

# **CIRCULATION MARINE DE LA LAGUNE DE NADOR (MAROC) PAR MODELISATION HYDRODYNAMIQUE**

*Hilmi Karim, Dr.*  
*Makaoui Ahmed, Dr.*  
*Idrissi Mohammed, Dr.*  
*Abdellaoui Benyounes, Dr.*  
*El Ouehabi Zineb, PhD*

Département d'Océanographie et d'Aquaculture  
Institut National de Recherche Halieutique, Casablanca, Maroc

---

## **Abstract**

The marine circulation of Nador lagoon (Morocco) have been studied from April to July 2011 by hydrodynamic 3D model, under the new configuration of its new inlet which is operational from 2011. This study aims to understand the new mode of hydrodynamic functioning of this lagoon. The circulation in the lagoon is wind driven circulation, as the wind is contributing to mixing internally the lagoon waters. During the neap tides, the surface currents are very strong in the new inlet ( $> 1 \text{ m.s}^{-1}$ ), less than  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  in the centre and  $0.3 \text{ m.s}^{-1}$  near the continental sides of the lagoon. The bottom currents are in the opposite direction from the surface currents and less than  $0.2 \text{ m.s}^{-1}$ .

---

**Keywords:** Nador Lagoon-Morocco-circulation- 3D Model- New inlet

---

## **Résumé**

La circulation marine de la lagune de Nador (Maroc) a été appréhendée sur la période d'avril à juillet 2011 par modélisation hydrodynamique 3D, sous la configuration de sa nouvelle passe d'entrée fonctionnelle depuis 2011. Cette étude vise à mieux comprendre le nouveau mode de fonctionnement hydrodynamique de la lagune et le moteur de la circulation marine au sein de la lagune de Nador est le vent. En périodes de vives eaux, les courants de surface sont très intenses au niveau de la nouvelle passe d'entrée ( $> 1 \text{ m.s}^{-1}$ ) et diminuent progressivement au centre de la lagune ( $<. 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ ) vers les rives continentales de la lagune ( $< 0.3 \text{ m.s}^{-1}$ ).

En profondeur de la lagune, les courants du fond sont très faibles ( $<0.2\text{m.s}^{-1}$ ) et sont dans des directions inverses aux courants de surface.

---

**Mots clés:** Lagune de Nador-Maroc-Circulation- 3D Modèle-Nouvelle passe d'entrée

## Introduction

La lagune de Nador ou «Marchica» (Figure 1), située sur la façade méditerranéenne marocaine, est la plus grande lagune du Maroc présentant une superficie de  $115\text{ km}^2$ . De par son importance socio-économique pour la région, elle a fait l'objet de diverses études visant notamment à définir son organisation hydrologique, sédimentologique, pêche et aquaculture, ... (Abdellaoui *et al.* 2006, 2015; Arid *et al.*, 2005; Guelorget *et al.*, 1987; Hamoumi, 2012; Lakhdar *et al.*, 2005; Lefebvre *et al.*, 1997; Malouli, 2003,...). Cependant, des études visant la description des processus physiques régissant la lagune de Nador et son fonctionnement hydrodynamique sont très peu nombreuses sous la configuration de son ancienne passe d'entrée (Hilmi, 2005; Hilmi *et al.*, 2003, 2005; Koutistonsky *et al.*, 2006; Umgeisser *et al.*, 2005; 2014) et encore inexistantes sous la configuration de la nouvelle passe d'entrée. De manière à permettre un meilleur échange des eaux de la lagune avec les eaux méditerranéennes, une nouvelle passe d'entrée a été mise en place et fonctionnelle depuis 2011 et l'objectif de ce travail est de décrire, à l'aide du modèle hydrodynamique, la nouvelle circulation marine tridimensionnelle de la lagune, sous la configuration de sa nouvelle passe d'entrée (Figure 1).

