lors de chaque géoréférencement, on a identifié plus de 40 points amers et utilisé une transformation polynomiale du premier ordre et un ré-échantillonnage du type le plus proche voisin, préservant mieux les valeurs originales des pixels. L'erreur RMS est comprise entre 0,31 et 0,43 pixels.

3.2.2. Extraction de la ligne de référence

Plusieurs méthodes semi-automatiques et automatiques sont actuellement utilisées pour extraire des lignes de référence à partir de l'imagerie satellitaire optique. Le seuillage de l'histogramme (Braud et Feng, 1998 ; Li et Damen, 2010), les classifications supervisées et non supervisées (Frazier et Page, 2000 ; Ekercin, 2007), et les ratios de bandes (Guariglia *et al.*, 2006 ; Restrepo, 2012) sont parmi les techniques les plus connues, et qui sont appliquées en particulier sur les images Landsat multi-spectrales. Dans cette recherche, les ratios, exploitant notamment les bandes infrarouges, est la méthode utilisée pour extraire la ligne de rivage instantanée à partir des images Landsat couvrant la période entre 1972 et 2003. En effet, les longueurs d'ondes dans le proche infrarouge et l'infrarouge moyen sont fortement absorbées par l'eau et fortement réfléchies par la végétation et le sol (Kelly *et al.*, 1998 ; Alesheikk, 2007). Pour accomplir une telle extraction, on a suivi trois étapes. Premièrement, dans le cas des images Landsat TM et ETM+, le célèbre ratio B5/B2 est utilisé (Guariglia *et al.*, 2006 ; Cui et Li, 2011). Cependant, dans la situation de l'unique image Landsat MSS, après l'examen de certains ratios, le ratio B4/(B2-B1) (Guariglia *et al.*, 2006) donnant la meilleure discrimination de l'interface terre/mer, est retenu. Deuxièmement, les ratios (Fig. 2) sont recodés ; les pixels ayant des valeurs inférieures à 1 sont recodés 1 (pixels d'eau), sinon 0 (pixels terrestres) (Fig. 3). Troisièmement, une vectorisation est appliquée sur ces images binaires et des données vectorielles sont ainsi obtenues. Les objets linéaires correspondants aux traits de côte sont retenus, et les autres objets « non désirés » sont éliminés. Ces linéaires côtiers ont des tracés qui rappellent des zigzags, et offrent par conséquent une représentation non réelle de leur nature géométrique. Enfin, afin de réduire ce type d'apparence sans affecter la taille de chacune de ces linéaires, un filtre passe-bas permettant le lissage d'objets linéaires est utilisé.

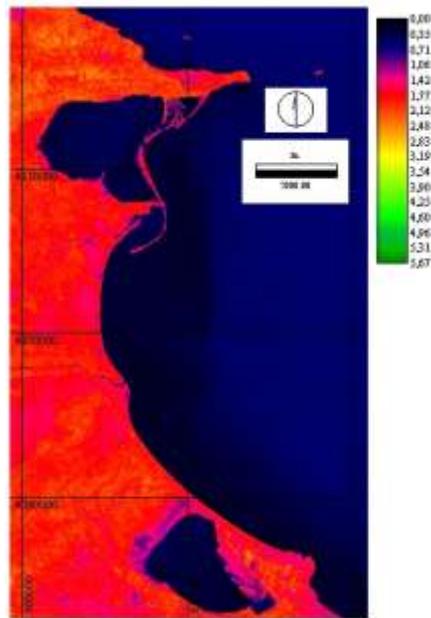


Fig. 2 : Exemple d'un Ratio B5/B2, scène Landsat 5-TM prise le 5 août 1987

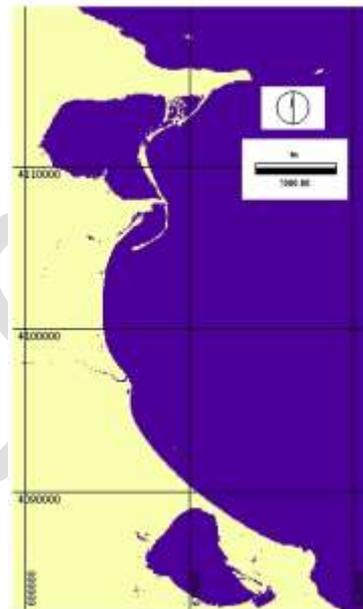


Fig. 3 : Exemple de binarisation du ratio B5/B2, scène Landsat 5-TM prise le 5 août 1987

