

Effets d'une perturbation anthropique sur les conditions hydrologiques de la lagune de Smir (Nord-Ouest, Maroc)

The effects of anthropogenic perturbation on the hydrology of Lake Smir (NW, Morocco)

A. CHAOUTI*, A. BAYED

Reçu le 5 décembre 2003, accepté le 26 juillet 2004**.

SUMMARY

The Mediterranean Smir lagoon (35°43' N 5°20' W) is located in the extreme west of the Mediterranean basin, northwest of Morocco, 25 km south from the Gibraltar strait. The area of this lagoon is about 3 km² with a maximum depth of 2.5 m. The bottom is dominated by silty and fine substrates with some sandy zones close to the entrance. The bottom is extensively covered with macrophytes (e.g., *Enteromorpha* and *Ulya*) and phanerogams (e.g., *Rupia maritima* and *Zostera noltii*). The lagoon receives water from the Smir Wadi but this input has decreased. It also receives fresh water via another channel (the marshes channel) from swamps that lie between the water body and M'diq city. This ecosystem has been subjected to unplanned dam and pleasure port constructions, and these changes led to a modification of the hydrologic system. Currently, this ecosystem communicates with the Kabila harbour (marina) and the sea across a narrow gully and is regularly subjected to tidal movements.

This ecosystem, which functioned before as a lake, has been transformed into a coastal lagoon. This lagoon is changing and trends suggest a progressive evolution towards a neutral type lagoon, where water movement is exclusively influenced by the tidal rhythm. The salinity in the lagoon is comparable to sea salinity. This increase in salinity clearly influences the hydrologic conditions, and has altered the composition, structure and functioning of the biotic compartment. The biota has progressively changed and there has been a progressive colonization of halophyte plants within the marsh and a disappearance of fresh water species from the lagoon.

The physicochemical parameters (salinity, conductivity, dissolved oxygen, pH, water temperature and sediment temperature) of the lake water were characterized. The methodology used allowed the results to be expressed car-

1. Université Mohammed V, Agdal, Institut Scientifique, département de Zoologie et Écologie Animale, avenue Ibn-Batouta, BP 703, Agdal, 10106 Rabat, Maroc, Tél. : +212 37 77 45 48/50, Mobile : +212 63 08 73 28, Fax : +212 37 77 45 40.

* Correspondance : achaouti@hotmail.com

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 mai 2006.

tographically. Similarly, the measurements for one day were analyzed for incoming and retreating waters at two stationary points, thus increasing the understanding of tidal action on the lagoon-lake hydrology.

The salinity analyses clearly show a mixohalinity and strong spatial and temporal variabilities (9 – 40) within the lagoon. This parameter was influenced by tidal changes, rainfall and sunshine during the summer. The latter contributes to evaporation of lagoon water, which therefore increases salinity. Gradients established between the upstream and downstream regions are a function of tide and season. The salinity distribution is marked by maximum values recorded in the summer and minimum values recorded in the winter. The same evolution scheme evolution is also noticed for conductivity since it is a parameter closely linked to salinity.

The lagoon and the main channel waters had higher salinity in the summer ($S‰ = 40$) due in part to marine waters that pervaded this channel, and the evaporation of inflow currents. Low salinity aureoles were detected in the Smir Wadi mouth indicating that fresh waters dilute marine waters. Marine waters that enter the Wadi channel by the inflow currents blend with fresh rainfall waters or stagnant saline waters or with groundwater inputs.

Two periods were distinguishable based on the surface water temperature; hot summer conditions and cold winter conditions. The continental effect was compensated by the sea buffer effect that played an important role in the regulation of the temperature within the Smir lagoon. During the period of decreasing temperature gradients from the downstream region towards the upstream region (by stretching from sea towards continent), marine waters played a significant role by moderating the freshwater temperatures cooled down from the continent during cold periods (winter and autumn). In contrast, during decreasing temperature gradients from the upstream region towards the downstream region, the oceanic waters cooled the high temperatures of internal lagoon waters resulting from hot seasons (summer and spring). Furthermore, the shallow lagoon depth and the long exposure to sunshine, especially in the summer, resulted in water heating.

In addition, the water temperature was influenced by hot marsh channel waters that occupy the upper region and spread with the low tide up to the lagoon entrance. Waters brought by the marsh channel also were distinguishable by high oxygen values, which demonstrate the role played by the swamp vegetation in the oxygenation of these waters. The low oxygen values recorded at the Smir Wadi mouth reflected the effect of suspended elements (turbidity). The Wadi contribution to the oxygen distribution in the lagoon waters was notable as it brings less oxygenated waters because of their strong turbidity.

Nevertheless, the lagoon waters showed good dissolved oxygen saturation and no under-saturation was observed during the study period. This relates not only to the permanent exchanges with the sea, but also to the rather remarkable abundance of marsh vegetation and to the development of macrophytes and phanerogams within the lagoon. The dissolved oxygen isovalue distribution curves overlapped remarkably with isotherms, even as the temperature increased, because the entire zone that stretches up to the gully was occupied by a dense meadow. This biomass supplies oxygen to the central zone and can contribute to over-saturation. The lagoon inside was less covered with vegetation and showed comparatively low oxygen values. Besides the photosynthesis activity, the shallow depth and the uninterrupted lagoon waters mixed by the tidal currents explain the over-saturation sometimes observed within lagoon, especially in its downstream region.

Variations in pH appeared to be closely linked to dissolved oxygen and water temperature. The three parameters present comparable distribution patterns showing the influence of the marsh waters on the lagoon hydrology. The pH

varied between 8.0 and 9.0, demonstrating an elevated alkalinity in some lagoon waters. This alkalinity trend was due to the constant seawater entrance and to the stopping of Smir Wadi fresh water supplies.

The sediment temperature measured at 5 cm deep gave insight into different daily and seasonal variations. The temperature of both air and marsh waters was comparatively well reflected in the sediments; the temperature distribution in the sediments overlaps with the water isotherms, with temperature values varying from 14 to 28°C. The inside part of the lagoon showed temperatures widely different from those recorded close to the entrance.

The spatial evolution of hydrologic parameters in the lagoon resulted from gradients between the downstream and upstream regions. These gradients are a function of seasons, tide, Smir Wadi inputs and also the main channel coming from the swamps. The lagoon is subjected to high and low tides. In addition to freshwater shortages, the permanent communication with the sea resulted in a general increase of salinity in lagoon waters and marshes. The lagoon hydrologic functioning is currently governed by hydrodynamic factors that are related to the tide (regular) and to the fresh water supplied by the marsh channel (irregular). In addition, physical (intense evaporation), bathymetrical (shallow depth) and physiological (photosynthesis by macrophytes and phanerogams in the lagoon and the neighboring marshes) variables also influence the functioning of the lagoon.