## Matériel et Méthodes

Le modèle tridimensionnel, implémenté pour la lagune de Nador, est le modèle MIKE3-HD développé par la société DHI (DHI, 2002) et calibré et validé dans la lagune lors d'études antérieures (Hilmi, 2005; Hilmi *et al.*, 2003, 2005). Le modèle MIKE3-HD résout les équations tridimensionnelles de la conservation de la masse, du mouvement (St-Venant) de la salinité et de la température en tenant compte des variations de la densité, de la bathymétrie et des forces externes telles que les marées, les forces du vent et de la pression atmosphérique en surface et aux frontières ouvertes (DHI, 2000). Les équations du modèle 3D sont décrites en détails par DHI (DHI, 2002). Dans la configuration de la nouvelle passe d'entrée de la lagune de Nador, le modèle 3D a été calibré à partir des mesures de courant dans la lagune en 2001 (frottement au fond, entrainement par le vent, ...) (Hilmi *et al.*, 2003) puis validé sur des mesures de courant au voisinage de la passe d'entrée dans la lagune sur la période allant du 28 mai au 10 juin 2011 (Nombre Observations= 314; Moyenne=0.71; RMS=0.21; Scatter

Index=0.3; CorrCoeff=0.75). Dans cette version du modèle, ce dernier reproduit correctement la marée et à 75% les intensités du courant, ce qui nécessite encore d'autres améliorations dans les mesures de terrain (bathymétrie renforcée de terrain, nouvelles mesures de courants au sein de la lagune et nouvelles mesures de marée à l'entrée de la nouvelle passe d'entrée, vent observé dans la lagune, ...) en vue d'améliorer les sorties du modèle 3D. Les intrants du modèle 3D pour cette étude sont les suivants:



Fig. 1. La lagune de Nador (ou «Marchica») (Image©2013Google) avec zoom sur sa nouvelle passe d'entrée de la lagune. L'ancienne passe d'entrée (située à droite de la nouvelle passe d'entrée) est actuellement fermée.

### Bathymétrie de la lagune

La grille de calcul, développée pour la lagune, comprend 200 mailles en X (vers l'Est) et 200 mailles en Y (vers le Nord), de dimensions 90 m x 90 m sur le plan horizontal. Sur le plan vertical, la grille de calcul a été divisée en couches de 1m chacune. Ainsi, la lagune de Nador présente une bathymétrie régulière atteignant des profondeurs maximales au centre variant entre 6 à 7 m au maximum. Au niveau de la nouvelle passe d'entrée, ces profondeurs atteignent généralement 7 à 8 m de profondeur au centre de la lagune, ce qui permet un meilleur échange entre la mer Méditerranée et la lagune (Figure 2).

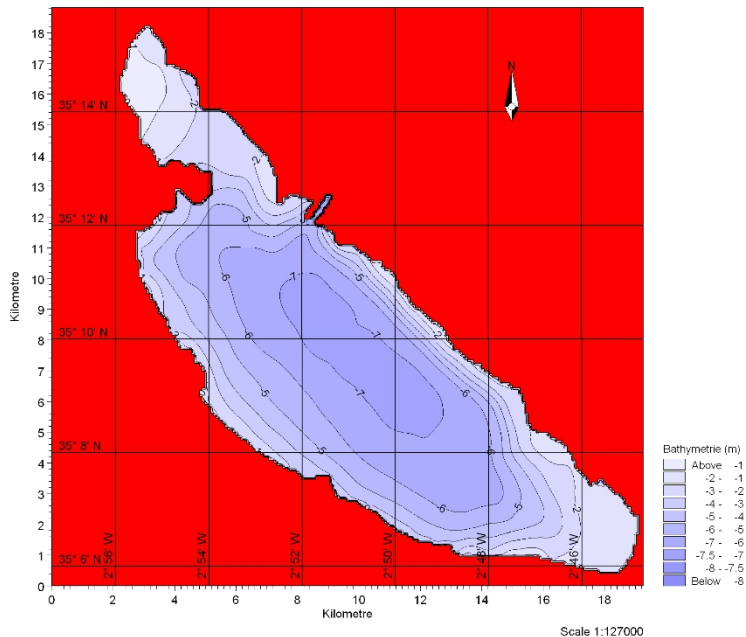


Fig. 2. Bathymétrie de la lagune de Nador avec sa nouvelle passe d'entrée.

