



Apport de la télédétection dans l'étude de l'évolution morphodynamique du complexe lagunaire de Nador (Maroc) au cours des 40 dernières années

Abdelkarim LOUAYA ¹, Naima HAMOUMI ²

1. Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, Faculté des Sciences Dhar El Mehrez, Fès, Maroc.
abdelkarim159@yahoo.fr
2. Mohammed V University in Rabat, Structure de recherche : Océanologie - Dynamique des Séries Sédimentaires – Environnement (ODYSSEE), Maroc.
naimahamoumi@yahoo.fr

Résumé:

Le complexe lagunaire de Nador est situé dans le littoral méditerranéen oriental à l'extrémité nord de la plaine de Bou Areg, entre la ville de Beni Ensar et le village de Kariat Arekman. C'est un environnement paralytique qui appartient au bassin néogène subsident de Nador-Mélilla qui s'est individualisé au Miocène supérieur. Cet écosystème, en perpétuel changement, présente un intérêt particulier dans la région, aussi bien sur le plan scientifique (classé Site d'Intérêt Biologique et Ecologique "SIBE") que sur le plan socio-économique. Cependant, il a été soumis à de fortes pressions anthropiques, en l'occurrence des travaux d'aménagements.

L'étude géomorphologique et morphodynamique de ce complexe lagunaire au cours de la période 1975-2015 a été réalisée grâce à l'exploitation des images satellitaires et aux observations de terrain. L'approche utilisée pour l'exploitation des données satellitaires est basée sur la photo-interprétation et la détection des changements à partir des images satellites multi-temporelles (Landsat MSS, 1975 & 1976 ; Landsat TM, 1988 & 2010 ; Landsat ETM+, 2000 ; Landsat 8, 2015), qui couvrent donc les 40 ans passés.

En plus de l'actualisation des connaissances sur la géomorphologie, les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence un changement continu du trait de côte provoqué et/ou accéléré par les aménagements effectués au niveau surtout de l'île barrière, y compris ceux qui ont été réalisés récemment dans le cadre du projet Marchica. Les phénomènes d'érosion provoqués en particulier au niveau de l'île barrière, pourraient conduire à sa disparition, si des mesures ne sont pas prises d'urgence.

Mots-clés: Télédétection, Morphodynamique, Impact des aménagements, Lagune de Nador, Maroc.

1. Introduction

Le complexe lagunaire de Nador est situé dans le littoral méditerranéen oriental à l'extrémité nord de la plaine de Bou Areg, entre la ville de Beni Ensar au Nord-Ouest et le village de Kariat Arekman au Sud-Est (figure 1). Il présente un intérêt particulier dans la région, aussi bien sur le plan scientifique que socio-économique, il est classé SIBE.