Keywords: *Mediterranean, lake, hydrology, man-made, impacts.*

RÉSUMÉ

La lagune de Smir a été sujette à un aménagement (construction d'un barrage et d'un port de plaisance) qui a contribué à la modification de son système hydrologique notamment, la disparition de certaines espèces de flore et de faune et la réduction de superficies considérables de cet écosystème.

Une caractérisation des eaux de cette lagune a porté sur la mesure pendant le reflux, d'un ensemble de paramètres physico-chimiques. Une méthodologie a été suivie afin d'exprimer de façon cartographique les résultats. De même, des suivis d'une journée ont été réalisés pour les eaux entrantes et sortantes au niveau de deux stations fixes, dans une tentative de comprendre l'action de la marée sur l'hydrologie au sein de la lagune, de cerner les caractéristiques des eaux entrantes dans la lagune et celles sortantes de celle-ci et de suivre l'évolution des différents paramètres physico-chimiques au cours des cycles marégraphiques.

L'évolution spatiale des paramètres hydrologiques au niveau de la lagune, se réalise sous forme de gradients entre l'aval et l'amont. Elle est fonction des saisons, de la marée et des apports de l'Oued Smir et du Chenal principal venant des marais. La lagune subit le flux et le reflux de la marée d'un mètre d'amplitude environ. Combinée avec le déficit en eaux douces, la communication permanente avec la mer a eu pour conséquence l'augmentation générale de la salinité dans le plan d'eau lagunaire et dans les marais. Le fonctionnement hydrologique de la lagune de Smir se trouve actuellement régi par les facteurs hydrodynamiques liés à la marée (réguliers) et aux apports d'eaux véhiculés par le chenal des marais (irréguliers), auxquels peuvent être ajoutés des facteurs physiques (évaporation intense), bathymétriques (faible profondeur) et physiologiques (photosynthèse des macrophytes et des phanérogames dans la lagune et dans les marais limitrophes).

Mots clés : *Méditerranée, lagune, hydrologie, activités humaines, impacts.*

1 – INTRODUCTION

Les lagunes littorales constituent des écosystèmes originaux hautement productifs. Elles accueillent des peuplements animaux et végétaux qui assurent le maintien d'une diversité biologique élevée. Ce sont des écosystèmes dont l'organisation résulte à la fois du contexte environnemental et des interactions biotiques entre les espèces présentes. Ces milieux sont sensibles en raison de leur proximité des activités humaines, mais aussi parce qu'ils sont en situation d'interface entre les milieux continentaux et marins. Ils se caractérisent par de fortes fluctuations journalières et saisonnières de leurs facteurs écologiques (BAYED & CHAOUTI, 2001 ; CHAOUTI *et al.*, 2001 ; BAYED & CHAOUTI, 2004).

Par sa position occidentale au niveau de la côte méditerranéenne marocaine, la lagune de Smir représente un écosystème où la grande variabilité des conditions écologiques justifie pleinement son originalité. Elle s'insère au sein d'un complexe naturel et artificiel de zones humides (marais, merja, canaux de drainage, plage, dune, oued, chenaux, barrage...) au nord du Maroc. Ce complexe est remarquable par l'importance de ses richesses biologiques et la diversité de ses habitats ; ce qui lui avait valu d'acquérir une importance considérable (AEFCS, 1996). Ce site constitue un endroit exceptionnel pour un grand nombre d'espèces de faune et de flore diversifiées ayant un grand intérêt pour la biodiversité marocaine, nord-africaine et/ou méditerranéenne. En effet, la lagune de Smir représente avec oued Al Maleh les seuls sites d'alimentation pour la Spatule blanche (*Platalea leucorodea*) et l'extension la plus méridionale de cette espèce avienne, menacée et en large déclin, à l'échelle du Paléarctique occidental (BAYED & EL AGBANI, 2002 ; EL AGBANI & DAKKI, 2004).

La lagune méditerranéenne de Smir se situe dans le nord-ouest du Maroc à 25 km au sud du détroit de Gibraltar et à quelques kilomètres au nord de la localité de M'diq (figure 1). Sa position géographique (35°43'N et 5°20'W) en fait la lagune la plus occidentale du bassin méditerranéen. Elle recouvre une superficie de 3 km² environ, sa profondeur maximale est de 2,5 m pour une profondeur moyenne de 1,5 m. Le fond de la lagune est dominé par un substrat meuble envasé et les quelques zones sableuses se rencontrent principalement dans le secteur proche du goulet. Ces fonds sont largement tapissés d'algues (*Enteromorpha*, *Ulva*...) et de phanérogames telles que *Rupia maritima* et *Zostera noltii*. La lagune reçoit de façon réduite les eaux de l'oued Smir dont les apports ont été diminués depuis la construction d'un barrage en 1991 (STITOU EL MESSARI & PULIDO BOSCH, 1995). Elle reçoit par un autre chenal dénommé ici « chenal des marais », les eaux provenant des marais qui s'étendent entre le plan d'eau de la lagune et la localité de M'diq. Cet écosystème communique avec le port de Kabila puis avec la mer à travers un goulet et subit de façon régulière les mouvements de la marée dont l'amplitude moyenne est de 1 m. A pleine mer, l'eau pénètre profondément dans la lagune et arrive jusqu'aux marais où elle favorise un développement galopant des plantes halophiles telles que les salicornes, *Salicornia fruticosa*.

Cet écosystème qui fonctionnait auparavant comme un lac (BEKKALI, 1987 ; AKSISSOU, 1989 ; AKSISSOU & ELKAIM, 1994, 1996) s'est transformé actuellement en une lagune littorale et a tendance à évoluer progressivement vers une lagune de type neutre selon la classification de POSTMA (1969), où le mouve-

ment de l'eau est assuré exclusivement par le rythme des marées et la salinité y est comparable à celle de la mer. Cette augmentation de la salinité a influencé de façon nette les conditions hydrologiques d'une part et la composition, la structure et le fonctionnement du compartiment biotique, d'autre part. Ce dernier s'est modifié graduellement, ce qui s'est traduit par l'installation progressive de formations végétales halophiles dans les marais et la disparition d'espèces dulçaquicoles du plan d'eau lagunaire.

