

Hydrologie

ÉTUDE DE LA QUALITÉ DES EAUX ET DES SÉDIMENTS DE LA BAIE DE DAKHLA AU MAROC. QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE ET CONTAMINATION MÉTALLIQUE

par

Mimouna ANHICHEM^{1,2}, Mina DELLAL¹, Rachid CHFIRI¹,

Ahmed YAHYAOUÏ² et Samir BENBRAHIM¹

La baie de Dakhla fait partie des milieux paraliques les plus importants au Maroc, tant par sa superficie que par sa richesse halieutique. Elle représente un écosystème à forte potentialité en termes d'aquaculture, notamment la conchyliculture ; De plus, elle est caractérisée par de vastes plages et des vents permanents, favorables au développement des sports nautiques. Ce domaine marin, si riche en faune et en flore, joue un rôle socio-économique important pour le Maroc. Le développement d'activités humaines aux alentours de la baie rend ce biotope exposé aux pressions anthropiques liées notamment à la pêche, au tourisme et à l'urbanisme. Ceci impose un engagement pour sa protection et la préservation de ses ressources naturelles inestimables.

La présente étude contribue à l'évaluation de l'impact de ces différentes activités à travers l'étude de la qualité physico-chimique des eaux et des sédiments de la baie. Pour ce faire, un suivi spatial et temporel des paramètres physicochimiques et métalliques indicateurs de pollution a été mené entre mai 2014 et mars 2015.

Les principaux descripteurs physicochimiques de la qualité des eaux ont été suivis, à savoir : température, salinité, pH, O₂ dissous, éléments nutritifs (ammonium, nitrites, nitrates, phosphates) et chlorophylle (a). Une qualification des eaux de la baie a

1. Laboratoire de chimie de l'Institut National de Recherche Halieutique (INRH), 2, bd Sidi Abderrahmane, Ain Diab, Casablanca, Maroc.

2. Faculté des sciences, Université Mohammed V de Rabat, Maroc.

Auteur correspondant : Mimouna Anhichem (anhichemm@gmail.com).

Autres auteurs : Mina Dellal (delamina@gmail.com) ; Rachid Chfiri (ra.chfiri@gmail.com) ; Ahmed Yahyaoui (yahyaoui.ahmed@gmail.com) ; Samir Benbrahim (benbrahim@inrh.ma).

Bulletin de la Société zoologique de France 142 (4)

été dressée en se basant sur des grilles d'évaluation de la qualité des eaux (DCE - Directive 2000/60/CE).

La qualité des sédiments a été appréciée à travers la détermination de la granulométrie, la teneur en carbone organique total et les teneurs des principaux éléments de traces métalliques (cadmium, plomb, mercure, chrome, cuivre et zinc).

Les résultats ont permis d'établir une grille de qualité des eaux de la baie, qualifiées en général de « Bonne », excepté pour les sites situés à proximité de la zone urbaine pour lesquels la qualité est qualifiée de « Moyenne ».

La qualité du sédiment de la baie a été évaluée selon les critères établis par le Conseil des ministres de l'environnement canadien (CMEC, 2007). Les teneurs en éléments de traces métalliques restent inférieures aux seuils de toxicité, sauf pour les sédiments prélevés au niveau du bassin portuaire.

Mots-clés : Baie de Dakhla, sédiments, contaminations, paramètres hydrologiques, métaux, toxicité.

Study of the water and sediment quality of Dakhla Bay (Morocco). Physico-chemical quality and metal contamination

The Dakhla Bay is one of the most important paralic environments in Morocco, both in terms of area and fishery resources. It represents an ecosystem with high potential in terms of aquaculture, especially shellfish aquaculture. Moreover, it is characterized by vast beaches and permanent winds, favourable to the development of water sports. This marine domain, so rich in fauna and flora, plays an important socio-economic role for Morocco. The development of human activities in the vicinity of the bay makes this biotope exposed to anthropogenic pressures linked in particular to fishing, tourism and town planning. This imposes a responsibility for its protection and the preservation of its invaluable natural resources.

The present study contributes to the evaluation of the impact of these different activities through the study of the physicochemical quality of the waters and sediments of the bay. To do this, spatial and temporal monitoring of the physicochemical and metallic indicators of pollution was carried out between May 2014 and March 2015.

The main physicochemical descriptors of water quality were monitored: temperature, salinity, pH, dissolved O₂, nutrients (ammonium, nitrites, nitrates, phosphates) and chlorophyll (a). An evaluation of the waters of the bay was drawn up on the basis of water quality assessment grids (DCE - Directive 2000/60/CE).

The quality of the sediment was assessed by determining its particle size, the total organic carbon content and the contents of the main trace elements (cadmium, lead, mercury, chromium, copper and zinc).

The results were used to establish a quality scale for the waters of the bay, generally qualified as "good", except for sites near the urban area for which the quality is qualified as "average".

The quality of sediment in the bay was assessed according to criteria established by the Canadian Council of Ministers of the Environment (CMEC, 2007). Metallic trace elements remain below the toxicity thresholds except for sediments taken from the port basin.

Keywords: Dakhla Bay, sediment, contamination, hydrological, metallic, toxicity.

Qualité des eaux et des sédiments de la baie de Dakhla au Maroc

Introduction

Les milieux paraliques constituent un espace de transition entre les écosystèmes continentaux et marins. Il s'agit des zones d'échange et de transfert d'énergie et de matières nutritives, très favorables au développement d'un foisonnement biologique.

Ces milieux sont donc les zones marines les plus importantes, mais également les zones les plus vulnérables. Ils présentent une dynamique extrêmement complexe, influencés par l'océan ouvert et le milieu terrestre, et souvent perturbés par les activités humaines (CHABAUD, 2013).

La richesse biologique du littoral marocain est liée à la présence d'un grand nombre de zones paraliques, tels les estuaires, les lagunes et les baies. Ces derniers font l'objet de convoitises, malgré leur fragilité nécessitant une gestion particulière.

La baie de Dakhla est considérée comme l'une des plus importantes au Maroc, tant par sa superficie que par sa richesse halieutique. Elle représente un écosystème à forte potentialité en termes d'aquaculture, notamment la conchyliculture. De plus, elle est caractérisée par de vastes plages et des vents permanents, favorables au développement des sports nautiques.

Ce domaine marin, si riche en faune et en flore, joue un rôle socio-économique important pour le Maroc et impose par conséquent un engagement pour sa protection et la préservation de ses ressources pour les générations futures.

La baie est soumise à de nombreuses pressions anthropiques notamment depuis la mise en service du port de Dakhla en 2001 et l'extension des activités industrielles liées à la pêche, l'aquaculture et au tourisme. Ces différentes activités invitent à se questionner quant à leurs impacts négatifs éventuels sur l'écosystème de la baie et son équilibre.

