

Baie de Dakhla : distribution et variation spatio-temporelle des principales caractéristiques hydrologiques et sédimentaires

Dakhla Bay: distribution and spatio-temporal variation of main hydrological and sedimentary characteristics

Fatima EL ASRI^{1, 4*}, Ahmed ERRHIF¹, Mohamed Naoufal TAMSOURI², Mohamed MAANAN³ & Hakima ZIDANE⁴

1. Laboratoire de Santé & Environnement, Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II Casablanca, B.P. 5366 Maârif, 20100 Casablanca, Maroc *(fatimaelasri25@gmail.com).

2. Laboratoire des Technologies Aquacoles Marines, Institut National de Recherche Halieutique M'diq, Maroc.

3. UMR 6554 LETG, Université de Nantes, BP 81227, 44312, Nantes, France.

4. Laboratoire Prospection des Ressources Littorales, Institut National de Recherche Halieutique (INRH), 20050 Casablanca, Maroc

Résumé. Ce travail porte sur l'étude des caractéristiques sédimentaires et hydrologiques de la baie de Dakhla, située sur la côte atlantique marocaine. Cette étendue d'eau figure parmi les vingt-quatre sites marocains retenus par la convention de RAMSAR relative à la conservation des zones humides d'importance internationale. Les échantillons de sédiments ont été prélevés au printemps 2013 et en hiver 2014, au niveau de 42 stations réparties sur l'ensemble de la baie. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une benne Van Veen. Ils ont servi à l'analyse granulométrique, à l'estimation de la matière organique et à l'analyse de la quantité de chlorophylle 'a' présente dans le sédiment. Dans toutes les stations prospectées, la température et la salinité ont été mesurés in situ à l'aide d'une sonde multimétrique. Les résultats montrent que la température et la salinité augmentent du nord au sud à cause de la diminution de la profondeur et de l'affaiblissement de l'hydrodynamisme, mais aussi de l'est vers l'ouest. La proportion des particules fines et la teneur du sédiment en matière organique augmentent du nord vers le sud. Ce gradient est perturbé par les apports éoliens au nord et sur la bordure ouest. Au printemps, c'est le faciès sableux qui prédomine alors qu'en hiver c'est le faciès silto-sableux qui est le plus répandu. Quant à la chlorophylle 'a', contenue dans le sédiment, a présenté une répartition spatiale hétérogène. Les paramètres étudiés ont montré tous une variation non significative entre les deux saisons étudiées ($P > 0,05$).

Mots clés : Maroc, Baie de Dakhla, Granulométrie, Température, Salinité, Matière organique, Chlorophylle 'a', Variations spatio-temporelles.

Abstract. This work focuses on the study of the sedimentary and hydrological characteristics of Dakhla Bay, located on the Moroccan Atlantic coast. This body of water is one of the twenty-four Moroccan sites selected by the RAMSAR convention on the conservation of wetlands of international importance. Sediment samples were collected in spring 2013 and winter 2014 at 42 stations spread across the entire bay. The samples were collected using a Van Veen grab and were used for particle size analysis, estimation of organic matter and analysis of the amount of chlorophyll 'a' present in the sediment. In all surveyed stations, temperature and salinity were measured in situ using a multimetric probe. The results show that temperature and salinity increase from north to south due to the decrease in depth and the weakening of hydrodynamics, but also from east to west. The proportion of fine particles and the organic matter content in the sediment increase from north to south. This gradient is disrupted by wind inputs to the north and on the western edge. In spring, it is the sandy facies which predominates, while in winter, the silty-sandy facies, is the most widespread. As for the chlorophyll 'a' contained in the sediment, it presented a heterogeneous spatial distribution. The studied parameters all exhibited non-significant variation between the two seasons studied ($P > 0.05$).

Keywords: Morocco, Dakhla Bay, Grain size, Temperature, Salinity, Organic matter, Chlorophyll 'a', Spatio-temporal variations.