Ce travail tente donc de donner une idée préliminaire sur les conditions hydrologiques et hydrodynamiques après les aménagements qui ont touché la lagune de Smir.

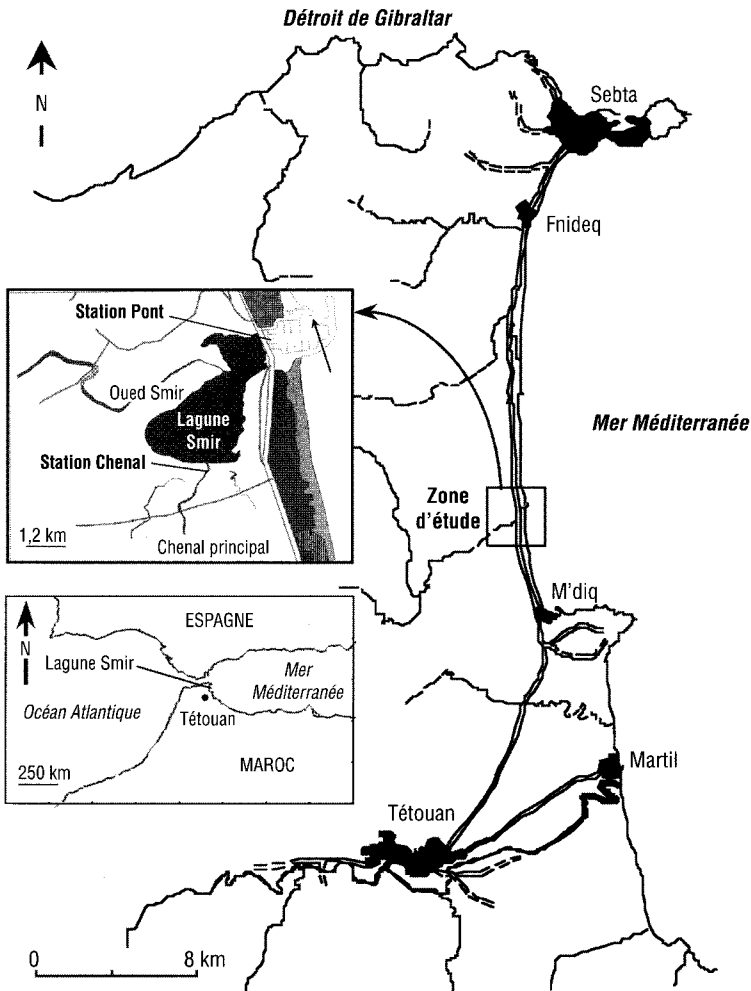


Figure 1 Localisation géographique de la lagune de Smir.
Location of Smir lagoon.

2 – MATÉRIEL ET MÉTHODES

La caractérisation des eaux de la lagune a porté sur la mesure de la salinité, la conductivité électrique, l'oxygène dissous, le pH, la température de l'eau et la température de sédiment. Une méthodologie a été suivie afin d'exprimer de façon cartographique les résultats (logiciel Surfer 6.0). Elle consiste à mesurer ces paramètres pendant le flux et le reflux sur toute l'étendue d'eau lagunaire à l'aide d'un matériel portable de physico-chimie et d'un GPS (Global Positioning System) pour définir les coordonnées géographiques de chaque point de mesure. La conductivité et la salinité ont été mesurées par un Thermo-salino-conductivimètre portable de modèle WTW LF 340. La température de l'eau et celle du sédiment sont relevées par un thermomètre électronique à sonde portée à l'extrémité d'un fil électrique. Le pH est mesuré au moyen d'un pH-mètre portable de modèle pHScan WP 1/2. L'oxygène dissous est mesuré à l'aide d'un Oxymètre portable type HANA, modèle HI 9142.

Pour comprendre l'action de la marée sur l'hydrologie au sein de la lagune, de cerner les caractéristiques des eaux entrantes dans la lagune et celles sortantes de celle-ci et de suivre l'évolution des différents paramètres physico-chimiques au cours des cycles marégraphiques, des suivis journaliers ont été réalisés pour la physico-chimie des eaux entrantes et sortantes au niveau de deux stations fixes. L'une au goulet de la lagune (N 35°43'151" et W 05°20'256") et l'autre au niveau du chenal des marais (N 35°42'106" et W 05°20'249"). De même, la variation du niveau de l'eau est suivie dans une station au milieu du port de plaisance pendant douze heures et les mesures ont été réalisées à l'aide d'un altimètre.

3 – RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Répartition spatiale des paramètres physico-chimiques

L'analyse de la salinité montre une mixohalinité bien établie et des variabilités aussi bien spatiales que temporelles de fortes amplitudes (9 à 40 PSU) dans la lagune de Smir. Ce paramètre dépend des apports de la marée, de l'apport naturel direct des précipitations et de l'ensoleillement estival qui conduit à l'évaporation des eaux de la lagune et l'augmentation de sa valeur. Les gradients qui s'établissent entre l'amont et l'aval sont fonction de la marée et la saison. La répartition de la salinité est marquée par deux particularités ; les valeurs maximales sont enregistrées en été (figure 2) et celles minimales en hiver (figure 3). Il faut noter que la salinité minimale avant les aménagements était de 5 PSU en hiver et pouvait atteindre au maximum 35 PSU en été (AKSIS-SOU, 1989). Ce même schéma de répartition est observé au niveau de la lagune de Nador (Nord-est, Maroc) où les salinités enregistrées atteignent un maximum de 40,2 PSU en septembre (MENIOUI & ZINE, 2001) et qui peut y atteindre en moyenne 43,5 PSU (LEFEBVRE *et al.*, 1997) et au niveau de la lagune de Merja Zerga (Nord-ouest, Maroc) avec des salinités maximales ne dépassant

guère 35,0 PSU en été (BAZAÏRI *et al.*, 2003). Le même scénario d'évolution est aussi observé pour la conductivité puisqu'il s'agit d'un paramètre intimement lié à la salinité. Une valeur élevée de conductivité traduit donc une forte minéralisation.

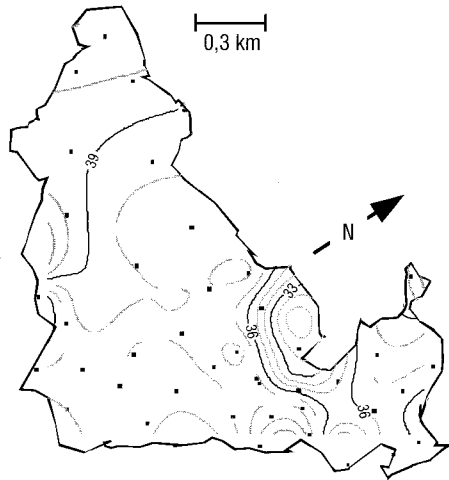


Figure 2 Distribution des isohalins dans la lagune de Smir au cours du jusant en été 2000.
Isohaline distribution in the Smir lagoon at low tide during summer 2000.