3.2.3. Mesures d'évolution du trait de côte

Les taux d'évolution du trait de côte mesurés à partir de documents satellitaires comportent toujours une certaine part d'incertitude qu'il est nécessaire d'évaluer pour juger du degré de représentativité des résultats. Dans cette recherche, les erreurs peuvent provenir du calcul des modèles polynomiaux par le logiciel et des oscillations à court terme dans la position de la ligne de rivage. D'abord, le fait que les images Landsat sélectionnées étaient prises pendant la période estivale et dans des conditions de mer calme néglige l'erreur liée aux changements saisonniers dans la position de la ligne de rivage instantanée et/ou liés à des conditions climatiques. Ensuite, tenant compte d'un écart potentiel horizontal entre deux lignes de rivage instantanée acquises par des hauteurs d'eau différentes d'environ ± 6 m dans le Golfe de Tunis (Louati et Zargouni, 2013), et des résolutions spatiales des images Landsat allant de 30 x 30 m à 60

x 60 m, il est possible, comme l'indique Guariglia *et al.* (2006) par exemple, d'analyser l'évolution de la ligne de rivage instantanée à partir des images Landsat, sans l'interférence de la marée astronomique. Enfin du compte, l'erreur semble provenir seulement du géo-référencement dont l'erreur RMS n'ayant pas dépassé 0,5 pixel. Elle est ainsi de ± 45 m sur la période d'étude (1972-2003), soit $\pm 1,4$ m/an. En ce qui concerne les mesures proprement dit, la régression linéaire simple est la méthode utilisée. Cette méthode, d'usage très répandu dans la littérature, est considérée statistiquement comme la meilleure méthode pour estimer les tendances d'évolution à long terme du trait de côte (Maiti et Bhattacharya, 2009).

4. Résultats et discussion

L'analyse de l'évolution de la ligne de rivage de la côte sableuse du Delta de Medjerda durant la période entre 1972 à 2003, à partir des images Landsat, a permis de révéler une nette variabilité spatiale (Fig. 4). En plus de la flèche de Foug El Oued ayant connu la migration la plus rapide vers le continent ($-41,5 \pm 1,4$ m/an), les segments ayant aussi affiché des reculs significatifs du rivage sont situés au sud du port de Ghar El Melh ($-3,5 \pm 1,4$ m/an), au nord de l'ancienne embouchure de Medjerda ($-10,6 \pm 1,4$ m/an), au nord et au sud de la route de Kalaat Landalous ($-3,8 \pm 1,4$ m/an), et immédiatement au nord et au sud de la présente embouchure de Medjerda (respectivement $-2,1$ et $-12,2 \pm 1,4$ m/an). Les principaux facteurs anthropiques responsables de ce recul côtier sont l'implantation du port de Ghar El Melh et des structures associées (jetées, épis) dérégulant le transit littoral N-S, la construction des barrages sur Medjerda et ses tributaires diminuant drastiquement la quantité de sédiments arrivant à la mer, l'extraction de sable et la dégradation de petites dunes par le piétinement fréquent. Le changement du lit de l'oued Medjerda lors des crues de 1973, et l'élévation du niveau marin accélérée par une subsidence naturelle forte caractérisant la plaine du Delta de Medjerda sont les principaux facteurs naturels aggravant ces impacts humains. Les sites qui ont manifesté une tendance accumulative sont localisés au nord-est du port de Ghar El Melh ($3,4 \pm 1,4$ m/an), le cordon séparant la lagune de Ghar El Melh de la mer ($7,2 \pm 1,4$ m/an), au sud du port de Kalaat Landalous ($2,6 \pm 1,4$ m/an), entre la présente embouchure de Medjerda et la route de Kalaat Landalous, et au sud de cette embouchure ($5,2 \pm 1,4$ m/an). La majeure partie de la plage de Raoued a été en situation de stabilité.