L'objectif de la présente étude est de réaliser un diagnostic de l'état de « santé » de la baie de Dakhla. L'évaluation de la contamination a porté sur des indicateurs de qualité de l'eau et des sédiments. Les principaux descripteurs physicochimiques de la qualité des eaux, à savoir : température, salinité, pH, O₂ dissous, éléments nutritifs (ammonium, nitrites, nitrates, phosphates) et chlorophylle (a) ont été suivis. La qualité des sédiments a été appréciée au travers la détermination de la granulométrie, la teneur en carbone organique total, les teneurs des principaux éléments traces métalliques (cadmium, plomb, mercure, chrome, cuivre et zinc). Une qualification des eaux et des sédiments de la baie a été dressée en se basant, successivement, sur les grilles d'évaluation issues de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE-Directive 2000/60/CE) et Critères de qualité des sédiments marins selon le Conseil des ministres de l'environnement canadien (CMEC, 2007).

Matériel et méthodes

Zone d'étude

La baie de Dakhla est située sur le littoral atlantique du sud marocain. Longue de 37 km et large d'environ 13 km, la baie est relativement étroite et ouverte au sud sur l'océan. Orientée NE-SW, elle est limitée du côté de l'océan atlantique par la péninsule de Oued Ad Dahab, formée de dunes sableuses (Figure 1).

La baie de Dakhla est classée en Site d'Intérêt Biologique et Écologique (SIBE), en Zone d'Importance Internationale pour la Conservation des Oiseaux (ZICO) et en site RAMSAR (site reconnu comme zone humide d'importance inter-



Figure 1

Carte de localisation de la Baie de Dakhla (CRTS-INRH).

Location of Dakhla Bay (CRTS-INRH).

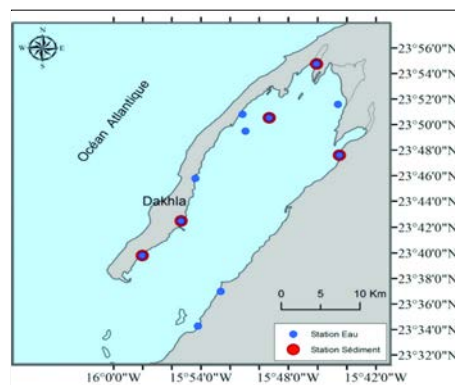


Figure 2

Carte de localisation des stations d'échantillonnage sur la Baie de Dakhla.

Location of sampling stations in Dakhla Bay.

Tableau 1

Localisation géographique des stations échantillonnées dans la baie de Dakhla pour le compartiment eau.

Location of sea water sampling stations in Dakhla Bay.

	Stations	Coordonnées géographiques	
Station 1	PK25(1) (Lahrigua)	23°54',746- N	15°46',060 W
Station 2	PK25(2) (Snitir)	23°51',589-N	15°44',591 W
Station 3	Boutalha (G Palourde)	23°50',543 N	15° 49',309 W
Station 4	Boutalha (G Huître)	23°50',811 N	15°51',143 W
Station 5	Boutalha (HF)	23°49',487 N	15° 50', 952 W
Station 6	Dunablanca	23°47',605 N	15°44',492 W
Station 7	Zone urbaine Nord/Camping	23°45',783N	15°54',381W
Station 8	Zone urbaine (centre ville)	23°42',513N	15°55',357W
Station 9	Lasargua	23°39',787N	15°58',025W
Station 10	El Argoub	23°36',983N	15°52',648W
Station 11	Puertitou	23°34',266 N	15°54',210W

Qualité des eaux et des sédiments de la baie de Dakhla au Maroc

Tableau 2

Localisation géographique des stations échantillonnées dans la baie de Dakhla pour le compartiment sédiment.
Location of sediment sampling stations in Dakhla Bay.

	Stations	Coordonnées géographiques	
Point 1	PK25 (Lahrigua)	23°54',746- N	15°46',060 W
Point 2	Dunablanca	23°47',605 N	15°44',492 W
Point 3	Boutalha (G Palourde)	23°50',543 N	15° 49',309 W
Point 4	Zone urbaine (centre ville)	23°43',816N	15°54',861W
Point 5	Bassin Portuaire	23°39',560N	15°56',752 W

nationale) (RAMSAR, 2016). Unique en son genre en Afrique du Nord, elle constitue à la fois un relais de migration et une zone d'hivernage et de nidification pour des milliers d'oiseaux d'eau (QUINBA *et al.*, 2003) (Tableau 1).

Points d'échantillonnage et fréquence de prélèvements

Les sites d'échantillonnage ont été sélectionnés de manière à couvrir la totalité de la baie, en particulier les zones influencées par les activités humaines (ex. pêche, aquaculture, tourisme, urbanisme). En ce qui concerne le compartiment eau, onze stations ont été sélectionnées. L'échantillonnage s'est réalisé à périodicité saisonnière entre mai 2014 et mars 2015. Au total quatre campagnes de collecte d'échantillons et de mesures ont été réalisées. Quant aux sédiments, l'échantillonnage a concerné cinq stations et s'est déroulé pendant l'hiver 2015. La figure 2 et le tableau 2 présentent la localisation des sites d'étude.

Échantillonnage et analyse

Compartiment Eau

Les paramètres physiques (température, salinité et pH) ont été mesurés *in situ* à l'aide d'une sonde multi-paramètres portative de marque WTW LF 197 (précision de 0,1 unité).

L'oxygène dissous a été déterminé par la méthode chimique de Winkler, l'échantillonnage a été effectué dans des flacons spéciaux en verre avec bouchons rodés de volume connu. La fixation de l'oxygène se fait sur place par l'addition des réactifs. La méthode est conçue pour isoler l'échantillon de l'air et fixer l'oxygène dissous aussi rapidement que possible par réaction avec un précipité d'hydroxyde de manganèse formé dans l'échantillon. Grâce à une succession de réactions, on obtient au final une solution d'iode, aisément dosable avec précision, de concentration proportionnelle à celle de l'oxygène initialement présent. Les résultats sont exprimés en mg/l (AMINOT & KEROUEL, 2004).

Les échantillons d'eau destinés à l'analyse des éléments nutritifs (ammonium, nitrites, nitrates, phosphates) ont été prélevés en sub-surface à environ 0,5 m de profondeur dans des flacons en polyéthylène propres préalablement rincés avec de l'eau

Bulletin de la Société zoologique de France 142 (4)

à analyser. Les flacons ont par la suite été conservés à l'abri de la lumière dans des glacières à une température d'environ 4°C puis transportés au laboratoire pour analyse. Les nutriments ont été dosés par colorimétrie selon les protocoles décrits par (AMINOT & KEROUËL, 2004).