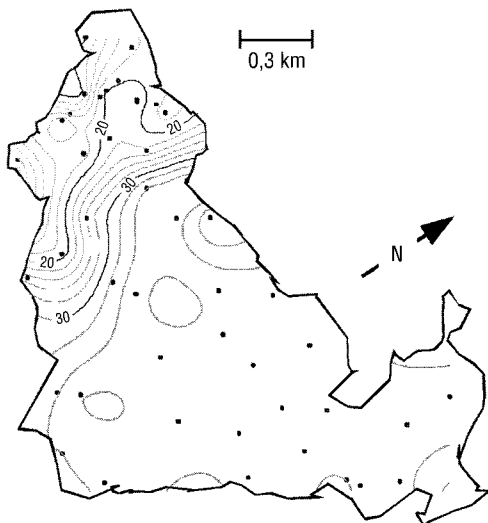


Figure 3 Distribution des isohalins dans la lagune de Smir au cours du jusant en hiver 2000.
Isohaline distribution in the Smir lagoon at low tide during winter 2000.

Comme dans la lagune de Nador (LEFEBVRE *et al.*, 1997), les caractéristiques halines de la lagune de Smir, sont fortement influencées par les conditions climatiques et il se produit donc, soit une sursalure en période estivale, soit une dessalure induite par les précipitations. L'intérieur de la lagune de Smir et les eaux sortant du chenal principal des marais sont plus salées en été (40 PSU) ; une partie des eaux marines qui ont envahi ce chenal pendant le courant du flot s'évaporent. En revanche, des auréoles de dessalure sont mises en évidence au débouché de l'oued Smir (figure 2) dans la lagune témoignant de l'avènement d'eaux douces ou bien encore d'eaux marines diluées. Les eaux marines qui remontent le chenal de l'oued Smir par les courants du flot se mélangent avec les eaux douces des précipitations ou avec les eaux saumâtres qui ont été stagnées dans des dépressions et/ou avec les eaux affleurantes à des niveaux qui épousent les niveaux piézométriques assez élevés de la nappe phréatique. Ce phénomène de résurgence est observé aussi au niveau de la lagune de Walidia (CHBICHEB, 1996) où la salinité descend à des valeurs inférieures à 20 PSU.

Pour la température de l'eau de surface, on distingue deux périodes : l'une estivale chaude (figure 4) et l'autre hivernale froide (figure 5) avec des températures maximales plus élevées que celles relevées dans la lagune de Nador (27,6 °C) et des températures minimales comparables (11,9 °C) (MENIOUI & ZINE, 2001). L'effet de continentalité contrebalancé par l'effet tampon de la mer joue un rôle déterminant dans la répartition et la régulation de la température au sein de la lagune de Smir. De ce fait, l'inversion spatiale de gradient thermique serait en relation avec l'influence des eaux marines qui jouent un rôle « tampon » pour les températures de l'eau continentale. Pendant la période des gradients décroissants de la température de l'aval vers l'amont (par extension de la mer vers le continent) (figure 5), les eaux marines jouent un rôle de tampon en adoucissant les températures des eaux douces refroidies à partir du continent en périodes froides (hiver et automne). Par contre, lors des gradients décroissants de la température de l'amont vers l'aval (figure 4), l'effet tampon des eaux océaniques se fait en rafraîchissant les températures élevées des eaux internes de la lagune, issues des saisons chaudes (été et printemps). De même, la faible profondeur de la lagune et l'ensoleillement important, surtout en été (BAYED & CHAOUTI, 2001), contribuent ensemble dans une grande mesure à un échauffement fort des eaux lagunaires.

De plus, la température des eaux de la lagune est influencée par les eaux douces chaudes venant du chenal des marais qui occupent la partie amont et se dispersent avec le jusant jusqu'au goulet. Les eaux débitées par le chenal des marais se distinguent aussi par des valeurs élevées en oxygène dissous (figure 6) témoignant du rôle joué par la végétation des marais dans l'oxygénation de ces eaux sortantes. Les faibles valeurs en oxygène dissous enregistrées au niveau de l'embouchure de l'oued Smir témoignent de l'apport assez important des éléments en suspension (turbidité) responsables d'un taux élevé de résidus secs mis en évidence par CHAMORRO-MORENO *et al.* (1995). La contribution de l'oued Smir dans la répartition de l'oxygène au niveau des eaux de la lagune est notable dans la mesure où il apporte les eaux moins oxygénées en raison de leur forte turbidité (figure 7).

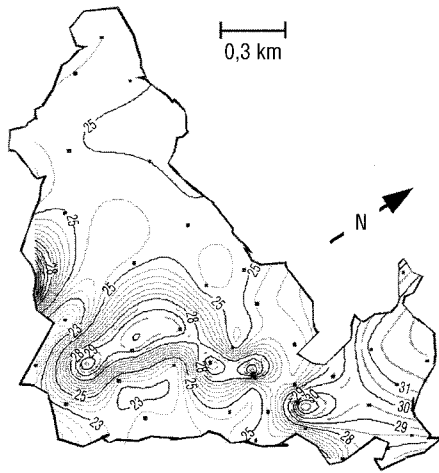


Figure 4 Distribution des isothermes dans la lagune de Smir au cours du jusant en été 2000.
Isotherm distribution in the Smir lagoon at low tide during summer 2000.

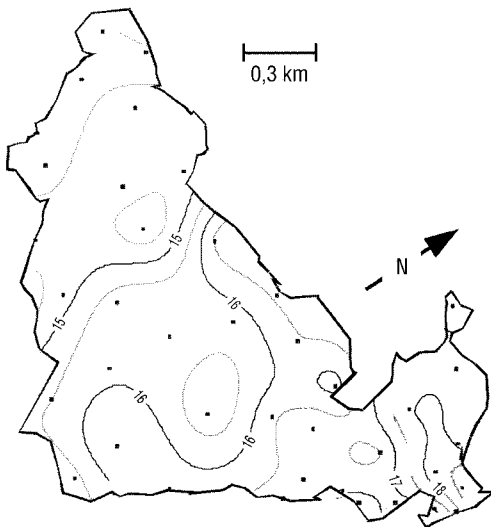


Figure 5 Distribution des isothermes dans la lagune de Smir au cours du jusant en hiver 2000.
Isotherm distribution in the Smir lagoon at low tide during winter 2000.