Abridged English version

Introduction

Morocco hosts a large number of paralic ecosystems along its coasts, such as lagoons, estuaries and bays, which are among the most productive environments in the world. Indeed, paralic environments are geographically situated in the coastal zone and constitute an important part of coastal ecosystems (Guélorget & Perthuisot 1983). These paralic environments are unique ecosystems that develop interface of continental and oceanic hydrological systems, where significant flows of matter and energy occur (Guélorget & Perthuisot 1992). Fertilized

by oceanic and continental inputs, they rank among the most productive ecosystems in the biosphere (Berraho *et al.* 2019). They play a fundamental role in the biological cycles of many species, serving as both a place of reproduction and a source of food (Zidane *et al.* 2008, 2017, El Asri *et al.* 2019). These ecosystems play a key role in coastal protection, in particularly by stabilizing sediments and soils and by attenuating waves and tidal currents (Maanan 2013, Newton *et al.* 2018).

Dakhla Bay, situated in southern Morocco, is one of the most important natural ecosystems in the country, both in terms of area and fish wealth. The bay has a high potential ecosystem, particularly for aquaculture, especially shellfish farming.

Additionally, it was identified as a site of ecological and biological interest (SIBE) in 1996, also an area of international importance for the conservation of birds (ZICO, BirdLife International status) in 2001 and labeled as a RAMSAR site in 2005 (Qninba 2013). Furthermore, it is characterized by wide beaches and permanent winds, favoring a climate propitious mainly to sports tourism. This marine domain, so rich in fauna and flora, plays an important socio-economic role for Morocco, imposing a commitment to its protection and the preservation of its resources for future generations (Zidane *et al.* 2017, Saad *et al.* 2013, 2015). Considering the importance of the Bay of Dakhla on scientific and socio-economic levels, a better understanding of its ecosystem is necessary to improve and rationalize the management of its resources. Given relatively low level of scientific knowledge about this site, this study aim to Investigate. The present work aims to study the spatial variation of the main hydrological and sedimentary parameters of the Bay of Dakhla during two different seasons, spring 2013 and winter 2014. Its main objective is to highlight potential gradients of these parameters in relation to the hydrodynamics of the Bay and the hydro-sedimentary characterization of its various zones.

Material and methods

Study site

The Dakhla Bay is located on the Moroccan Atlantic coast of the Sahara coast (Fig. 1). Its geographical coordinates are: 23°30'-23°55' N - 16°00'-15°42' W. It extends over a length of 37 km and a maximum width between 10 and 12 km, its area exceeds 400 Km². It is separated from the Atlantic Ocean by the Oued Eddahab peninsula and communicates with the ocean on the south side through a wide passage with an opening of about 13 km, extending parallel to the coast profile. Its longitudinal axis is oriented NE-SW. The bay has a bathymetry ranging from 0 to 20 m and consists of two main parts: South-West part and North-East part (Orbi *et al.* 1995). The climate of this region is desert. The interaction of cold currents, specifically the Canary currents, and subtropical high pressures gives imparts certain climatic peculiarities to this region. The prevailing winds generally blow from the North-North-West to North-East sector (Hilmi *et al.* 2017).

Sampling and laboratory analyses

To cover the Bay of Dakhla, 42 stations were chosen (Fig. 1). Sediment samples were collected in spring 2013 and winter 2014 using the Van Veen grab. These samples were then utilized for particle size analysis, estimation of organic matter and analysis of the amount of chlorophyll 'a' present in the sediment. The particle size of the sediment was determined using a Malvern 2000 laser particle sizer. All the samples were processed in the Geolittomer Laboratory (UMR 6554 LETG, University of Nantes CNRS). The organic matter (OM) content of the sediment was determined by the so-called loss-on ignition method (4 hours in the oven at 450°C). The chlorophyll 'a' assays were carried out according to the Lorenzen method (Holm-Hansen *et al.* 1965). In all surveyed stations and during sampling, two physico-chemical parameters of the water were

measured: temperature and salinity. These two parameters were measured in situ on the surface using a multimetric probe.

Statistical analysis

Principal component analysis (PCA) was employed to synthesize and correlate the spatial variation of sedimentary and hydrological parameters. The variables taken into consideration are: grain size, organic matter, chlorophyll 'a', temperature and salinity. This analysis was conducted using XLstat 2016 software. The seasonal variability of all the parameters was assessed through the non-parametric Wilcoxon test. A value of $P < 0.05$ was considered significant.