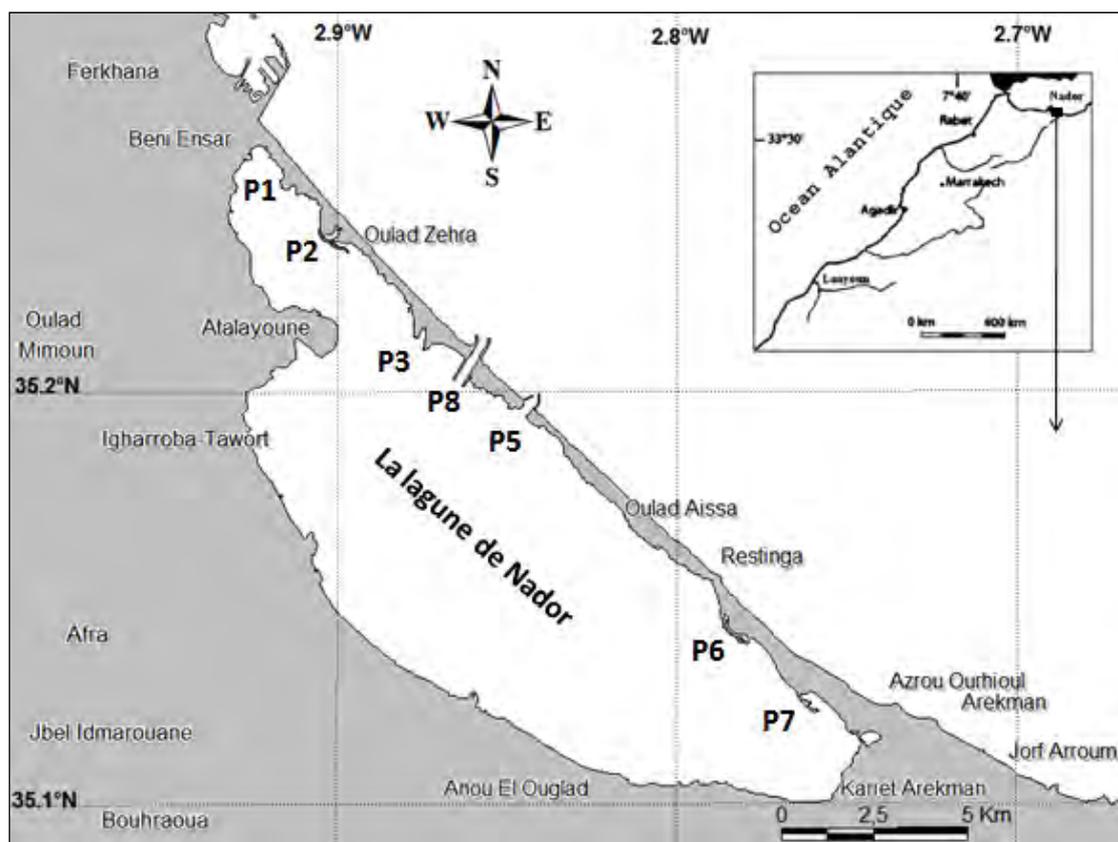


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude et numéros des passes.

Il a fait l'objet de nombreux travaux qui ont intéressé pour la plupart la lagune et, dans de rares cas, également son île barrière (MAHJOUBI, 1991 ; INANI, 1995 ; IRZI *et al.*, 1997 ; HAMOUMI & IRZI, 1999 ; IRZI, 2002 ; RAHOUTI, 2004, HILMI, 2005 ; HAMOUMI, 2011). Les travaux menés dans le cadre du projet européen COLASU- N° ICA3-CT-2002-10012 (LOUAYA & HAMOUMI, 2006 ; LOUAYA & HAMOUMI, 2010 ; LOUAYA, 2013), ont montré que la genèse et l'évolution de ce complexe lagunaire et de son arrière pays sont contrôlées à la fois par la tectonique et le climat. Par ailleurs, l'étude morphodynamique pour la période 1975-2005, a révélé un déséquilibre sédimentaire significatif, matérialisé par une accélération d'accrétion sédimentaire au niveau de quelques parties de l'île barrière conduisant notamment à la fermeture de l'ancienne passe N°3, et par une érosion excessive dans d'autres parties

provoquant l'ouverture de la passe N° 5 (LOUAYA & HAMOUMI, 2006). Il était donc intéressant d'effectuer un suivi afin d'actualiser les connaissances sur la géomorphologie et d'appréhender l'incidence des aménagements récents lancés en 2009 dans le cadre du projet Marchica Med, en particulier (i) ouverture d'une passe artificielle avec un chenal de 300 m de large et 6 m de profondeur et deux digues de calibrages de 1450 et 1350 m et (ii) fermeture et transformation de l'ancienne passe en un port de plaisance.

2. Méthodologie

L'étude géomorphologique et morphodynamique du complexe lagunaire de Nador a été réalisée en intégrant les observations de terrain, et l'analyse des images satellites multidates. Les observations du terrain consistent, d'une part, à la localisation, la description et la cartographie des différentes composantes morphologiques du complexe lagunaire de Nador, notamment les côtes à falaises et les côtes à plage qu'on ne peut pas déceler facilement par les images satellite Landsat, d'autres part à l'étude de la nature et de la composition des dépôts sédimentaires qui permettent d'évaluer l'hydrodynamique le long des rivages lagunaire et marin (LOUAYA, 2013). Les différentes images satellite utilisées (Landsat MSS, 1975 & 1976 ; Landsat TM, 1988 & 2010 ; Landsat ETM+, 2000 ; Landsat 8, 2015). Les caractéristiques de ces images sont illustrées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des images satellite utilisées.