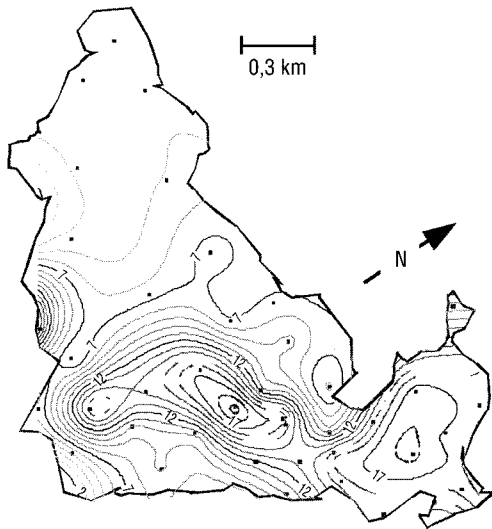


Figure 6 Distribution des isoteneurs en oxygène dissous dans la lagune au cours du jusant en été 2000.
Distribution of dissolved oxygen isovalue curves in the Smir lagoon at low tide during summer 2000.

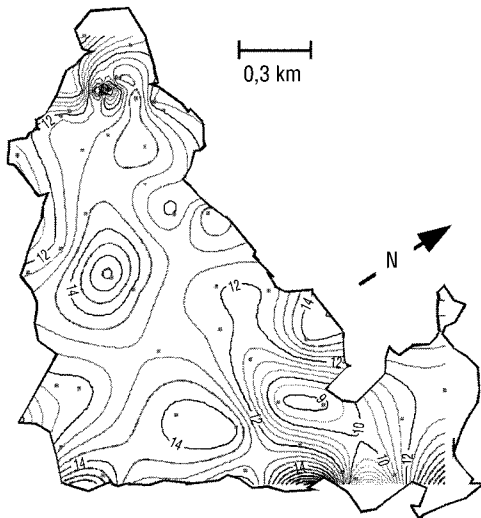


Figure 7 Distribution des isoteneurs en oxygène dissous dans la lagune de Smir au cours du jusant en hiver 2000.
Distribution of dissolved oxygen isovalue curves in the Smir lagoon at low tide during winter 2000.

Toutefois, les eaux de la lagune de Smir présentent une bonne saturation en oxygène dissous et aucune sous-saturation n'a été détectée au cours de la période d'étude. Ceci peut être expliqué par les échanges permanents avec la mer par le biais de la marée, par l'abondance assez remarquable de la végétation dans les marais et par le développement des algues et des phanérogames dans la lagune. Pourtant, les courbes d'isoteneurs en oxygène dissous (figure 6) se superposent de façon frappante avec les isothermes (figure 4) même si la température reste élevée, car toute la zone qui s'étend jusqu'au goulet, est occupée par une prairie dense de phanérogames qui enrichissent le milieu en oxygène et peuvent contribuer à des sursaturations. L'intérieur de la lagune faiblement couvert de végétation montre des valeurs relativement faibles en oxygène dissous. En plus de l'activité photosynthétique des végétaux chlorophylliens, la faible profondeur et le brassage continu des eaux lagunaires par les courants de marée expliquent les sursaturations en oxygène dissous parfois rencontrées dans la lagune, surtout dans la partie aval en comparaison avec les teneurs en oxygène dissous au niveau de la lagune de Nador qui oscille autour de 7,14 mg/l en moyenne (MENIOUI & ZINE, 2001). Les variations obtenues sont aussi influencées par les rythmes saisonniers et nycthémeraux qui sont particulièrement marqués en milieux relativement fermés, peu profonds et riches en biomasse végétale.

L'évolution du pH au sein de la lagune paraît être intimement liée à celle de l'oxygène dissous et de la température de l'eau (figures 4, 6 et 8). Ils montrent des schémas comparables de répartition témoignant de l'influence des marais sur l'hydrologie de la lagune. Le pH y varie entre 8 et 9 indiquant une alcalinité assez prononcée des eaux de la lagune. Ces valeurs sont très élevées par rapport à celles enregistrées par AKSISSOU en 1989 (pH varie de 7,3 en janvier à 8,2 en septembre). Cette tendance très nette vers l'alcalinité est due d'une part à l'entrée en permanence des eaux de mer. D'autre part, à l'arrêt de l'avènement des eaux douces par l'oued Smir endigué par le barrage situé en amont.

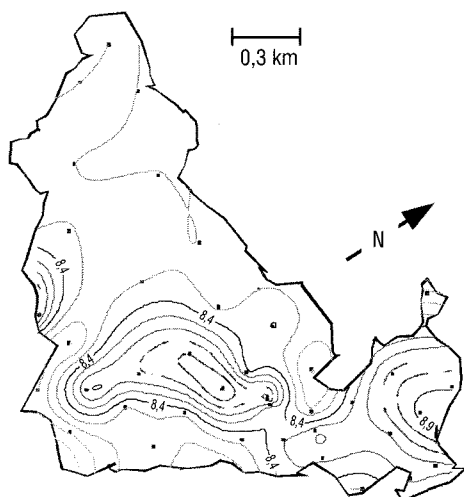


Figure 8 Distribution des courbes d'isovaleurs du pH dans la lagune au cours du jusant en été 2000.

Distribution of pH isovalue curves in the Smir lagoon at low tide during summer 2000.

La mesure de la température interstitielle à 5 cm de profondeur permet de dégager les différentes variations journalières et saisonnières auxquelles est soumise la macrofaune benthique. Au terme de cette étude, la température de l'air et celle des eaux venant des marais se transmettent relativement bien au niveau du sédiment pour lequel la répartition de la température se superpose avec la répartition des isothermes de l'eau avec des températures variant de 14 à 28 °C. L'intérieur de la lagune présente des températures largement différentes de celles relevées à proximité du goulet.

La température de l'eau, dans l'écosystème lagunaire, montre toujours des valeurs supérieures à celles de la température interstitielle. La non-installation d'un gradient thermique au niveau de l'eau en période estivale (septembre) conjointement avec celui installé au niveau du sédiment est le résultat du brassage des masses d'eau généré par les vents forts soufflant de l'est (Chergui) en cette même période de l'année, d'une part, et des activités de photosynthèse intenses en rapport avec les développements algaux, d'autre part.