Results and Discussion

The analysis of the physico-chemical parameters made it possible to identify the major structures of the bay. Thus, it appears that the waters of the bay exhibit a double evolution: an evolution from downstream to upstream, characterized by an increase in temperature and salinity due to the reduction in depth and the weakening of hydrodynamics, and an evolution from the eastern border to the western border, marked by an increase in these two parameters. This double evolution is the result of a complex circulation managed by the tide and the bathymetry. The values of temperature and salinity recorded throughout the bay are close to those reported by Zidane (2009), Saad *et al.* (2013) and Zidane *et al.* (2017). The distribution of sedimentary facies in the bay reflects its dynamic characteristics. Indeed, in areas under the influence of high dynamics (southern area and channels), the sediment is sandy. In areas with low dynamics (upstream area and western edge), there is a trend towards siltation, the sandy character in these areas is due to wind inputs. The distribution of organic matter remains identical to that described by Dafir (1997). Indeed, the richest areas are located in the central umbilicus. This scheme is superimposed on the functioning of the bay, which redistributes incoming water through a rapid cycle by returning along the eastern shore and through a slow cycle along the western shore. This organization would lead to an accumulation of organic matter in the upstream zone and the western border. However, organizational pattern is disrupted by wind inputs of silicoclastic particles, which cause sedimentary dilution of the elements deposited in these two areas. The only part that continues to reflect this functioning is the umbilicus zone, due to its geomorphological arrangement and depth.

Conclusion

This study provides elements for the characterization of the waters and sediment of the Bay of Dakhla. Additionally, it reveals the complexity of the functioning of this ecosystem, influenced by the temporal instability in hydrological parameters governed by climatic factors and upwelling. Consequently, this study will be completed by more advanced and in-depth research on the benthic macrofauna and its interactions with the biotope. The aim is gain a comprehensive understanding of the functioning of this ecosystem and proposes prevention and conservation measures for this wetland of international importance..

INTRODUCTION

Le Maroc abrite le long de ses côtes un nombre important d'écosystèmes paraliques, tels que des lagunes, des estuaires et des baies qui comptent parmi les milieux les plus productifs au monde. En effet, les milieux paraliques appartiennent géographiquement à la zone côtière et représentent une part

importante des écosystèmes côtiers (Guélorget & Perthuisot 1983). La définition de ces milieux paraliques diffère selon les auteurs. Toutefois, selon Guélorget & Perthuisot (1992), les écosystèmes paraliques sont des étendues d'eau permanentes ou temporaires, en relation plus ou moins avec la mer. Ce sont des écosystèmes très variés quant à leur taille, à

leur morphologie et à leur genèse. Les conditions climatiques et hydrographiques régionales, ainsi que les caractéristiques hydrologiques locales y induisent une grande variété et une grande variabilité des paramètres physiques et chimiques. Ces milieux paraliques, sont des écosystèmes originaux qui se développent dans la zone de rencontre des systèmes hydrologiques continentaux et océaniques et où s'opèrent d'importants flux de matière et d'énergie. Fertilisés par des apports océaniques et continentaux, ils comptent parmi les plus productives de la biosphère (Berraho *et al.* 2019). Ils jouent un rôle fondamental dans les cycles biologiques de nombreuses espèces en tant que lieu de reproduction et de nourriture (Zidane *et al.* 2008, 2017, El Asri *et al.* 2019). Ces écosystèmes jouent un rôle clé dans la protection du littoral en particulier par la stabilisation des sédiments et des sols et par l'atténuation des vagues et des courants de marée (Maanan 2013, Newton *et al.* 2018).

La baie de Dakhla, située dans le Sud du Maroc, fait partie des écosystèmes côtiers les plus importants sur la façade atlantique marocaine, c'est l'un des écosystèmes naturels les plus importants au Maroc, tant par sa superficie que par sa richesse halieutique. La baie présente un écosystème à fort potentiel en termes d'aquaculture, notamment la conchyliculture (Zidane 2009, Ait Chattou *et al.* 2019, Izzabaha *et al.* 2020, 2021). De plus, elle est identifiée comme site d'intérêt écologique et biologique (SIBE) en 1996, zone d'importance internationale pour la conservation des oiseaux (ZICO, statut BirdLife International) en 2001 et labellisée en tant que site RAMSAR en 2005 (Qinba 2013). De plus, elle se caractérise par de vastes plages et des vents permanents permettant un climat favorable au tourisme sportif. Ce domaine marin, si riche en faune et flore, joue un rôle socio-économique important pour le Maroc et impose donc un engagement pour sa protection et la préservation de ses ressources pour les générations futures (Zidane *et al.* 2017, Saad *et al.* 2013, 2015).