Pour le dosage de la chlorophylle (a), un litre d'eau a été filtré dès l'arrivée au laboratoire, sous vide sur membrane (filtre Whatman GF/C de 47 mm). Les filtres sont ensuite plongés dans un solvant (une solution d'acétone à 90 % de volume 10 ml) pour dissoudre la chlorophylle. La biomasse chlorophyllienne (teneur en chlorophylle (a) en $\mu\text{g.l}^{-1}$) a été estimée par spectrophotométrie (AMINOT & KEROUËL, 2004).

Compartiment sédiment

Les prélèvements de sédiments ont été effectués sur la couche superficielle en utilisant un carottier à main. Le contenu du carottier a été placé dans un sac en plastique alimentaire, transporté au laboratoire dans des glacières à environ 4°C, puis conservé au congélateur à -20°C jusqu'à l'analyse.

Analyse granulométrie

Après étuvages à 40°C, les échantillons de sédiments ont fait l'objet d'une analyse granulométrique classique. Un lavage d'une fraction de chaque échantillon a été effectué sur des tamis de mailles de 2 mm et de 0,063 mm afin de séparer les trois classes granulométriques suivantes (BELLAIR & POMEROL, 1977) :

- classe des « Rudites », dont le diamètre des particules est supérieur à 2 mm ;
- classe des « Arénites », dont le diamètre des particules est compris entre 2 et 0,06 mm ;
- classe des « Lutites », dont le diamètre des particules est inférieur à 0,063 mm.

Carbone organique total

La détermination du carbone organique total a été effectuée par titrage indirect selon la méthode de Walkley-Black. Celle-ci consiste en une oxydation du carbone organique par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique. Après la réaction, le dosage de l'excès de bichromate permet d'établir la concentration de carbone organique total. Le titrage se fait par sel de Mohr en utilisant le diphénylamine comme indicateur coloré (WALKLEY & BLACK, 1934).

Métaux traces

L'extraction des éléments traces métalliques (cadmium, plomb, mercure, chrome, cuivre et zinc) des sédiments a été effectuée par minéralisation à l'aide d'un four à micro-ondes en utilisant un mélange d'acides forts : HNO_3 -HF et HCl (OSPAR/JAMP, 2002).

Les solutions obtenues ont été analysées par Spectrométrie de Masse à Plasma (ICP-MS) de marque Thermo iCAP Q Series.

Qualité des eaux et des sédiments de la baie de Dakhla au Maroc

Un matériau de référence certifié (AIEA-158) et un blanc ont été analysés avec chaque série de minéralisation et sont utilisés pour le contrôle qualité et la fiabilité des résultats.

Traitement statistique des données

Dans le but de mettre en évidence les relations pouvant exister entre les facteurs environnementaux étudiés (paramètres physico-chimiques et la concentration métallique) et les activités menées au niveau de la baie, les données obtenues ont été traitées à l'aide du logiciel XLSTAT 2016.06.

Résultats

Température

Les valeurs des températures des eaux de surface enregistrées *in situ* durant la présente étude nous ont permis d'illustrer des variations spatio-temporelles de ce paramètre (Figure 3). La valeur moyenne enregistrée pour toute la zone fut de 21,8°C.

La plus grande amplitude thermique a été observée dans la station de Dunablanca avec un minimum de 16,5°C, enregistré en hiver 2015, et un maximum de 27,0°C, enregistré au printemps 2014. Cette variation est tout à fait normale vue la faible profondeur du bassin qui facilite les échanges air-eau.

Salinité

La salinité (Figure 4) varie de 33,0 à 40,5 ‰, avec une valeur moyenne de 36,9 ‰. Les résultats obtenus sont en parfait accord avec des travaux antérieurs (CTAQUA-CETECIMA, 2014) dans lesquels une salinité moyenne de 36,9 ‰ a été enregistrée pour toute la zone, avec un gradient croissant de l'océan vers le fond de la baie.

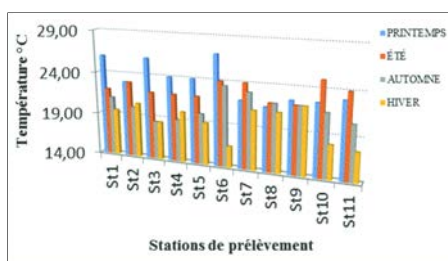


Figure 3

Évolution spatio-temporelle de la température au niveau de la baie de Dakhla.
Spatio-temporal evolution of the temperature at Dakhla Bay.

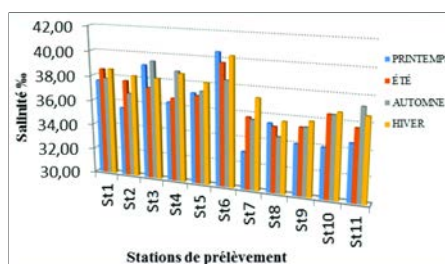


Figure 4

Évolution spatio-temporelle de la salinité au niveau de la baie de Dakhla.
Spatio-temporal evolution of salinity at Dakhla Bay.

Bulletin de la Société zoologique de France 142 (4)

La valeur maximale de 40,5 ‰ a été enregistrée durant le printemps 2014 au niveau du site de Dunablanca, dans lequel la température la plus élevée avait été enregistrée. Cette valeur s'expliquerait par la situation du site au fond de la baie, caractérisée par un renouvellement lent des eaux marines (ORBI *et al.*, 1996) et une faible profondeur favorisant une évaporation plus importante quand la température augmente. La valeur de 33,0 ‰ a été enregistrée durant le printemps 2014 dans la station de la zone urbaine. La dilution des eaux de mer par le rejet des eaux usées serait la principale source de la baisse de la salinité au niveau de ce point de prélèvement.

pH

Durant la présente étude les valeurs enregistrées pour le pH oscillent autour de 7,8 dans la zone urbaine à proximité des rejets et 8,3 dans la station de Lasargua, avec une moyenne de 8,0 durant les quatre saisons (Figure 5). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles rapportées dans des études antérieures menées sur la baie (DAFIR, 1997 et SAAD, 2015).

Oxygène dissous

Les concentrations en oxygène dissous enregistrées varient de 7,23 mg/l et 10,83 mg/l, avec une valeur moyenne de 8,74 mg/l (Figure 6).

Cette bonne oxygénation est due essentiellement, d'une part, aux courants intenses dans la partie sud de la baie où s'effectuent les forts échanges avec l'océan et, d'autre part, aux vents qui agitent les eaux superficielles.

Les plus faibles teneurs ont été enregistrées au niveau des stations 7 et 8. Toutefois, les taux d'oxygène restent au-dessus du niveau requis malgré la proximité de ces stations de rejets urbains.