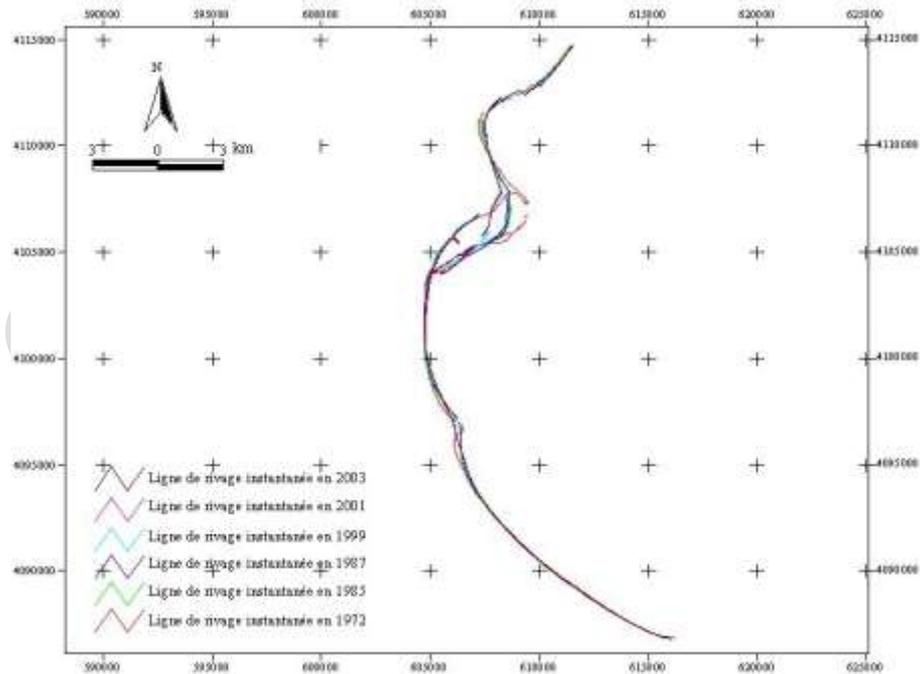


Fig. 4 : Positions multi-dates de la ligne de rivage instantanée

5. Conclusion

L'analyse de l'évolution de la ligne de rivage instantanée du littoral du delta de Medjerda a été examinée à partir des images Landsat multi-sources et multi-spectrales. Cette ligne de référence a été extraite après

de sérieuses corrections radiométrique et géométrique et l'application d'adéquates techniques de traitement d'images (ratios, reclassification, vectorisation et lissage). Cette analyse a révélé une nette variabilité spatiale de l'évolution de la ligne de rivage instantanée. La majeure partie du littoral d'étude a manifesté une tendance à l'érosion. Les facteurs responsables de cette érosion sont à la fois anthropiques et naturels. La comparaison de certains taux d'érosion ou d'accumulation calculés avec quelques mesures sur le terrain donne de bonnes corrélations. Ainsi, l'imagerie Landsat, les techniques de traitement d'images appliquées et les SIG semblent être des outils adaptés et efficaces pour l'analyse sur de longues périodes et de larges zones de l'évolution du trait de côte.