### Marée et vent

Marée: A ses frontières ouvertes et au niveau de sa nouvelle passe d'entrée (Figure 2), le modèle 3D a été forcé par la marée observée au port de Melilla (35.29°N-2.93°W) sur la période du 1er avril au 31 juillet 2011 (Figure 3) (Source données Puertos Del Estado).

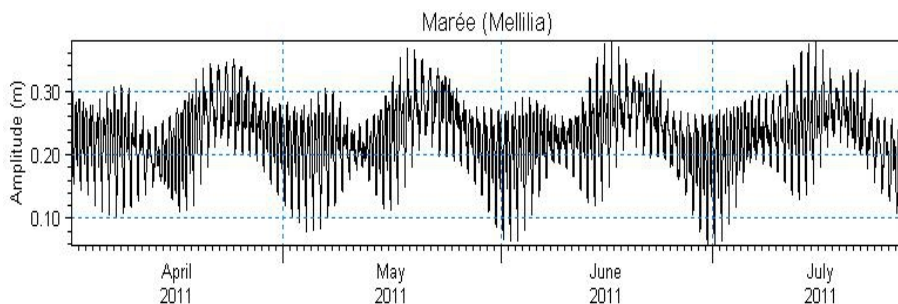


Fig. 3. Marée horaire (en m) au port de Melilla (35.29°N-2.93°W) du 1er Avril au 31 Juillet 2011 (Données Source Puertos Del Estado).

Vent: Les données du vent, prises en considération dans cette étude, sont des données de vent (intensité et direction) au large de la lagune de Nador en mer ouverte (35.25°N-2.83°W), établies sur la période du 1er avril au 31 juillet 2011 (figure 4) (Source données Puertos Del Estado).