| <i>Satellite</i> | <i>Capteur</i> | <i>Résolution spatiale</i> | <i>Nombre de Canaux</i> | <i>Bande spectrale utilisée</i> | <i>La longueur d'onde en (μm)</i> | <i>Année d'acquisition</i> |
|------------------|----------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------------|---|----------------------------|
| <i>Landsat 2</i> | <i>MSS</i> | <i>*60m</i> | <i>4</i> | <i>Bande 4 (PIR)</i> | <i>0,8 - 1,1</i> | <i>22-01-1976</i> |
| <i>Landsat 4</i> | <i>TM</i> | <i>30 × 30 m</i> | <i>7</i> | <i>Bande 4 (PIR)</i> | <i>0,76 - 0,90</i> | <i>16-03-1988</i> |
| <i>Landsat 7</i> | <i>+ETM</i> | <i>30 × 30 m</i> | <i>9</i> | <i>Bande 4 (PIR)</i> | <i>0,775 - 0,90</i> | <i>01-03-2000</i> |
| <i>Landsat 5</i> | <i>TM</i> | <i>30 × 30 m</i> | <i>7</i> | <i>Bande 4 (PIR)</i> | <i>0,76 - 0,90</i> | <i>27-07-2010</i> |
| <i>Landsat 8</i> | <i>OLI</i> | <i>30 × 30m</i> | <i>9</i> | <i>Bande 5 (PIR)</i> | <i>0,85 - 0,88</i> | <i>25-07-2015</i> |

** La résolution spatiale originale des images MSS est de 56,5 m x 79,5 m. Les systèmes de production rééchantillonnent actuellement les données en 60 m.*

L'approche utilisée pour l'exploitation des données satellitaires est basée sur la photo-interprétation et la détection des changements à partir d'images satellites multi-temporelles. Il existe plusieurs techniques d'analyse multi-temporelles des images satellite qui peuvent être appliquées (LU *et al.*, 2004), la technique utilisée dans cette étude est celle de la superposition des couples d'images multidates. Les images Landsat choisies pour l'auto-détection des changements ont été prises à des périodes espacées de 12 à 15 ans. Elles sont de niveau radiométrique suffisant, permettant une bonne perception des éléments géomorphologiques, néanmoins un calibrage basé sur la

transformation des comptes numériques en valeurs de réflectance a été effectué pour toutes les bandes PIR des scènes de différentes dates. Afin de garantir une discrimination aisée de la ligne de rivage entre les plans d'eau et le sol, la bande proche infrarouge (PIR) a été choisie pour toutes les images (bande 5 pour Landsat 8 (OLI), bande 4 pour le reste). L'image Landsat MSS utilisée a subi un rééchantillonnage pour avoir une résolution de 30m similaire à celle des autres capteurs plus récents. La correction géométrique a consisté en une rectification par rapport aux cartes topographiques 1/50000 (RICHARDS & JIA, 2006) dans le système de projection choisi (UTM, zone 30, ellipsoïde de Clarke 1880). Sachant que cette technique nécessite une superposition parfaite des images à comparer, une correction "Image à Image" selon l'approche polynomiale a été effectuée. Le ré-échantillonnage des images est réalisé par la méthode du plus proche voisin (Nearest Neighbour). Par ailleurs la résolution des images satellites utilisées ne révèle que les changements les plus importants et ne permet pas d'évaluer avec précision la vitesse d'érosion et d'engrèvement des rivages. La correction atmosphérique a concerné toutes les bandes PIR en appliquant la méthode DOS (Dark Object Substrat) qui consiste à soustraire la valeur de la réflectance minimale mesurée sur l'image non corrigée des valeurs de tous les pixels de cette image (CHAVEZ, 1988). Cette réflectance, due aux effets atmosphériques, est détectée généralement au niveau des plans d'eaux libres qui se caractérisent par une absorption totale des rayonnements du proche-infrarouge.