3.2 Échanges avec la mer et le continent

Au flot, les eaux marines euhalines pénètrent par le goulet et envahissent toute la lagune en refoulant vers l'intérieur les masses d'eaux lagunaires n'ayant pu s'écouler hors de la lagune pendant le jusant. Ces dernières se mélangent et leurs salinités s'homogénéisent et atteignent des valeurs voisines à celle de la mer (36,3 PSU). Ces eaux venant de la mer (figure 9) sont aussi froides (12 °C en hiver et 16 °C au printemps). Elles s'étalent dans cette cuvette de faible profondeur et se réchauffent sous l'action du fort ensoleillement et du brassage avec les eaux chaudes descendues des marais lors du jusant.

Le pH et l'oxygène dissous (figure 9) montrent des évolutions parallèles avec la température. Ils indiquent des valeurs caractéristiques des eaux marines et qui varient de 7,9 à 8,3 et de 8,5 à 12 mg/l respectivement.

Au jusant, les eaux traversant le goulet sont plus salées et plus chaudes que celles qui l'ont traversé au flot. Ce qui revient à dire qu'au jusant, toute l'eau de mer entrée dans la lagune en ressort, et se trouve suivie par ces masses d'eau sursalées. En plus de l'ensoleillement, le réchauffement des eaux est assuré par l'apport du chenal qui véhicule des eaux bien chaudes et relativement oxygénées soumises à une photosynthèse intense et bien salées à la suite de l'évaporation dans les marais limitrophes.

Une partie des masses d'eau chaudes venant de l'intérieur de la lagune se refroidissent pendant leur parcours vers l'extérieur et entrent en contact avec les eaux froides marines. Ceci contribue quelquefois à une diminution de la température. Au reflux, l'oxygène et le pH suivent la même tendance que la température. Ils affichent des maxima respectivement de 8,8 et 12,9 mg/l en automne avec des températures maximales correspondantes de l'ordre de 19,3 °C et qui atteignent 26,1 °C en été.

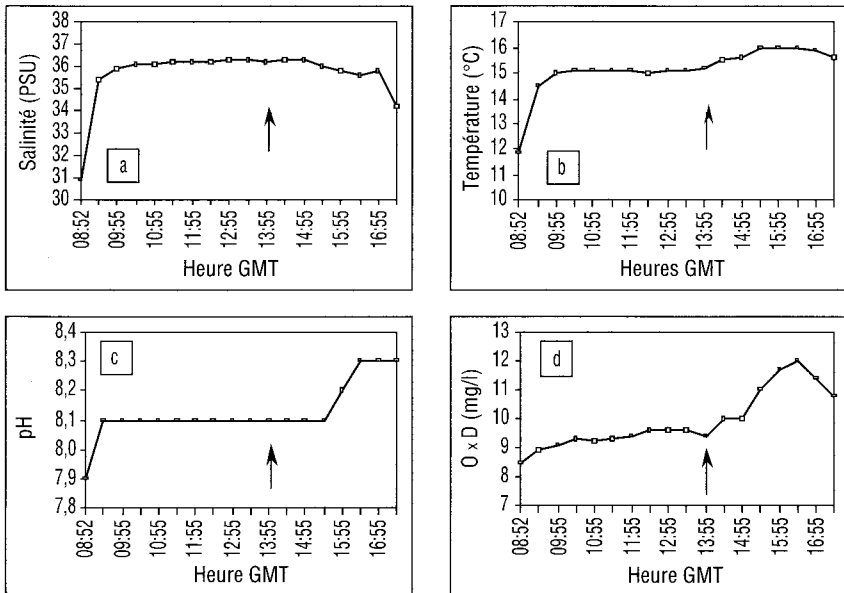


Figure 9 Évolution des paramètres physico-chimiques au niveau de la station Pont au cours d'un cycle de marée en janvier 2000. La flèche ascendante indique l'étale de pleine mer.

Changes in physicochemical parameters at the "Pont" station during a tidal cycle in January 2000. The ascending arrow indicates the high tide peak.

De l'analyse des données du suivi de mai (figure 10), il ressort que les variations des paramètres hydrologiques sont conditionnées par l'importance des apports continentaux débités par le chenal des marais en périodes humides (automne) qui contrecarrent l'envahissement de l'amont de la lagune et des marais d'une part par les eaux poly-euhalines du flot. D'autre part par les courants de marée en périodes sèches (été). Ces derniers tendent à envahir toute la lagune, remonter très haut le cours du chenal jusqu'à 2 à 3 km de son débouché dans la lagune et gagner de plus en plus d'espaces sur les marais.

Pendant le reflux (figure 10), le chenal achemine des eaux oligohalines (salinité entre 3,7 et 4,5 PSU) avec des conductivités variant entre 6,9 et 8,0 ms/cm. Ces eaux relativement chaudes ont une température moyenne de 20 °C, de faibles alcalinités ($7,6 < \text{pH} < 7,8$) et sont faiblement oxygénées (3,7 à 6,5 mg/l). Elles se mélangent avec les eaux poly-euhalines de la lagune et constituent les eaux chaudes mésohalines. Ces eaux occupent toute la zone du débouché du chenal principal et avancent dans la lagune pour donner naissance aux eaux polyhalines dans les parties aval et centrale. Les eaux marines euhalines parcourent toute la lagune, se réchauffent et s'oxygènent au moyen de la photosynthèse. Elles repoussent les eaux bloquées dans la partie amont de la lagune vers le haut du chenal principal. Une fois mélangées avec ces dernières, elles augmentent leur salinité de 8,3 à 19,2 PSU et leur température de 22,5 à 24,3 °C (figure 10). Elles conquièrent progressivement les parties intérieures des marais.