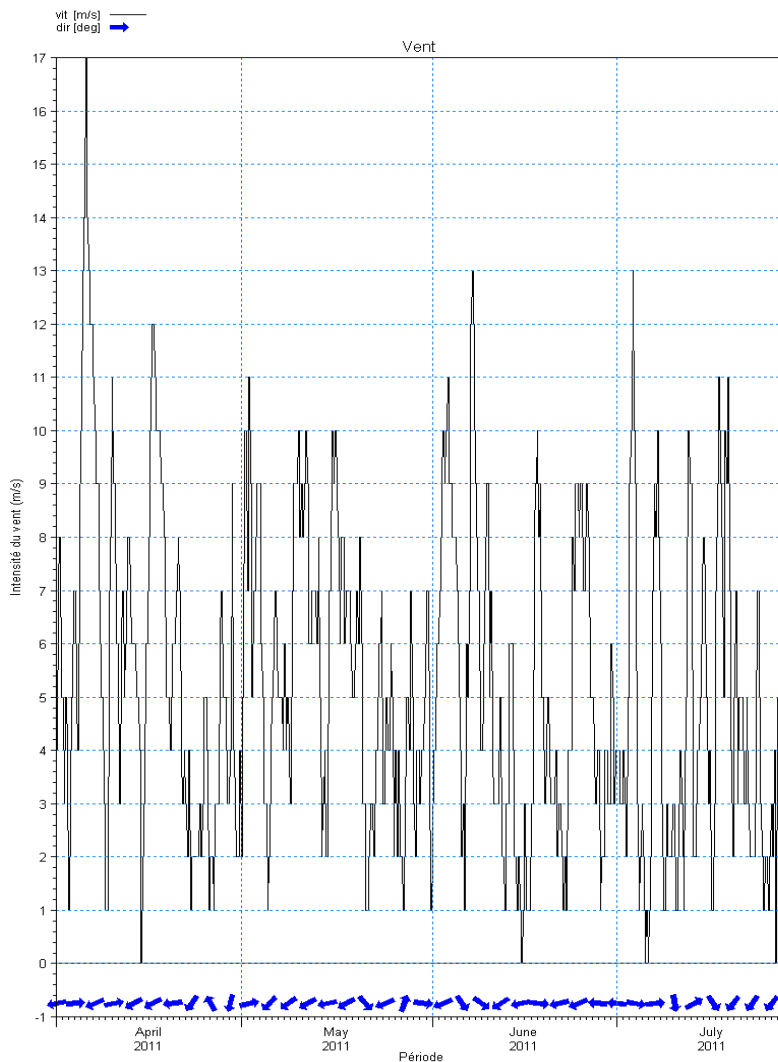


Fig. 4. Paramètres du vent: l'intensité du vent en  $m.s^{-1}$  (en haut) et la direction d'où souffle le vent (en bas en flèches bleues) sur la période du 1er avril au 31 juillet 2011 au large de la lagune de Nador en mer ouverte ( $35.25^{\circ}N-2.83^{\circ}W$ ) (Source données Puertos Del Estado).

## Résultats et discussion

### Marée

Sur la période d'étude allant du 1er avril au 31 juillet 2011, l'amplitude de marée a fluctué entre 0.05 m à 0.36 m (Figure 3), ce qui représente un faible marnage ( $<. 0.3$  m). Ce faible marnage est caractéristique de la mer Méditerranée marocaine aussi bien en mer ouverte (MET/DPDPM, 2013) qu'au sein de la lagune (Hilmi, 2005, Hilmi *et al.*, 2003, 2005). La marée est de type semi diurne, représentée par la composante M2, comme c'est le cas pour les façades Atlantique et

Méditerranéenne marocaine et les plus fortes amplitudes de la marée correspondent ainsi à des marées de vives eaux (Figure 3).

## Vent

Concernant le vent observé au large de la lagune de Nador sur la période allant du 1er avril au 31 juillet 2011, ce vent présente des intensités comprises entre  $0.5$  à  $17 \text{ m.s}^{-1}$  (figure 4a), avec une intensité moyenne de  $5.22 (\pm 2.97) \text{ m.s}^{-1}$  et des directions très variables (figure 4b). La figure 5 présente en synthèse la série temporelle de vent du 1er avril au 31 juillet 2011 sous forme de rose des vents. A partir de cette rose des vents, on constate que les vents dominants sur la période d'étude sont de secteurs soufflant dans les secteurs Nord Est, Est et Ouest (Figure 5). Ce seront ces directions de vent qui seront ainsi prises en considération dans la section suivante.

## Circulation tridimensionnelle (3D) de la lagune

Les résultats de la circulation tridimensionnelle (3D en surface et au fond) de la lagune de Nador sont présentés en fonction des directions dominantes des vents mentionnées à la figure 5, soufflant dans les directions Nord Est (figure 6a surface et figure 6b fond), Est (figure 7a surface et figure 7b fond) et Ouest (figure 8a surface et figure 8b fond).

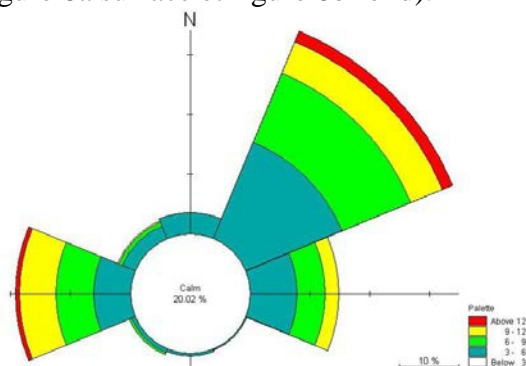


Fig. 5. Rose des vents observés sur la période du 1er Avril au 31 Juillet 2011 au large de la lagune de Nador. Les données de vent proviennent de Puertos Del Estado.