3. Résultats et discussion

3.1 Auto-détection des changements avec un pas de 12 à 15ans

a) Evolution entre 1975 et 1988 :

Durant cette période, qui a connu l'aménagement du port de Beni Nsar, auparavant protégé par un simple épi, d'importants changements ont marqué l'île-barrière et l'extrémité nord-ouest de la lagune de Nador. En effet, les zones du littoral de l'île-barrière situées entre (35,251N ; 2,909W) et (35,2413N ; 2,8972W) et entre le double tombolo (35,202N ; 2,854W) et la Tour Restinga (35,1482N ; 2,782W), sont soumises à des phénomènes d'érosion. Par ailleurs, un engrèvement sédimentaire a affecté : la passe N° 3 conduisant à sa fermeture définitive, les bordures de la passe N° 5, le littoral de l'extrémité SE de l'île barrière juste au nord de l'avancée d'Azrou Ourhioul et le rivage lagunaire au nord de la passe N° 3. Enfin, l'extrémité NW de la lagune a subi un comblement où a été construite la zone franche intra-portuaire à Beni Nsar sur une superficie de 37 ha.

b) Evolution entre 1988 et 2000 :

Le principal aménagement effectué dans l'île-barrière pendant cette période est la construction, en 1993, de deux jetées au niveau de la passe N° 5 pour la maintenir

ouverte et éviter le confinement du milieu afin de préserver les propriétés physico-chimiques de l'eau et l'activité d'aquaculture menée par la société MAROST.

Une partie de la bordure Est de la passe N° 5 a été éliminée par l'érosion. En revanche un engraissement important s'est développé au niveau de ses bordures provoquant ainsi un petit décalage de l'ouverture de la passe vers le Sud-Est. De plus, une avancée de trait de côte bien nette est notée depuis la grande jetée du port de Beni Nsar jusqu'à la passe N° 1. L'engraissement affecte également la zone comprise entre la passe N° 5 et le tombolo qui s'est transformé en un double tombolo, ainsi que la rive lagunaire entre la passe N° 2 et la passe N° 3 (entre 35,234N ; 2,891W et 35,225N ; 2,882W), l'extrémité sud-est de la lagune et les embouchures du canal provenant de Oued El Maouadine (35,124N ; 2,859W) et de Oued Boussardoune (35,163N ; 2,907W).

c) Evolution entre 2000 et 2015 :

Dans le but d'améliorer le renouvellement des eaux de la lagune et de permettre l'accès de bateaux de plaisance, une nouvelle passe de 300 m de large et 6 m de profondeur a été réalisée en 2009 entre le double tombolo et la passe N° 3 (figure 1). Elle est délimitée par une digue Ouest et une digue Est respectivement de 1350 mètres et de 1450 mètres de longueur. Un engraissement se développe au niveau du rivage marin derrière la digue Ouest et au niveau du rivage lagunaire derrière la digue Est. La progradation se poursuit dans l'embouchure du canal de Oued El Maouadine. En revanche l'ouverture de la nouvelle passe signifie une élimination de la partie de l'île barrière située entre des deux digues.