Compte tenu de l'importance de la baie de Dakhla sur les plans scientifique et socio-économique, une meilleure connaissance de son écosystème s'avère nécessaire afin d'améliorer et de rationaliser la gestion de ses ressources, vu que le niveau des connaissances scientifiques de ce site est relativement faible. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude qui s'intéresse à la variation spatiale des principaux paramètres hydrologiques et sédimentaires de la baie de Dakhla au cours de deux saisons différentes, le printemps et l'hiver. Elle a pour objectif principal la mise en évidence de gradients éventuels de ces paramètres en relation avec l'hydrodynamisme de cette baie et la caractérisation hydro-sédimentaire de ses différentes zones.

MATÉRIEL ET METHODES

Site d'étude

La baie de Dakhla est située sur la côte atlantique marocaine du littoral saharien. (Fig. 1). Ses coordonnées géographiques sont ! 23°30'-23°55' N - 16°00'-15°42' O. Elle s'étend sur une longueur de 37 km et une largeur maximale comprise entre 10 et 12 km, soit une superficie de presque 400 km². Elle est séparée de l'Océan Atlantique par la péninsule d'Oued Eddahab et communique avec l'océan du côté sud à travers une large passe d'une ouverture d'environ 13 km et s'allonge parallèlement au profil de la côte. Son axe longitudinal est orienté NE-SO. La baie possède une bathymétrie variante entre 0 et 20 m et constituée de deux parties principales : partie Sud-Ouest et partie Nord-Est (Orbi *et al.* 1995). Le climat de cette région est désertique. L'interaction des courants froids,

des courants des Canaries et des hautes pressions subtropicales confère à cette région certaines particularités climatiques. Les vents dominants soufflent généralement du secteur Nord-Nord-Ouest à Nord-Est (Hilmi *et al.* 2017).

Echantillonnage et analyses de laboratoire

Pour couvrir la baie de Dakhla, 42 stations ont été choisies (Fig. 1). Les échantillons sédimentaires ont été prélevés au printemps 2013 et en hiver 2014 par la benne Van Veen. Ils ont servi à l'analyse granulométrique, à l'estimation de la matière organique et à l'analyse de la quantité de chlorophylle 'a' présente dans le sédiment.

La granulométrie du sédiment a été déterminée par l'utilisation d'un granulomètre laser type Malvern 2000. L'ensemble des échantillons a été traité au sein du Laboratoire Géolittomer (UMR 6554 LETG, Université de Nantes CNRS). La teneur du sédiment en matière organique (MO) a été déterminée par la méthode dite perte au feu (4 heures au four à 450°C). Les dosages de la chlorophylle 'a' ont été réalisés selon la méthode de Lorenzen (Holm-Hansen *et al.* 1965). Dans toutes les stations prospectées et lors de l'échantillonnage, deux paramètres physico-chimiques de l'eau ont été mesurés : la température et la salinité. Ces deux paramètres ont été mesurés *in situ* en surface à l'aide d'une sonde multimétrique.

Analyse statistique des données

L'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée pour synthétiser et coupler la variation spatiale des paramètres sédimentaires et hydrologiques. Les variables prises en considération sont : la granulométrie, la matière organique, la chlorophylle «a», la température et la salinité. Cette analyse a été réalisée avec le logiciel Xlstat 2016.

La variabilité saisonnière de l'ensemble des paramètres a été évaluée par le test non paramétrique de Wilcoxon. Une valeur de $P < 0,05$ a été retenue comme significative.

RESULTATS

Paramètres physicochimiques

Température

La température de surface des eaux de la baie de Dakhla suit au printemps un gradient croissant est-ouest avec des valeurs comprises entre 15,8 et 19,5°C (Fig. 2). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau de la rive ouest de la baie. En hiver, la variation de la température de surface présente un léger gradient croissant aval-amont. Les valeurs de cette température varient entre 16,3 et 19,5°C et ne présentent pas de différence significative par rapport à celles enregistrées au printemps 2013, confirmée par le test de Wilcoxon ($p < 0,05$).