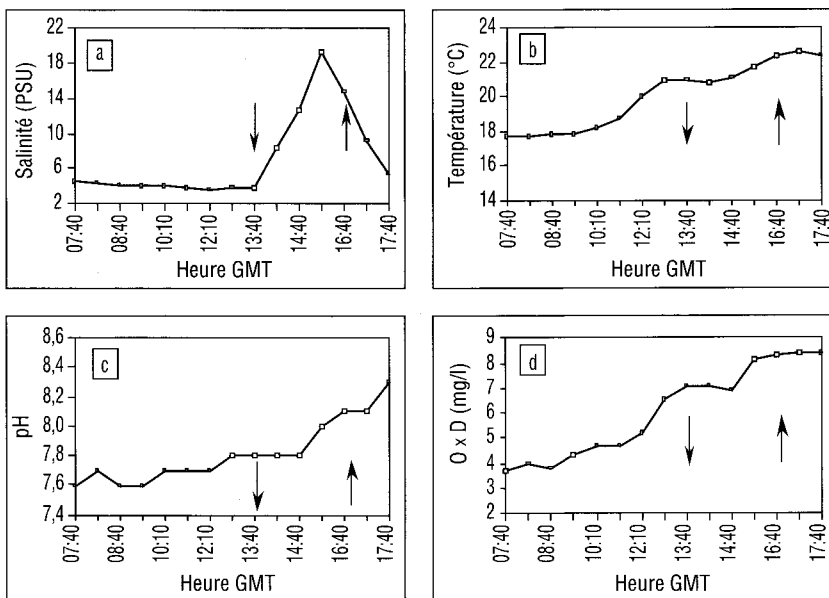


Figure 10 Évolution des paramètres physico-chimiques au niveau de la station « Chenal » au cours d'un cycle de marée en mai 2000. Les flèches ascendante et descendante indiquent respectivement les étales de pleine mer et de basse mer.

Changes in physicochemical parameters at the "Chenal" station during a tidal cycle in May 2000. The ascending and descending arrows indicate the peaks of high and low tides, respectively.

L'augmentation de la température avec la baisse conjointe de la salinité pourrait être expliquée par la descente des eaux oligohalines par le chenal des marais qui se trouve engorgé d'eau en hiver à la suite des éventuelles précipitations. Les eaux euhalines seront donc remplacées par des eaux polyhalines au niveau de la lagune. Ceci vient en accord avec la constatation faite par BEAUBRUN (1976) dans la lagune de Moulay Bouselham en cette même période et durant les marées de mortes eaux.

Les évolutions du pH et de l'oxygène dissous au niveau du chenal, suivent les mêmes évolutions que la température (figure 10) tout en accusant des amplitudes assez importantes et qui varient en fonction de la saison (CHAOUTI, 2003). En effet, elles sont maximales en été et faibles en automne.

Pour les étales de basse mer, le retard enregistré au niveau de la lagune varie de 1 h et 45 min (printemps) jusqu'à 3 heures (automne) et de 45 minutes (hiver) à 1 h et 44 min (printemps) pour la pleine mer par rapport aux horaires officiels de l'annuaire des marées pour le port de Casablanca. C'est-à-dire, pour se vidanger, la lagune met plus de temps que lorsqu'elle se remplit, surtout pendant les marées de vives eaux. Ce constat s'est concrétisé pendant le suivi journalier des niveaux de marées (figure 11). Pour le chenal principal, le retard à marée basse par rapport à celle théorique donnée par l'annuaire des

marées, atteint 6 h et 12 min et il est de 3 heures à marée haute. Il représente au moins le double du retard relevé au niveau de la lagune. Les étales de marées n'y durent que quelques minutes (5 à 10 minutes) alors qu'au niveau du chenal, elles sont encore très rapides et ne dépassent guère 5 minutes.

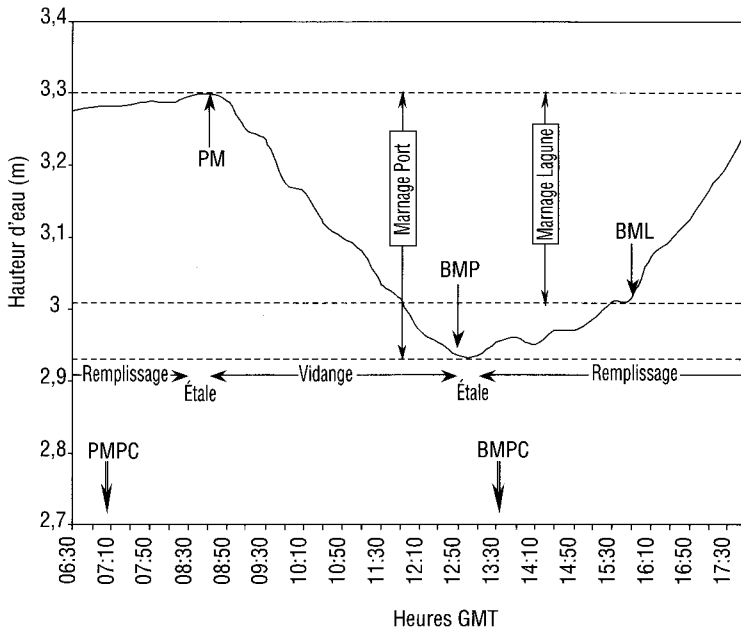


Figure 11 Variations du niveau d'eau enregistrées au milieu du port de plaisance de Kabila pendant une marée de vives eaux. Les flèches doubles indiquent les heures de pleines mers (PMPC) et de basses mers (BMPC) pour le port de Casablanca. Les flèches simples indiquent ces mêmes horaires observés lors des mesures de niveaux d'eau sur terrain. BMP : marée basse dans le port ; BML : marée basse pour la lagune ; PM : pleine mer observée dans la lagune et le port.

Water level variations recorded at the port of 'Kabila' during a spring tide.

The double arrows indicate the times of high tide (PMPC) and of low tide (BMPC) for the "Casablanca" port. The simple arrows indicate the same timetables observed during the measures of water levels on land. BMP: low tide at the port; BML: low tide for the lagoon; PM: high tide observed at both of the lagoon and the port.

De même, il en ressort que les courants du flot et du jusant apparaissent à la suite d'une étale brève d'à peu près 10 minutes. Les deux étales sont séparées d'une durée de 4 h et 20 min au niveau du port et de 7 h et 10 min dans la lagune. Ce fait dénote un décalage horaire pour la marée basse entre le port et la lagune qui est en relation avec la différence de niveau entre les deux compartiments et avec l'exiguïté du goulet. En effet, la lagune se trouve à un

niveau plus élevé à celui du port. L'eau, en revanche, pénètre par la forte poussée du flot marin avec une remontée simultanée du niveau d'eau dans le port et la lagune. Ceci minimise le retard et favorise une seule et même étale de pleine mer. Par contre, au jusant, le volume d'eau assez appréciable entré pendant le courant du flot dans la lagune, n'arrive pas à être facilement évacué par l'ouverture très étroite du goulet. Ceci explique en quelque sorte, le retard de trois heures pour la basse mer noté dans la lagune par rapport à celle observée dans le port de plaisance. Cette différence de niveaux engendre aussi une différence de marnage qui est inférieure à 0,5 m en automne 2000 (CHAOUTI, 2003) ; il est de 0,37 m au niveau du port et de 0,28 m au niveau de la lagune. Ces deux valeurs de marnages enregistrées à Smir restent bien moindres par rapport au port de Casablanca qui est de l'ordre de 1,90 m.