Bien que les configurations des vents soient différentes les unes des autres, les résultats des sorties du modèle hydrodynamique 3D montrent que, selon les trois types de configuration de vent sus mentionnées, les courants de surface de la lagune sont entraînés par les vents dans les directions dominantes (Figures 6a, 7a et 8a) et sont bien plus intenses que ceux du fond (figures 6b, 7b et 8b). En effet, les courants de surface observés à l'entrée de la lagune sont en phase avec la marée entrante et/ou sortante dans la lagune. Ils sont très intenses à l'entrée de la passe d'entrée de lagune et présentent

des intensités supérieures à  $1 \text{ m.s}^{-1}$  en périodes de vives eaux. Ils décroissent progressivement au centre de la lagune (intensités inférieures à  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$ ) et vers les rives continentales de la lagune (Nord/Sud et/ou Est/Ouest de la lagune) dont les intensités sont inférieures à  $0.3 \text{ m.s}^{-1}$  (figures 6a, 7a et 8a). Selon les directions dominantes d'où soufflent les vents, ces derniers vont ainsi créer au niveau des rives continentales deux courants côtiers en bordure des deux rives Est et/ou Ouest de la lagune (figures 6a, 7a et 8a).

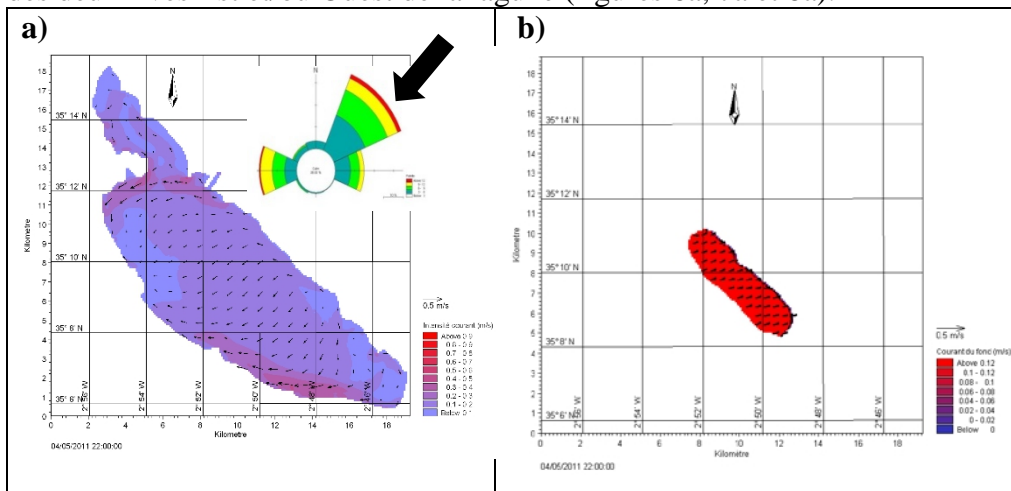


Fig. 6. Exemple de circulation de la lagune de Nador **a)** de surface et **b)** du fond pour la journée du 05 Avril 2011 à 22h) par vent soufflant du Nord Est. La flèche en noir désigne la direction dominante d'où souffle le vent.