Salinité

La salinité des eaux de la baie de Dakhla varie de 36 à 39,9‰ au printemps avec une moyenne de $37,9 \pm 0,9$ ‰ et montre un gradient croissant de l'aval vers l'amont de la baie et de l'est vers l'ouest en relation avec la circulation de l'eau (Fig. 3). En hiver, les salinités oscillent entre 36,2 et 39,9‰ avec une moyenne de $37,7 \pm 1,0$ ‰. Les gradients hyalins sont importants à l'amont de la baie, là où les faibles profondeurs favorisent l'influence de l'évaporation. Cette salinité est faible en aval où la profondeur et l'échange avec les eaux atlantiques du large sont importants. La comparaison des salinités enregistrées lors des deux périodes étudiées ne montre pas de variation significative selon le test de Wilcoxon ($P > 0,05$).

Paramètres sédimentaires

Granulométrie

L'analyse des sédiments de la baie de Dakhla montre une grande variabilité spatiale de leur composition granulométrique (Fig. 4). Cette granulométrie varie selon un gradient croissant de l'aval vers l'amont de la baie.

Trois types de faciès sont identifiés :

- Un faciès sableux concentré surtout dans la zone aval et dans les chenaux.

- Un faciès silto-sableux concentré dans les zones protégées.

- Un faciès silto-argileux rare et présent seulement dans certains points au nord de la baie.

Les proportions relatives de ces faciès varient entre les deux saisons étudiées. Au printemps, c'est le faciès sableux