Éléments nutritifs

Ammonium

La valeur maximale enregistrée dans la baie pour le paramètre ammonium atteint 0,31 mg/l et correspond à l'échantillon prélevé au point de la zone urbaine

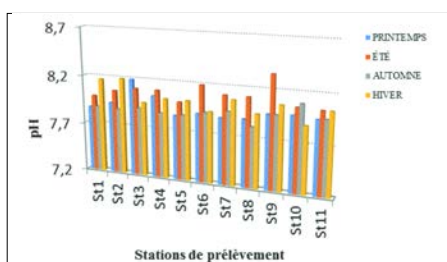


Figure 5

Évolution spatio-temporelle du pH au niveau de la baie de Dakhla.
Spatio-temporal evolution of the pH level in Dakhla Bay.

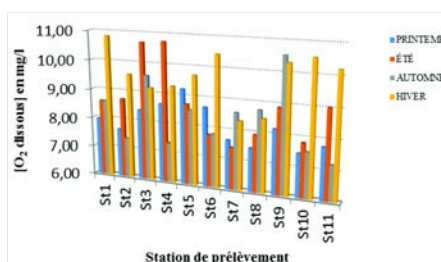


Figure 6

Évolution spatio-temporelle de l'oxygène dissous au niveau de la baie de Dakhla.
Spatio-temporal evolution of dissolved oxygen at Dakhla Bay.

Qualité des eaux et des sédiments de la baie de Dakhla au Maroc

(centre-ville), et la valeur minimale de 0,00 mg/l, avec une moyenne de 0,06 mg/l. L'ammonium est considéré comme la plaque tournante du cycle de l'azote dans les écosystèmes côtiers. Ses concentrations dans les eaux marines sont souvent inférieures à 0,01 mg/l, voire indétectables. L'ammonium constitue surtout un traceur de rejets urbains et industriels (SOUCHU *et al.*, 2001), l'élévation enregistrée pendant le printemps et l'été (Figure 7) est due essentiellement aux eaux usées en provenance de la zone industrielle, portuaire et de quelques émissaires situés dans le quartier urbain.

Par contre, l'absence de l'ammonium dans la plupart des stations pendant l'automne et l'hiver est liée à la chute de température qui ralentit les activités biologiques et probablement au débit des rejets urbains et industriels à proximité de la zone urbaine. Une autre étude sur la caractérisation de ces rejets est en cours de réalisation, en vue d'identifier leurs impacts sur la baie.

Nitrites

Les concentrations en nitrites dans la zone de notre étude oscillent autour d'un maximum de 0,04 mg/l et un minimum de 0,00 mg/l. La valeur moyenne de ce paramètre est de 0,01 mg/l (Figure 8).

La distribution spatiale des nitrites est dépendante de la proximité des stations étudiées de sources d'enrichissement du milieu par cet élément. On constate que la dominance est observée durant le printemps et l'été au niveau du point de la zone urbaine (centre-ville) soumis aux rejets urbains et industriels.

Nitrates

Les valeurs enregistrées pour les nitrates oscillent autour d'un maximum de 1,83 mg/l dans la zone urbaine, et un minimum 0,00 mg/l enregistré dans la plupart des stations notamment pendant l'automne et l'hiver, avec une moyenne de 0,12 mg/l (Figure 9). En effet, l'absence des ions nitrate dans la plupart des sites de la baie durant presque toute l'année n'est qu'un fort signal de l'importante activité biologique au sein de la baie. Pour la station « zone urbaine » qui a enregistré la valeur

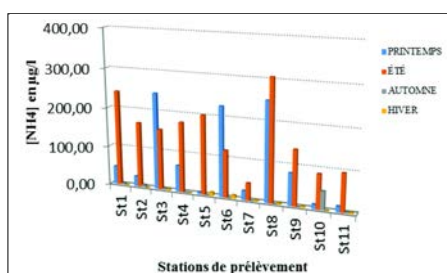


Figure 7

Évolution spatio-temporelle de l'ammonium au niveau de la baie de Dakhla.
Spatio-temporal evolution of ammonium at Dakhla Bay.

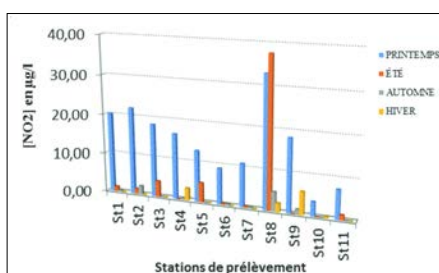
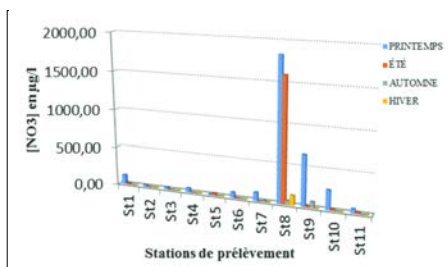


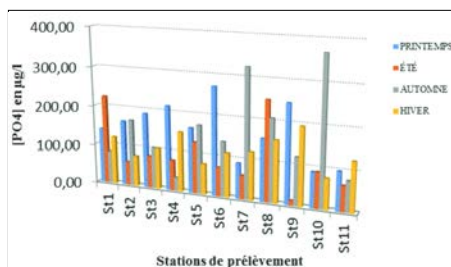
Figure 8

Évolution spatio-temporelle des nitrites au niveau de la baie de Dakhla.
Spatio-temporal evolution of nitrites at Dakhla Bay.

Bulletin de la Société zoologique de France 142 (4)

**Figure 9**

Évolution spatio-temporelle des nitrates
au niveau de la baie de Dakhla.
*Spatio-temporal evolution of nitrates
at Dakhla Bay.*

**Figure 10**

Évolution spatio-temporelle des phosphates
au niveau de la baie de Dakhla.
*Spatio-temporal evolution of phosphates
in Dakhla Bay.*

maximale, l'augmentation de cet élément durant presque toute l'année signifie un enrichissement du milieu par la matière organique qui se transforme, en présence des bactéries nitrifiantes et de l'oxygène, en nitrite puis en nitrates. Cette augmentation est certainement due aux apports des rejets qui sont à proximité de la zone.

Phosphates

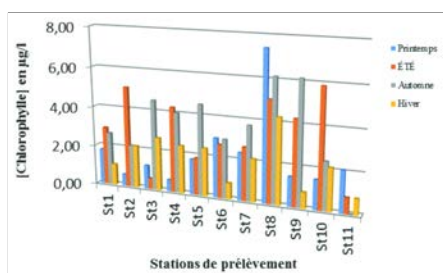
Pour le paramètre phosphates, les valeurs présentent un maximum de 0,37 mg/l, un minimum de 0,00 mg/l et une moyenne de 0,14 mg/l (Figure 10).