Références bibliographiques

- Alesheikh A.A., Ghorbanali A., Nouri N. (2007)** – Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Sciences and Technology* 4 (1), 61-66.
- Belhédi A. (1996)** – Littoralisation et mondialisation : l'état des lieux et les enjeux. *Revue Tunisienne de Géographie*, 30, 9-52.
- Ben Mammou A. (1998)** – Barrages Nebeur, Sidi Salem, Sidi Saad et Sidi Boubaker. Quantification, étude sédimentologique et géotechniques des sédiments piégés. Apports des images satellitaires. Thèse de doctorat en Sciences Géologiques, Faculté des Sciences de Tunis, 345 p.
- Braud DH, Feng W. (1998)** – *Semi-automated construction of the Louisiana coastline digital land/water boundary using Landsat Thematic Mapper satellite imagery*. Louisiana Applied Oil Spill Research and Development Program, OSRAPD Technical Report Series 97-002. Department of Geography and Anthropology, Louisiana State University.
- Chavez P.S. Jr. (1996)** – Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62, 1025-1036.
- Cui B.L., Li X.Y. (2011)** – Coastline change of the Yellow River estuary and its response to the sediment and runoff (1976–2005). *Geomorphology* 127, 32-40.
- Dewidar K. (2000)** – Landfilling detection of Hurghada, North Red Sea, Egypt, by using Thematic Mapper. *International Journal of Remote Sensing* 23, 939-948.
- Ekercin S. (2007)** – Coastline change assessment at the Aegean Sea Coasts in Turkey using multitemporal Landsat imagery. *Journal of Coastal Research* 23(3), 691-698.
- El Arrim A. (1996)** – *Étude de l'impact de la dynamique sédimentaire et des aménagements sur la stabilité du littoral du Golfe de Tunis*. Thèse de doctorat de Géologie, université de Tunis El Manar, 208 p.
- Frazier PS, Page KL. (2000)** – Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66, 1467-1467.
- Guariglia A., Buonamassa A., Losurdo A., Saladino R., Trivigno M.L., Zaccagnino A., Colangelo A. (2006)** – A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes. *Annals of Geophysics* 49 (1), 295-304.
- Institut National de la Statistique (2009)** – Recensement général de la Tunisie (en arabe).
- Kelley G.W., Hobgood J.S., Bedford K.W., Schwab, D.J. (1998)** – Generation of three dimensional lake model forecasts for Lake Erie. *Weather Forecast* 13, 305-315.
- LCHF (1965)** – *Plage de la Goulette*. 2 tomes + cartes et diagrammes.
- LCHF (1982)** – *Protection des plages sud de Tunis*. 2^{ème} partie, 37 p.
- Li X., Damen M. (2010)** – Coastline change detection with satellite remote sensing for environmental management of the Pearl River Estuary, China. *Journal of marine Systems* 82, 55-61.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W. (2000)** – *Remote sensing and image interpretation*. 4th ed., Wiley, New York, 724 p.
- Lombard A. (2005)** – *Les variations actuelles du niveau de la mer : observations et causes*. Thèse de doctorat d'océanographie Spatiale, université de Toulouse 3, 154 p.
- Louati M., Zargouni F. (2013)** – Le littoral entre l'actuelle embouchure de l'oued Miliane et Soliman. Analyse de l'évolution du trait de côte par photo-interprétation et système d'information géographique. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2 (à paraître).
- Maiti S., Bhattacharya A.K. (2009)** – Shoreline change analysis and its application to prediction: A statistical based approach. *Marine Geology* 257, 11-23.
- Mather P., Koch M. (2011)** – *Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction*. 4th Ed., Wiley-Blackwell, London, 462 p.
- Oueslati A. (2004)** – *Littoral et aménagement en Tunisie*. Orbis, Tunis, 534 p.
- Ouesalti A., Charfi F., Baccar F. (2006)** – *Presentation of the Tunisian site : la basse vallée de Oued Medjerda et la lagune de Ghar El Melh*. Water Demand Integration (WADI project), Fifth International Meeting INCO-CT-2005-015226, 6-9 December, 26 p.
- Pimienta J. (1959)** – *Le cycle Pliocène-Actuel dans les bassins paraliques de Tunis*. Mémoire Société Géologique, France, 85, 176 p.
- Pirazzoli P.A. (1986)** – Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tide-gauge records. *Journal of Coastal Research* 1, 1-26.
- Restrepo J.D. (2012)** – Assessing the effect of sea-level change and human activities on a major delta on the Pacific coast of northern South America: The Patía River. *Geomorphology* 151-152, 207-223.
- Singh A. (2010)** – Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 10(6), 989-1003.
- Song C., Woodcock C.E., Seto K.C. (2001)** – Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects. *Remote Sensing of Environment* 75, 230-244.
- Teillet P.M., Guindon B., Goodenough D.G. (1982)** – On the slope-aspect correction of multispectral data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 8, 84-106.
- Zahar Y., Ghorbel A., Albergel J. (2008)** – Impacts of large dams on downstream flow conditions of rivers: Aggradation and reduction of the Medjerda channel capacity downstream of the Sidi Salem dam (Tunisia). *Journal of Hydrology* 351, 318-330.