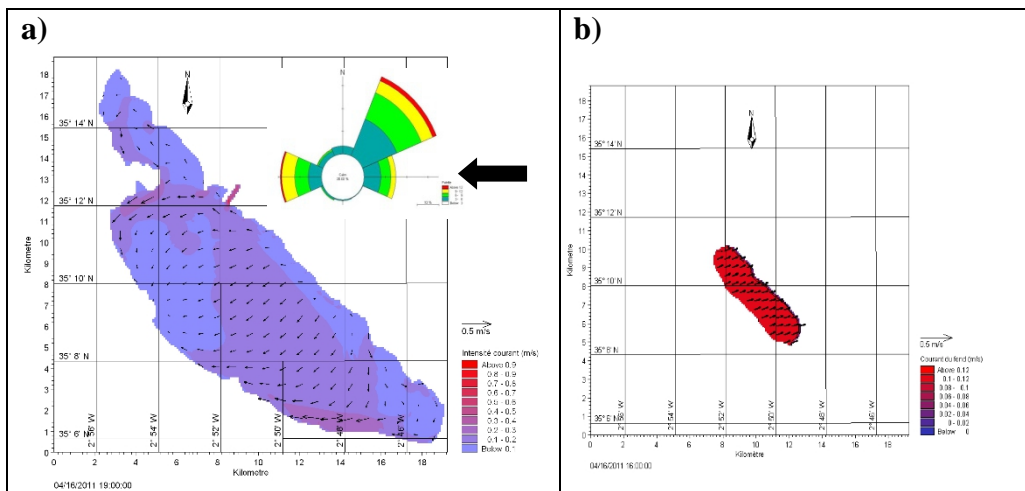


Fig.7. Exemple de circulation de la lagune de Nador **a)** de surface et **b)** du fond pour la journée du 16 Avril 2011 à 16h par vent soufflant d'Est. La flèche en noir désigne la direction dominante d'où souffle le vent.

Ces courants côtiers forcent ainsi les eaux à s'accumuler à l'extrémité Nord et/ou Sud de la lagune de Nador et dans les zones de Kariat Arekmane

et/ou de Beni Ansar où elles vont plonger pour alimenter en profondeur et au centre de la lagune un courant de retour contre la direction du vent (figures 6b, 7b et 8b).

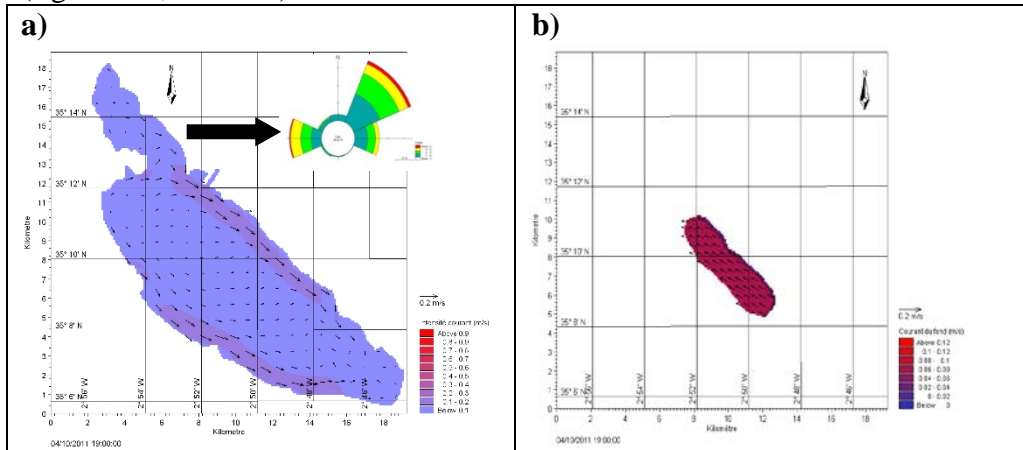


Fig. 8. Exemple de circulation de la lagune de Nador **a)** de surface et **b)** du fond pour la journée du 10 Avril 2011 à 19h par vent soufflant d’Est. La flèche en noir désigne la direction dominante d’où souffle le vent.

Les courants en profondeur sont généralement faibles et d’intensités inférieures à  $0.2 \text{ m s}^{-1}$ . Les courants de retour remontent en surface dans les zones de Kariat et/ou de Beni Ansar pour alimenter de nouveau les courants côtiers près des rives Ouest (entre Beni Ansar et la passe) et Est (entre la passe et Kariat Arekmane), fermant ainsi la boucle de la circulation tridimensionnelle de la lagune. Ce schéma de circulation, décrit précédemment, a été observé lors des études antérieures menées dans la lagune sous la configuration de son ancienne passe d’entrée (Hilmi, 2005; Hilmi *et al.*, 2003, 2005, Koutitonsky *et al.*, 2006). Il est aussi généralement rencontré dans des systèmes lagunaires similaires où ce sont des courants de dérive (en anglais «wind drift current») qui sont généralement observés près des rives continentales et générés directement par les vents. Les courants en profondeur observés sont généralement induits par un gradient de pression longitudinal (en anglais «gradient current»), résultant du changement de la pente de surface (Koutitonsky *et al.*, 2005; Mathieu *et al.*, 2002).