Les résultats des études antérieures ont montré que les teneurs en phosphates dans l'eau de surface ont été de l'ordre de 0,00 à 0,01 mg/l (ORBI *et al.*, 1995). Une tendance nette vers l'augmentation des teneurs en phosphates dans les eaux de la baie de Dakhla a été remarquée. Cette augmentation peut être due d'une part, aux activités liées à l'industrie de transformation des produits de pêche ainsi qu'aux rejets domestiques et, d'autre part, au phénomène d'upwelling qui caractérise la zone de Dakhla (MAKAOUI *et al.*, 2005).

Chlorophylle (a)

La figure 11 montre l'évolution de la concentration de la chlorophylle (a) durant la période d'étude, la valeur moyenne obtenue était de 2,74 µg/l, avec un minimum de 0,00 µg/l à « Puertitou » et une valeur maximale de 7,42 µg/l enregistrée dans la zone urbaine.

Ces résultats révèlent que les eaux de la baie de Dakhla ont des teneurs en chlorophylle (a) supérieures à celles rapportées par des études antérieures sur le même écosystème, qui ont montré que cette concentration ne

**Figure 11**

Évolution spatio-temporelle de la chlorophylle
(a) au niveau de la baie de Dakhla.
*Spatio-temporal evolution of chlorophyll (a)
at Dakhla Bay.*

Qualité des eaux et des sédiments de la baie de Dakhla au Maroc

dépasse pas 2,60 $\mu\text{g/l}$ en 1991 et 5,00 $\mu\text{g/l}$ en 1994 (ORBI *et al.*, 1995). La forte concentration enregistrée dans la présente étude correspond au site qui est à proximité de la zone urbaine, et qui subit un enrichissement en éléments nutritifs essentiels pour la prolifération chlorophyllienne.

Compartiment sédiment

Granulométrie

Dans la baie de Dakhla, les teneurs en Rudites sont variables dans les sédiments. Elles varient entre 0,60 % et 3,94 % du poids total de l'échantillon sec. Ces Rudites proviennent principalement de la fraction biogénique constituée de coquilles de lamellibranches et de coquilles de gastéropodes (ZIDANE *et al.*, 2008).

La répartition granulométrique des sédiments prélevés au niveau de la baie de Dakhla, montre une abondance des Arénites avec des pourcentages allant de 75,60 % à 98,28 % respectivement pour les sites du Bassin portuaire et Boutalha.

Ce résultat informe de l'aspect hydrodynamique de la baie et montre que les courants dans la partie aval sont plus forts que dans la partie amont.

Pour la fraction Lutites, les sédiments contiennent 1,56 % pour Boutalha et 22,01 % pour le bassin portuaire.

Le sédiment de la baie de Dakhla présente donc une texture granulométrique majoritairement sableuse et sablo-vaseuse (Figure 12).

Carbone organique

Durant la présente étude, les pourcentages enregistrés pour le carbone organique oscillent autour d'un minimum de 0,20 % à Boutalha et un maximum de 2,85 % dans le bassin portuaire (Figure 13).

L'examen des résultats de cette étude montre que le pourcentage de carbone organique augmente progressivement de la partie aval vers la partie amont. Nous constatons que le pourcentage de carbone organique suit la même évolution que la répartition des fractions fines de sédiment.

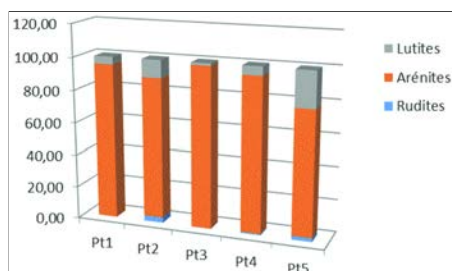


Figure 12

Évolution spatiale de la texture sédimentaire de la baie de Dakhla durant la période d'étude.
Spatial evolution of the sedimentary texture of Dakhla Bay during the study period.

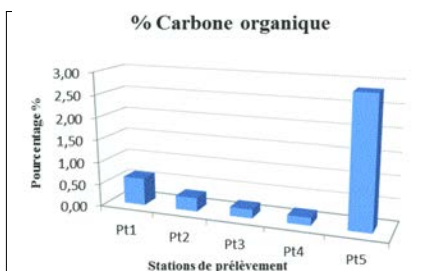


Figure 13

Répartition spatiale du carbone organique dans le sédiment de la baie de Dakhla.
Spatial distribution of organic carbon in the sediment of Dakhla Bay.

Bulletin de la Société zoologique de France 142 (4)

Le pourcentage de carbone organique du bassin portuaire est dix fois plus important que dans la baie, et ce du fait du confinement du bassin, d'une part, et des rejets chargés en matières organiques qui pouvaient être déversés dans le port, d'autre part.

Éléments traces métalliques

Les résultats de la majorité des éléments traces métalliques étudiés (cadmium, plomb, chrome, cuivre et zinc) enregistrent un minimum au niveau de la station Dunablanca, sauf pour le mercure pour lequel un minimum a été mesuré au niveau de la station de Boutalha. Par contre, le maximum a été enregistré, pour tous les éléments, au niveau du Bassin portuaire.

En ce qui concerne les trois métaux reconnus comme toxiques (Cadmium, Plomb, Mercure), les résultats enregistrés pour le Pb sont de l'ordre de $5,15 \pm 0,12$ et $16,69 \pm 0,25$ mg /kg successivement à Dunablanca et Zone urbaine alors qu'au niveau du bassin portuaire la concentration est de $45,58 \pm 0,61$ mg/kg. Pour les concentrations de Cd sont comprises entre $0,43 \pm 0,01$ et $0,62 \pm 0,01$ mg/kg respectivement à Dunablanca et Boutalha, dans le bassin portuaire la teneur est de $1,3 \pm$