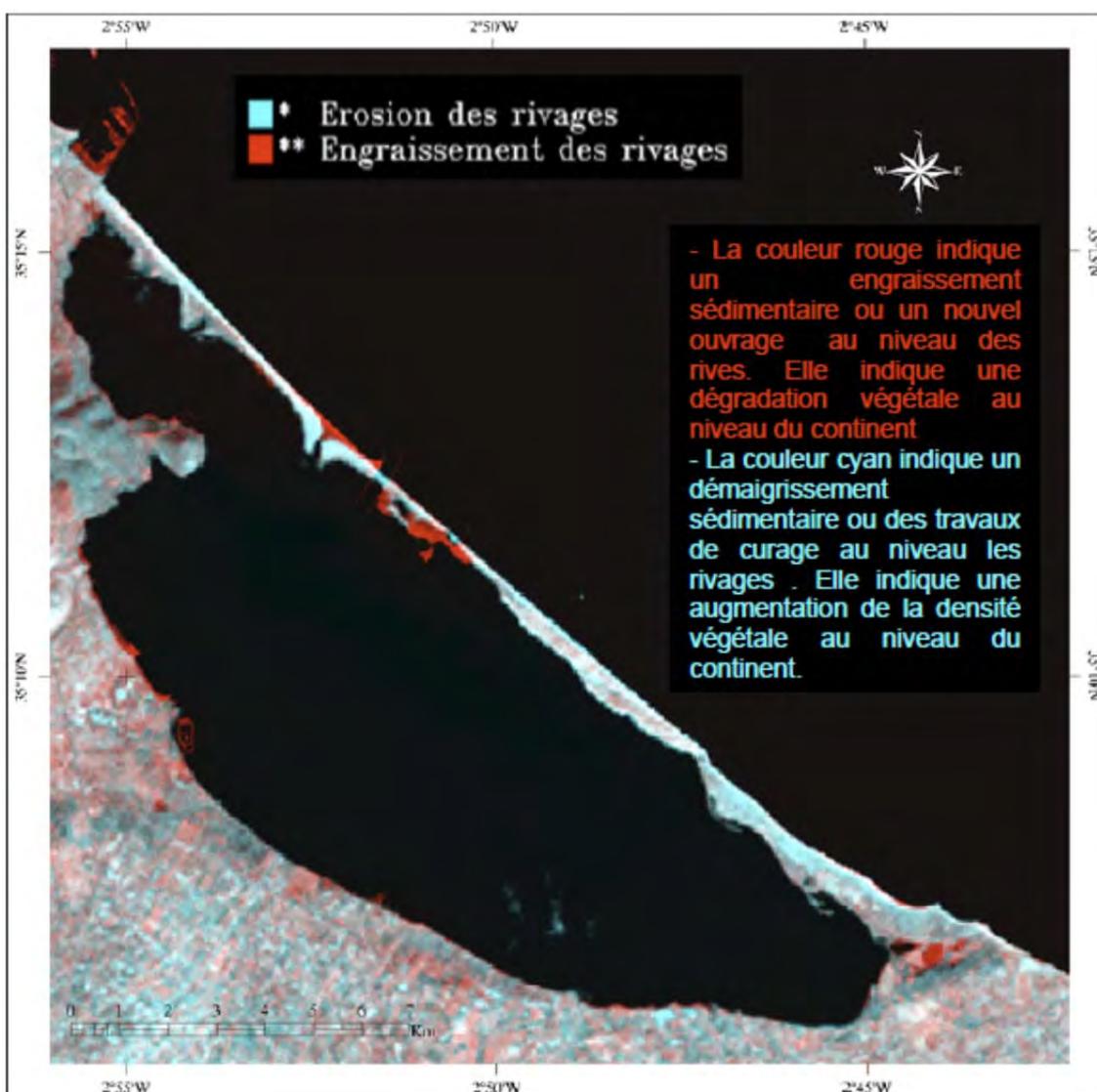
3.2 Auto-détection des changements sur 40ans (1975-2015)

L'analyse des changements détectés sur une période de 40 ans, a permis d'évaluer l'importance de l'évolution du complexe lagunaire de Nador et de mettre en évidence d'autres changements qui n'ont pas pu être détectés sur des périodes plus courtes. Les résultats de cette analyse montrent un déséquilibre lié aux différents aménagements effectués dans le site (figure 2) :

- Engraissement du littoral de l'île barrière entre le Port de Beni Ensar et la passe N°1, induit par la construction de la grande digue du Port de Beni Ensar (1978) qui bloque les transits sédimentaires en provenance du Nord.
- Erosion faible du littoral de l'île barrière entre la passe N°1 et la passe N°2 suite à la réfraction des vagues par la digue du Port de Beni Ensar vers la zone érodée.
- Comblement de la passe N° 3, contemporain de la construction du port de Beni Ensar, lié aux apports sédimentaires provenant de la partie érodée située plus au Nord.
- Erosion du littoral de l'île barrière entre le tombolo et la Tour Restinga, le déficit sédimentaire serait une conséquence, du comblement de la passe N° 3 et de l'aménagement de nouvelles passes avec la construction des digues.
- Déséquilibre sédimentaire en relation avec les aménagements effectués au niveau de la passe N° 5 en 1993 (élargissement et construction de deux digues),

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

- Engraissement derrière la jetée NW et érosion derrière la jetée SE du littoral de l'île barrière,
- Développement d'un delta de flot et engraissement de la rive lagunaire de l'île barrière entre la passe N°5 et le double tombolo.



- Déséquilibre sédimentaire en relation avec les aménagements réalisés en 2009: ouverture de la passe artificielle (N° 8),
- Engraissement derrière la digue Ouest et Érosion derrière la digue Est du littoral de l'île barrière,

- Engraissement de la rive lagunaire de l'île barrière derrière la digue Est et de part et d'autre du double tombolo,
- Engraissement du littoral entre les deux passes aménagées.
- Comblement des extrémités NW et SE de la lagune (naturel et provoqué).
- Progradation des embouchures de Oued Boussardoune, du canal d'irrigation de Oued El Maouadine et de Oued Afelioun.