### Conclusion

Cette étude a visé à définir le nouveau mode de fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Nador, sous la configuration de sa nouvelle passe d’entrée fonctionnelle depuis 2011 et en fonction des directions dominantes du vent sur la période allant du 1er avril au 31 juillet 2011. Les résultats de l’étude montrent que le moteur de la circulation marine des eaux



au sein de la lagune de Nador est le vent, que ce soit dans la nouvelle ou de l'ancienne configuration de la passe d'entrée de lagune. Au niveau de la nouvelle passe d'entrée, les courants, en phase avec la marée, ont une très grande influence dont les intensités sont supérieures à  $1 \text{ m.s}^{-1}$  en périodes de vives eaux. Ils diminuent d'intensité au centre ( $< 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ ) et en bordure des rives continentales de la lagune ( $< 0.3 \text{ m.s}^{-1}$ ). Les courants du fond présentent des intensités faibles ( $< 0.2 \text{ m.s}^{-1}$ ) et sont généralement dans les directions inverses à celles des courants de surface. Selon les critères de classification établis par Kjerfve (1986) et Kjerve and Magill (1989), la lagune était classifiée, sous la configuration de son ancienne passe d'entrée, comme une lagune de type « étouffé » (ou « choked lagoon ») (Hilmi *et al.*, 2003, 2005; Koutitonsky *et al.* 2006). Depuis 2011, une nouvelle passe d'entrée de la lagune a été ouverte, ce qui permet actuellement à la lagune un meilleur échange de ses eaux avec la mer Méditerranée. Ce nouveau statut permettrait ainsi à la lagune de changer de classification de lagune « étouffée » (« choked lagoon ») à une lagune « coulante » (ou « leaky lagoon ») (Umgeisser *et al.*, 2014; Hilmi *et al.* étude en cours).

### Remerciements

Cet article est dédié à la mémoire de notre collègue, feu Dr Jaouad Lakhdar Idrissi, chercheur à l'Institut National de Recherche Halieutique (INRH) qui a beaucoup travaillé sur la lagune de Nador avant sa disparition en 2010. Les auteurs tiennent aussi à remercier les équipes du Centre Régional de l'INRH à Nador, Dr Youssef, Pr V. Koutitonsky qui a initié ce type d'études dans la lagune de Nador, les évaluateurs anonymes ainsi que Dr E. Fanjul du Puertos del Estado.

### References:

- Abdellaoui, B., Idhalla, M., Najih, M., et Orbi, A. (2006) Spatial and temporal variation of macroalgal *Gracilaria SP* in Nador Lagoon, Northern Morocco. *Pakistan Journal of Oceanography*, Volume 2 (2): 39-48.
- Abdellaoui, B., Nhhala, B., Talbaoui, E.M. (2015) Mediterranean coastal lagoons: sustainable management and interactions among aquaculture, Capture fisheries and the environment: Studies and Reviews. General Fisheries Commission for the Mediterranean. N° 95. Rome, FAO. p 163-173. ISBN 978-92-5-108792-3.
- Arid, H., Moudni, H. Orbi, A., Talbaoui, E.M., Lakhdar, I.J., Massik, Z., Littaye, A. et Paoli, R. (2005). Télédétection spatiale et SIG pour la gestion intégrée des potentialités aquacoles. *GEO OBSERVATEUR*. Centre Royal de Télédétection Spatiale, N° 14, pp 63-79.
- DHI (2002) MIKE 3 Hydrodynamic module. Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark, 133 p.