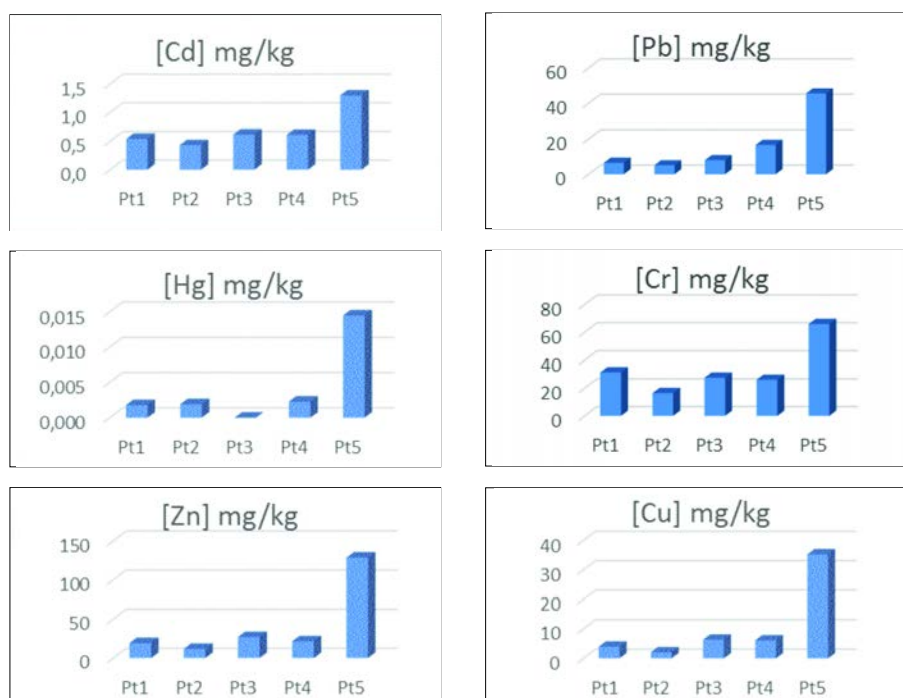


Figure 14

Évolution spatiale des métaux traces métalliques dans le sédiment de la baie de Dakhla.
Toutes les valeurs sont exprimées en milligrammes par kilogramme (mg/kg) de sédiments secs.
Spatial evolution of trace metals in the sediment of Dakhla Bay.
All values are in milligrams per kilogram (mg/kg) of dry sediment.

Qualité des eaux et des sédiments de la baie de Dakhla au Maroc

0,02 mg/kg. Les teneurs en mercure sont inférieures à la limite de détection pour Boutalha et de l'ordre de $0,0023 \pm 0,0001$ et $0,0145 \pm 0,0021$ mg/kg successivement à la Zone urbaine et le bassin portuaire (Figure 14).

Analyse statistique des résultats

Plus de 83 % de la variation de la totalité des paramètres étudiés est exprimée par les deux axes factoriels F1 et F2 de l'analyse en composantes principales (ACP), avec 58 % pour l'axe F1 et 25 % pour l'axe F2.

L'analyse en composantes principales montre que les paramètres (Nitrates et chlorophylle (a)) sont significativement corrélés au premier axe factoriel (axe F1) dans la zone urbaine tandis que les paramètres (Carbone organique total, phosphates et éléments traces métalliques) sont significativement corrélés au deuxième axe factoriel (axe F2) dans la zone portuaire.

L'analyse nous a permis de mettre en évidence que les zones abritant des agglomérations urbaines et le port sont les plus impactées (Figure 15).

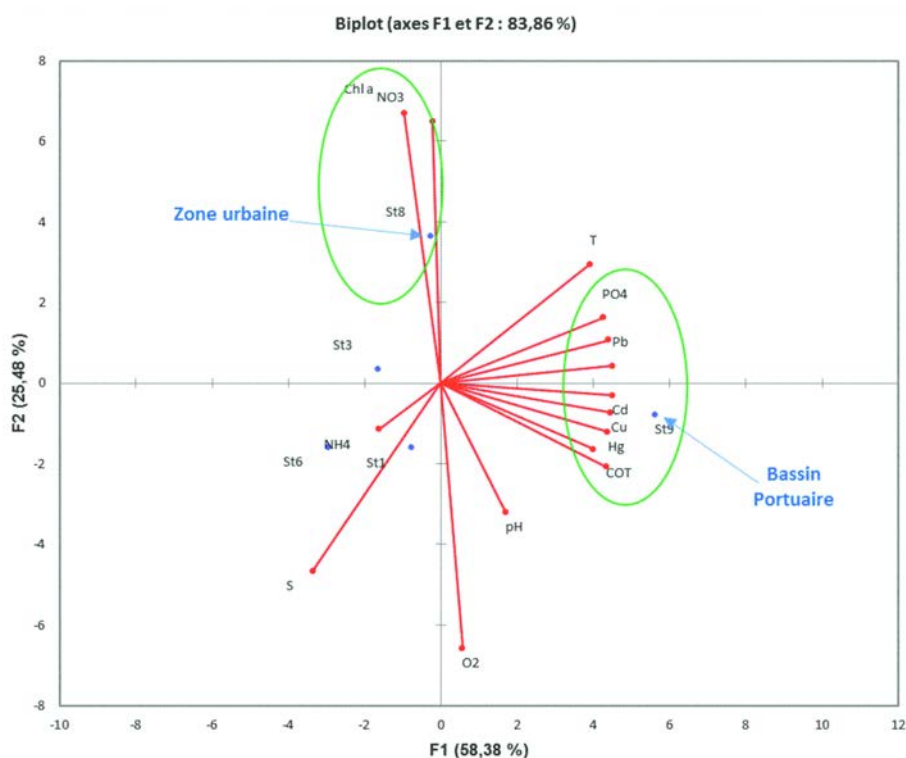


Figure 15

Résultats d'ACP produits par les variables étudiées au niveau de l'eau et du sédiment de la Baie de Dakhla.

PCA results for the variables studied for water and sediment of Dakhla Bay.

Discussions et conclusion

Qualité des eaux

Les apports anthropiques diffus ou ponctuels ont été à l'origine d'un enrichissement important en nutriments (phosphates et nitrates en l'occurrence). Ces apports sont de différentes origines : agricoles, industriels ou urbains. Leur « évacuation » ou « élimination » est liée à la capacité de dilution du système, à l'hydrodynamisme et à l'efficacité des processus de dégradation de ces éléments par les bactéries (SOUCHU *et al.*, 2001).

La mise en place de la DCE a été un moteur obligeant les États-membres à définir des indicateurs de qualité du milieu associés à des seuils de qualité. Ces indicateurs concernent l'oxygène dissous, les nutriments et le phytoplancton, qualifié entre autres au travers de la concentration en chlorophylle (a) (FOUSSARD *et al.*, 2011).

L'Ifremer a également défini courant 2010 un indicateur de qualité pour les masses côtières et de transition, l'indicateur nutriment proposé par (DANIEL *et al.*, 2010) intègre les concentrations d'azote inorganique dissous (NID) qui regroupent l'ammonium, les nitrates et les nitrites.

L'évaluation de la qualité des masses d'eaux étudiées, en se basant sur les différentes grilles de qualité proposées par la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE - Directive 2000/60/CE), nous a permis de classer les eaux de la baie de Dakhla de bonne qualité pour tous les paramètres physico-chimiques étudiés, mis à part les sites situés à proximité des rejets urbains qui ont une qualité moyenne (Tableau 3).