4 – CONCLUSIONS

À côté de la variation spatiale des paramètres physico-chimiques, il existe une variabilité temporelle traduite par un maximum en été et un minimum en hiver. Les gradients de salinité et température s'inversent entre l'amont et l'aval de la lagune en fonction des marées, des saisons et des apports d'eaux douces (pluies et lâchers de barrage). Après les aménagements, l'hydrologie de la lagune de Smir est contrôlée par l'arrivée irrégulière des eaux du chenal principal des marais, l'avènement exceptionnel des eaux de l'oued Smir et l'entrée et la sortie des eaux marines en continu au gré des marées.

N.B. Ce travail est réalisé dans le cadre du projet MECO du programme INCO-DC financé par la Commission Européenne (Contract n° ERB IC118-CT98-0270).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AEFCS (Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols) (1996). *Plan Directeur des Aires Protégées du Maroc*. Groupement BCEOM-SECA Montpellier, France, Volume 3 : Les Sites d'Intérêt Biologique et Écologique du Domaine Littoral, 166 p.
- AKSISSOU M., 1989. Dynamique des populations de deux Talitridae du littoral septentrional du Maroc (*Talorchestia spinifera* M. dans l'estuaire du Sebou et *Orchestia gammarellus* P. dans le lac Smir). Th. Doct. Univ. Mohammed V, Rabat (Maroc), 202 p.
- AKSISSOU M., ELKAIM B., 1994. Biodémographie et dynamique d'une population d'*Orchestia gammarellus* (Crustacea, Amphipoda, Talitridae) du lac Smir du littoral méditerranéen du Maroc. *Acta oecologica*, 15 (5), 633-659.
- AKSISSOU M., ELKAIM B., 1996. Cycle reproducteur d'une population d'*Orchestia gammarellus* (Crustacea, Amphipoda) dans le lac de Smir (Maroc). *Mediterranea, Serie de estudios biológicos*, 5-11.
- BAYED A., CHAOUTI A., 2001. Caractérisation physico-chimique des eaux de la

- lagune de Smir en été. *Rapp. Comm. int., Mer Médit.*, 36, 356.
- BAYED A., EL AGBANI M.A., 2002. Les marais de Smir : un milieu fragile d'intérêt remarquable ; in SCAPINI F. : *Baseline research for the integrated sustainable management of Mediterranean sensitive coastal ecosystems. A manual for coastal managers, scientists and all those studying coastal processes and management in the Mediterranean*, Istituto Agronomico per l'Oltremare : 98-106.
- BAYED A., CHAOUTI A., 2004. Impact des aménagements sur l'équilibre et le fonctionnement de la lagune et les marais de Smir dans le nord-ouest du Maroc. Travaux de l'Institut Scientifique, Série Générale, n° 2 (sous presse).
- BAZĀĪRI H., BAYED A., GLEMAREC M., HILY C., 2003. Spatial organisation of macrozoobenthic communities in a response to environmental factors in coastal lagoon of the NW African coast (Merja Zerga, Morocco). *Oceanologica Acta*, 26: 457-471.
- BEAUBRUN P.C., 1976. La lagune de Moulay Bouselham. Étude hydrologique et sédimentologique. *Bull. Inst. Sci.*, Rabat, 1, 5-38.
- BEKKALI R., 1987. Les ostracodes du lac Smir (Maroc Nord-Occidental). Th. Doct. Univ. Mohammed V, Rabat (Maroc), 165 p.
- CHAMORRO-MORENO S., BENHAMU-BARCHILON C., ACEVIDO-RUIZ R., BARRANCO-RODRIGUEZ P., BERROCAL-GRIMALDI J., CASANOVA-MESA A., MONTERO-RODRIGUEZ A., RODRIGUEZ-GONZALEZ J., VELLASCO-GUALLAR R., VILLADA-DOAZ G., VILLANUEVA-DOMINIGUEZ D., 1995. Algunas características fisicoquímicas de las aguas del Smir y sus cuencas colindantes. Laboratorio de salud Ambiental del IES. "Siete Colinas", Avenida de Africa SN. 11702 CEUTA, *Rapport Scientifique*, 19 p.
- CHAOUTI A., 2003. Biotypologie du macrozoobenthos de la lagune méditerranéenne de Smir : Analyses spatiale et spatio-temporelle. Th. Doct. Univ. Mohammed V, Rabat (Maroc), 302 p.
- CHAOUTI A., BAYED A., BENAZZOU T., 2001. Données préliminaires sur la diversité spécifique et fonctionnelle du zoobenthos de la lagune de Smir (Maroc). *Rapp. Comm. int., Mer Médit.*, 36, 372.
- CHBICHEB A., 1996. Organisation biogéologique d'un bassin paraliq : la lagune de Oualidia (côte atlantique marocaine). Thèse Doctorat 3^e cycle, Université de Nantes, Nantes (France) : 167 p.
- EL AGBANI M.A., DAKKI M., 2004. Valeurs ornithologiques du complexe des marais de Smir (Nord du Maroc) et impact des aménagements hydroliques sur l'avifaune. Travaux de l'Institut Scientifique, Série Générale, n° 2 (sous presse).
- LEFEBVRE A., GUÉLORGET O., PERTHUISOT J.P. DAFIR J.E., 1997. Évolution biogéologique de la lagune de Nador (Maroc) au cours de la période de 1982-1993. *Oceanologica Acta*, 20, 2 : 371-385.
- MENIOUI M., ZINE N.E., 2001. État des connaissances sur la biodiversité (faune benthique) d'une lagune méditerranéenne : lagune de Nador. *Rapp. Comm. int. Mer Médit.* 34 : 83.
- POSTMA H., 1969. Chemistry of coastal lagoons. In « *lagunas costeras* », AYALACASTANARES A. and PHLEGER F.B. [Ed.], Simposio, Mem. Simp. Inter. Lagunas costeras, UNAM /UNESCO, November 28-30, 1969, Mexico, 421-430.
- STITOU EL MESSARI J.E., PULIDO-BOSCH A., 1995. Impacts anthropiques sur l'aquifère alluvial de Smir (Tétouan, Maroc). *Hydrogéologie*, 3, 39-46.