- Guelorget, O., Perthuisot, J.-P., Frisoni, G-F., et Monti, D. (1987). Le rôle du confinement dans l'organisation biogéologique de la lagune de Nador (Maroc). *Oceanologica Acta*, 10, 435-444.
- Hamoumi, N. (2012). Le complexe lagunaire de Nador (Maroc): fonctionnement, contrôle naturel et provoqué, scénarii d'évolution future. *Revue Paralia*, Volume 5, pp 5.1-5.14.
- Hilmi, K., Koutitonsky, V.G., et Orbi, A. (2003). Circulation et dispersion tridimensionnelle (3D) de la lagune de Nador durant l'automne 2001 (Septembre-Novembre 2001). *Travaux et Documents INRH (Maroc)*, N° 112, 47 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. Université Hassan II-Mohammedia, 186 p.
- Hilmi K., Koutitonsky, V.G., Orbi A., and M. Chagdali, M. (2005) Three dimensional water circulation and dispersion in Nador lagoon (Morocco). In: P. Lasserre, P. Viarioli and P. Campostrini Eds: *Lagoons and Coastal Wetlands, in the Global Change Context: Impacts and Management Issues*, Proceedings of the International Conference, Venice, 26-28 April 2004, ICAM Dossier N° 3, UNESCO.
- Hilmi K. *et al.* Nador lagoon: a choked or a leaky lagoon? In preparation.
- Kjerfve, B. (1986) Comparative oceanography of coastal lagoons, in *Estuarine Variability*, edited by D. A. Wolfe, pp. 63–81, Academic Press,
- Kjerfve, B., and Magill, K.E. (1989) Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons, *Mar. Geol.*, 88, 187–199.
- Koutitonsky, V.G (2005) Three-dimensional structure of wind-driven currents in coastal lagoons (Chapter 9.2: Case studies), pp 376-390. In: *Coastal Lagoons: Ecosystem Processes and Sustainable Management*. E. Gonenc and J. Woflin (eds). CRC Press, 512 p.
- Koutitonsky, V.G, Orbi, A., Hilmi, K., and Ab. Berraho, Ab. (2006). Benefits of a proposed second inlet on water renewal in Nador lagoon, Morocco. The 1st International Conference: Environmental Change in lakes, lagoons & wetlands of the southern Mediterranean region, 4-7 january 2006, Cairo, Egypt.
- Lakhdar, I.J., Orbi, A., Hilmi, K., Zidane F. et Moncef, M. (2005) Modèles de température et de la qualité de l'eau appliquée à deux lagunes marocaines : Oualidia (Atlantique) et Nador (Méditerranée). *Environnemental Technology*, Vol. 26, 713-720.
- Malouli Idrissi, M., Zahri, Y., Houssa, R., Abdellaoui, B., et Elouamari, N. (2003). Pêche artisanale dans la lagune de Nador : Exploitation et aspects socio-économiques. *Informes y Estudios n°10 ; COPEMED*, pp 61-122

Ministère de l'Équipement et du Transport (2013). *Annuaire des côtes marocaines (Province de Nador)*. Direction des Ports et du Domaine Public Maritime, Royaume du Maroc, 9p.

Orbi, A., Hilmi, K., Lakhdar, J.I., and Zizah., S. (2008). *Lagoon Ecosystem Study Trough Two Cases: Oualidia (Atlantic) and Nador (Mediterranean) – Morocco*. Chapter In: *Sustainable Use and Development of Watersheds - Part of the series NATO Science for Peace and Security Series* pp 289-298.

Umgiesser, G., Chao, J., Bajo, M. Scroccaro, I., and Cucco, A. (2005). *Residence time modelling in the Nador lagoon, Morocco*, In *Proceedings of the First International Conference on Coastal Conservation and Management in the Atlantic and Mediterranean (ICCCM'05)*, F. Veloso Gomes, F. Traveira Pinto, L. das Neves, A. Sena and O. Ferreira (eds), pp. 389–397, 2005.

Umgiesser, G., Ferrarin, C., Cucco, A., De Pascalis, F., Bellafiore, D. Ghezzi, M. and Bajo, M. (2014). *Comparative hydrodynamics of 10 Mediterranean lagoons by means of numerical modeling*, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 2212–2226, doi:10.1002/2013JC009512.