Tableau 3

Grille de qualité des eaux de la baie de Dakhla.
Water quality grid for Dakhla Bay.

REF	T	pH	O ₂ dissous (mg/l)	NID (mg/l)	Phosphates (mg/l)	Chlorophylle (a) µg/l
St1	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne
St2	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne
St3	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne
St4	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne
St5	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne
St6	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne
St7	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne
St8	Bonne	Bonne	Très bonne	Moyenne	Bonne	Bonne
St9	Bonne	Bonne	Très bonne	Moyenne	Bonne	Très bonne
St10	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne
St11	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Très bonne	Très bonne

Qualité des eaux et des sédiments de la baie de Dakhla au Maroc

Qualité du sédiment

Les sédiments sont la mémoire des événements hydro-sédimentaires et constituent à la fois un lieu d'accumulation et d'émission des polluants. Toute évolution des quantités ou de la nature des apports (terrigènes, industriels et urbains) dans l'environnement est enregistrée dans les sédiments (BELIAFF *et al.*, 2011).

Le Conseil canadien des ministres de l'environnement a établi, pour les sédiments marins, deux valeurs de référence pour les éléments traces métalliques. Ces valeurs de référence sont définies par une Concentration Seuil produisant un Effet (CSE) et une Concentration produisant un Effet Probable (CEP). Ces deux valeurs de référence ont été retenues parmi les nouveaux critères de qualité des sédiments, mais ne suffisent pas à déterminer tous les seuils nécessaires à la gestion des sédiments. Trois autres critères de qualité ont donc été définis plus tard, il s'agit de la Concentration d'Effets Rares (CER), la Concentration d'Effets Occasionnels (CEO) et de la Concentration d'Effets Fréquents (CEF). L'ensemble de ces critères constitue un outil de dépistage qui permet d'évaluer le degré de contamination des sédiments. Ces critères peuvent prévenir la contamination des sites qui sont vulnérables à un apport de contaminants d'origine anthropique (CMEC, 2007).

La qualité du sédiment de la baie de Dakhla a été appréciée au travers la détermination de la granulométrie, la teneur en carbone organique total et les teneurs des principaux éléments traces métalliques (cadmium, plomb, mercure, chrome, cuivre et zinc).

Les résultats de la présente étude nous a permis d'évaluer le degré de contamination du sédiment de la baie de Dakhla selon les critères établis par le Conseil des ministres de l'environnement canadien (Tableau 4).

Tableau 4

Critères de qualité des sédiments marins (CMEC, 2007).
Marine sediment quality criteria (CMEC 2007).

Substances	Concentrations (mg/kg) de sédiments secs				
	CER	CSE	CEO	CEP	CEF
Cadmium	0,32	0,67	2,1	4,2	7,2
Chrome	30	52	96	160	290
Cuivre	11	19	42	110	230
Mercure	0,051	0,13	0,29	0,70	1,4
Plomb	18	30	54	110	180
Zinc	70	120	180	270	430

Légende : Concentration d'effets rares (CER), une Concentration seuil produisant un effet (CSE), une Concentration d'effets occasionnels (CEO), une Concentration produisant un effet probable (CEP) et une Concentration d'effets fréquents (CEF) selon le Conseil des ministres de l'environnement canadien.

Bulletin de la Société zoologique de France 142 (4)

Pour les quatre stations Dunablanca, Pk25, Boutalha et la Zone urbaine, les concentrations sont inférieures au CSE voire même inférieures à CER (**Classe II**). Par contre, pour le bassin portuaire, les concentrations du Pb, Cd, Cu, Cr et Zn sont comprises entre CSE et CEO (**Classe III**), mais pour la concentration du Hg elles restent toujours inférieures à CER (Tableau 5).

L'étude a montré que, mis à part le bassin portuaire, la baie de Dakhla reste moins polluée, soit par rapport à des écosystèmes nationaux ou internationaux (Tableau 6). Toutefois, une attention particulière doit lui être réservée pour minimiser, voire même stopper toute sorte de pollution, pour mieux protéger la baie.

Tableau 5

Application des critères de qualité des sédiments (CMEC. 2007) aux sites étudiés.
Application of sediment quality criteria (CMEC 2007) to the sites studied.

Critères de qualité	Classe	Impact sur le milieu	Prévention de la contamination des sédiments due à des rejets	Évaluation de la qualité des sites étudiés
5. <CEF 4. <CEP 3. = ou > CEO	Classe III	Effets biologiques fréquemment observés	La probabilité de mesurer des effets néfastes augmente avec les concentrations mesurées. Examiner la problématique : poursuivre les investigations pour identifier la ou les sources de contamination et intervenir au besoin sur ces sources afin d'éviter une augmentation de la contamination ou un nouvel apport de contaminants.	Bassin portuaire
2. < ou = CSE	Classe II	Effets biologiques parfois observés	La probabilité que les sédiments aient un impact sur le milieu est faible. Un suivi peut être mis en place afin de vérifier l'évolution de la situation.	-> Pk25 -> Dunablanca -> Boutalba -> Zone urbaine
1. < ou = CER	Classe I	Effets biologiques rarement observés	Les sédiments sont considérés comme n'ayant pas d'impact. Aucune action n'est requise, sauf dans le cas où des substances persistantes, toxiques et bio-accumulables (ex : Mercure) rejetées dans les plans d'eau risquent de s'accumuler dans les sédiments et dans les tissus des organismes.	

Qualité des eaux et des sédiments de la baie de Dakhla au Maroc

Tableau 6

Comparaison des teneurs du Pb, Cd et Hg dans les sédiments de la baie de Dakhla, avec les teneurs au niveau d'autres milieux paraliques.

Comparison of Pb, Cd and Hg contents in sediments of Dakhla Bay with levels in other paralic environments.