4. Conclusion

Le suivi de l'évolution morphodynamique durant les dernières 40 années (période 2005 – 2015) montre clairement l'impact des aménagements sur l'équilibre sédimentaire et la configuration du complexe lagunaire de Nador. Les déséquilibres enregistrés pourraient entraîner la disparition d'une partie de l'île barrière, en particulier suite à l'érosion rapide détectée au niveau du cordon consolidé de la partie centrale de l'île barrière. Ce risque est d'autant plus grand que d'une part la région est tectoniquement active et d'autre part, le réchauffement climatique global et ses conséquences (perturbations climatiques et élévation du niveau de la mer) sont inéluctables.

5. Références

- CHAVEZ P.S. (1988). *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*. Remote Sensing of Environment, Vol. 24, pp 459-479. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)
- HAMOUMI N. (2011). *Le complexe lagunaire de Nador (Maroc) : fonctionnement, contrôle naturel et provoqué, scénarii d'évolution future*. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Tanger, Maroc, pp 173-176. <http://dx.doi.org/10.5150/cmcm.2011.037>
- HAMOUMI N., IRZI Z. (1999). *Les aménagements côtiers : problèmes et enseignements - Cas du littoral méditerranéen oriental*, Actes de la 3^{ème} rencontre Hydrodynamique marine, Casablanca, 99, 12 p.
- HILMI K. (2005). *Modélisation numérique de la circulation de deux milieux paraliques du littoral marocain : la lagune de Oualidia (Atlantique) et la lagune de Nador (Méditerranée)*. Thèse de Doctorat national, Fac. Sc. Ben Msik, Casablanca, 183 p.
- INANI I. (1995). *Dynamique sédimentaire et état de la pollution dans la lagune de Nador*. Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Mohammed V-Agdal, Rabat. 200 p.
- IRZI Z. (2002). *Les environnements du littoral méditerranéen oriental du Maroc compris entre l'oued Kiss et le Cap des Trois Fourches ; Dynamique sédimentaire et étude d'impact des sites aménagés et l'analyse des associations de foraminifères benthiques de la lagune de Nador en relation avec leur écologie*. Thèse de doctorat d'état ès-Sciences ; Univ. Mohammed I, Oujda, Maroc, 279 p.
- IRZI Z., KADIRI H., HAMOUMI N. (1997). *Hydrologie et morphodynamique de l'île barrière de la lagune de Nador, littoral méditerranéen oriental (Maroc)*. Commun. 6^{ème}

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

Cong. Sédim., Montpellier, Livre des résumés, Publ. ASF, Paris, France, Vol. 27, pp 149-50.

LOUAYA A. (2013). Etude géomorphologique dynamique et structurale du complexe lagunaire de Nador et de son arrière pays – Impact des aménagements sur la morphodynamique du complexe lagunaire. Thèse de Doctorat, Univ. Mohammed V, Rabat, 239 p.

LOUAYA A., HAMOUMI N. (2006). *Application de la télédétection à l'étude de la géomorphologie et de la morphodynamique du complexe lagunaire de Nador*. Bull. GeoObservateur, Vol. 15, pp 51-65.

LOUAYA A., HAMOUMI N. (2010). *Etude morphostructurale de la région de Nador (Maroc nord-oriental)*. Africa Geoscience Review, Vol. 17(2), pp 107-127.

LU D., MAUSEL P., BRONDIZIO E., MORAN E. (2004). *Change détection technique*. Remote Sensing, Vol. 25(12), pp 2365-2407.

<http://dx.doi.org/10.1080/0143116031000139863>

MAHJOUBI R. (1991). *Évolution de la dynamique sédimentaire d'un système lagunaire microtidal pendant l'Holocène : lagune de Nador*. Thèse de 3ème cycle, Université. Med. Ben Abdellah, 289 p.

RAHOUTI M. (2004). *Apport de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique a la cartographie des écosystèmes lagunaire et aux suivi de leur évolution ; Cas des lagunes de Moulay Bousselham et de Nador*. Thèse de doctorat, Univ. Mohammed V, Rabat, Maroc, 187 p.

RICHARDS J.A., JIA X. (2006). *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Springers, 4e éd., Berlin, 439 p.