Études/Critères	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Références
Baie de Dakhla (min-max)	(5,15 – 16,69)	(0,43 – 0,62)	(< LD - 0,0023)	Présente étude
Bassin portuaire (Dakhla)	45,58 ± 0,61	1,3 ± 0,02	0,0145 ± 0,002	Présente étude
Dunablanca	3,6 ± 1,8	< LD	n.d	[ZIDANE <i>et al.</i> , 2008]
Lagune Nador (min - max)	(3 - 416)	(0 - 6,2)	-	[RUIZ <i>et al.</i> , 2006]
Lagune Moulay Bou Selham	22,4 ± 7,5	0,94 ± 0,32	-	[CHEGGOUR <i>et al.</i> , 2001]
Lagune Sidi Moussa	33,0 ± 5,1	3,67 ± 0,64	-	[CHEGGOUR <i>et al.</i> , 2001]
Lagune Oualidia (max)	2,5	0,7	0,08	[BFNBRAHIM, 2015]
Lagune Ébrie (Côte d'Ivoire)	(7 - 250)	-	(0,0 - 2,2)	[KOUADIO & TREFRY, 1987]
Lagune Oludeniz (Turquie)	7	-	-	[TUNCEL <i>et al.</i> , 2007]
Lagune Piratininga (Bresil)	66 ± 20	-	-	[LACERDA <i>et al.</i> , 1992]
Baie de Bothnie (Suède-Finlande)	79	0,94		[LEIVUORI, 1998]

RÉFÉRENCES

- AMINOT, A. & KEROUL, R. (2004).- *Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses*. Édition IFREMER, 336 pp.
- BELIAEFF, B., BOUVET, G., FERNANDEZ, J.-M., DAVID, C. & LAUGIER, T. (2011).- *Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie*. Programme ZONECO et programme CNRT le Nickel. 169 pages.
- BELLAIR, P. & POMEROL, C. (1977).- *Éléments de géologie*. Paris, Armand Colin.
- BENBRAHIM, S. (2015).- *Lagune de Oualidia. État écologique et de santé environnementale*. Programme intégré de réhabilitation de la lagune de Oualidia. INRH, Casablanca, Maroc.
- CHABAUD, C. (2013).- *Quels moyens et quelle gouvernance pour une gestion durable des océans ? Les avis du conseil économique, social et environnemental*. Journaux officiels. http://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2013/2013_15_gouvernance_oceans.pdf.
- CHEGGOUR, M., CHAFIK, A., LANGSTON, W.J., BURT, G.R., BENBRAHIM, S. & TEXIER, H. (2001).- *Metals in sediments and the edible cockle *Cerastoderma edule* from two Moroccan Atlantic lagoons: Moulay Bou Selham and Sidi Moussa*. *Environ. Pollut.*, **115**, 149-160.
- CMEC (2007).- *Environnement Canada et ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration*, 39 p.
- CTAQUA-CETECIMA (2014).- *Rapport d'identification des caractéristiques du milieu physique. Plan d'aménagement et de développement de l'aquaculture dans la région d'Oued Eddahab Lagouira – Maroc Lot 1 Phase 2*.

Bulletin de la Société zoologique de France 142 (4)

- DAFIR, J. (1997).- *Application de la dynamique du phosphore à l'étude de l'organisation et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques (gestion et préservation)*. Thèse de doctorat, Université Hassan II, Faculté des Science Ain Chock, Casablanca, 634 p.
- DANIEL, A. & SOUDANT, D. (2010).- *Évaluation DCE avril 2010 – Élément de qualité : bilan d'oxygène*. Rapport Ifremer, 73 p.
- FOUSSARD, V. & ETCHEBER, H., (2011).- *Rapport. Proposition d'une stratégie de surveillance des paramètres physico-chimiques pour les estuaires de la Seine, de la Loire*. Projet BEEST : vers une approche multicritère du bon état écologique des grands estuaires. Univ. Bordeaux 1, UMR 5805 EPOC et CR1 CNRS.
- KOUADIO, I. & TREFRY, H.H. (1987).- Sediment trace metal contamination in the Ivory Coast, West Africa. *Water Air Soil Pollut.*, **32**, 145-154.
- LACERDA, L.D., FERNANDEZ, M.A., CALAZANS, C.F. & TANIZAKI, K.F. (1992).- Bioavailability of heavy metals in sediments of two coastal lagoons in Rio de Janeiro, Brazil. *Hydrobiologia*, **228**, 65-70.
- LEIVUORI, M. (1998).- Heavy metal contamination in surface sediments in the Gulf of Finland and comparison with the Gulf of Bothnia. *Chemosphere*, **36**, 43-59.
- MAKAOUI, A., ORBI, A., HILMI, K., ZIZAH, S., LARISSI, J. & TALBI, M. (2005).- L'upwelling de la côte atlantique du Maroc entre 1994 et 1998. *C. R. Géoscience*, **337**, 1518-1524.
- ORBI, A., DAFIR, J.M. & BERRAHO, A. (1995).- *Étude pluridisciplinaire de la baie de Dakhla*. Travaux et document n°86 de l'INRH, Maroc. Rapport interne, 26 p.
- ORBI, A., GUÉLORGET, O. & LEFÈBVRE, A. (1996).- *La baie de Dakhla, organisation biologique et fonctionnement*. INRH, Dakhla, Maroc, 240 p.
- OSPAR/JAMP, 2002.- Guidelines for Monitoring Contaminants in Sediment. Ref. No. 2002-16. <http://www.ospar.org/documents?d=32743>.
- QUINBA, A., RADI, M., BENHOUSSA, A., BAZAIRI, H. & MENIOUI, M. (2003).- Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar (FDR). Catégories approuvées dans la Recommandation 4-7 (1990) modifiée par la Résolution VIII.13 de la Conférence des Parties contractantes, 9 p.
- RAMSAR. (2016).- The List of Wetlands of International Importance Published.
- RUIZ, F., ABAD, M., OLIAS, M., GALAN, E., GONZALEZ, I., AGUILA, E., HAMOUMI, N., PULIDO, I. & CANTANO, M. (2006).- The present environmental scenario of the Nador lagoon (Morocco). *Environ. Res.*, **102**, 215-229.
- SAAD, Z. (2015).- *Évaluation de la qualité des eaux marines côtières : nouvelle approche méthodologique appliquée pour le cas de la baie de Dakhla (sud-Marocaine)*. Thèse : Écologie et gestion de la qualité des eaux côtières, Univ. Cadi Ayyad, Faculté des Sciences, Semlalia, Marrakech.
- SOUCHU, P., LAUGIER, T., DUSSERRE, K. & MAROBIN, D. (2001).- *Suivi des paramètres trophiques dans l'eau des étangs de la Narbonnaise*. Rapport final, Ifremer DEL, Laboratoire côtier de Sète, février 2001.
- TUNCEL, S.G., TUGRUL, S. & TOPAL, T. (2007).- A case study on trace metals in surface sediments and dissolved inorganic nutrients in surface water of Ölüdeniz lagoon -Mediterranean, Turkey. *Water Res.*, **41**, 365-372.
- WALKLEY, A. & BLACK, I.-A. (1934).- An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.*, **63**, 251-263.
- ZIDANE, H., ORBI, A., MOURADI, A., ZIDANE, F. & BLAIS, J.-F. (2008).- Structure hydrologique et édaphique d'un site ostréicole : Dunablanca (La baie de Dakhla sud du Maroc). *Environmental Technology*, **29**, 1031-1042.