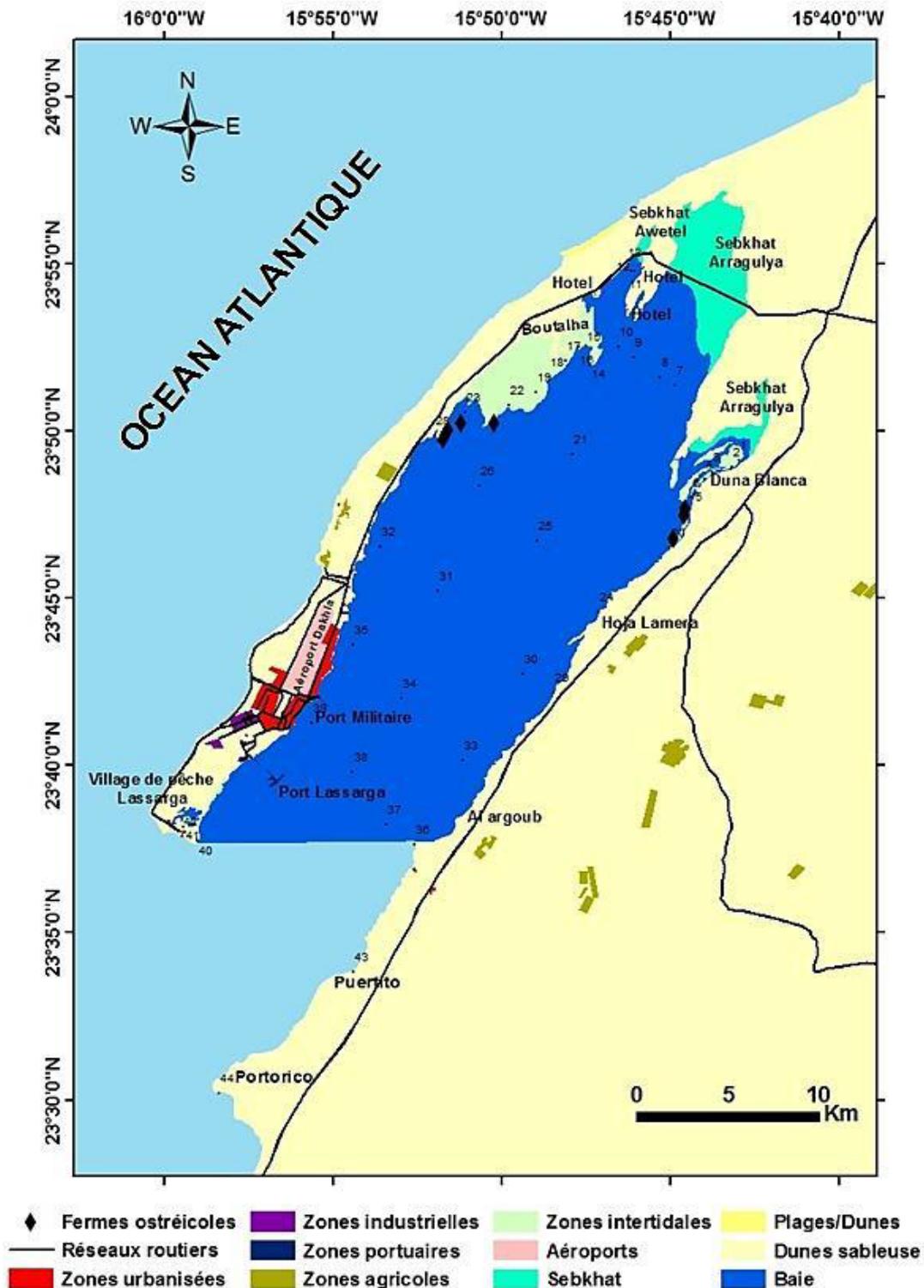


Figure 1. Localisation géographique des stations échantillonnées dans la baie de Dakhla.
 Figure 1. Geographical location of stations sampled in Dakhla Bay.

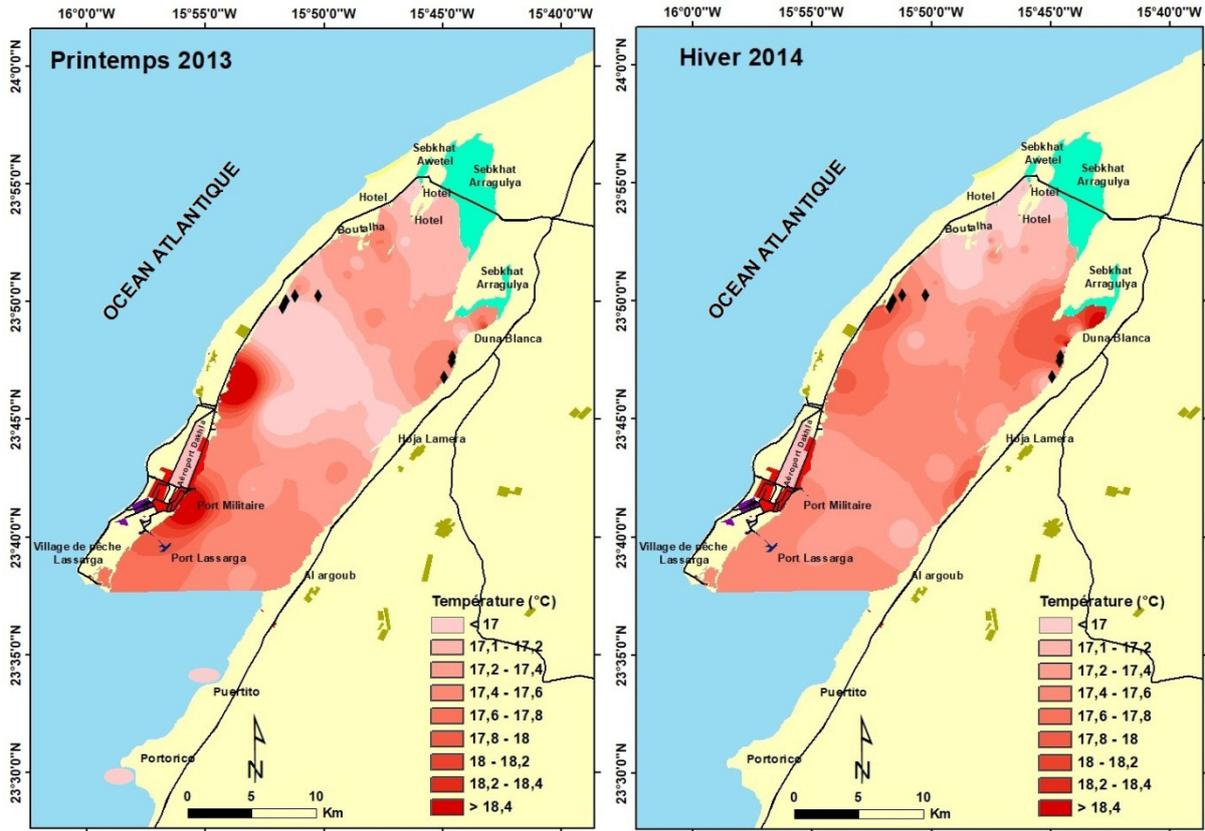


Figure 2. Distribution spatiale de la température de surface des eaux de la baie de Dakhla au printemps 2013 et en hiver 2014.
 Figure 2. Spatial distribution of surface water temperature in Dakhla Bay in spring 2013 and winter 2014.

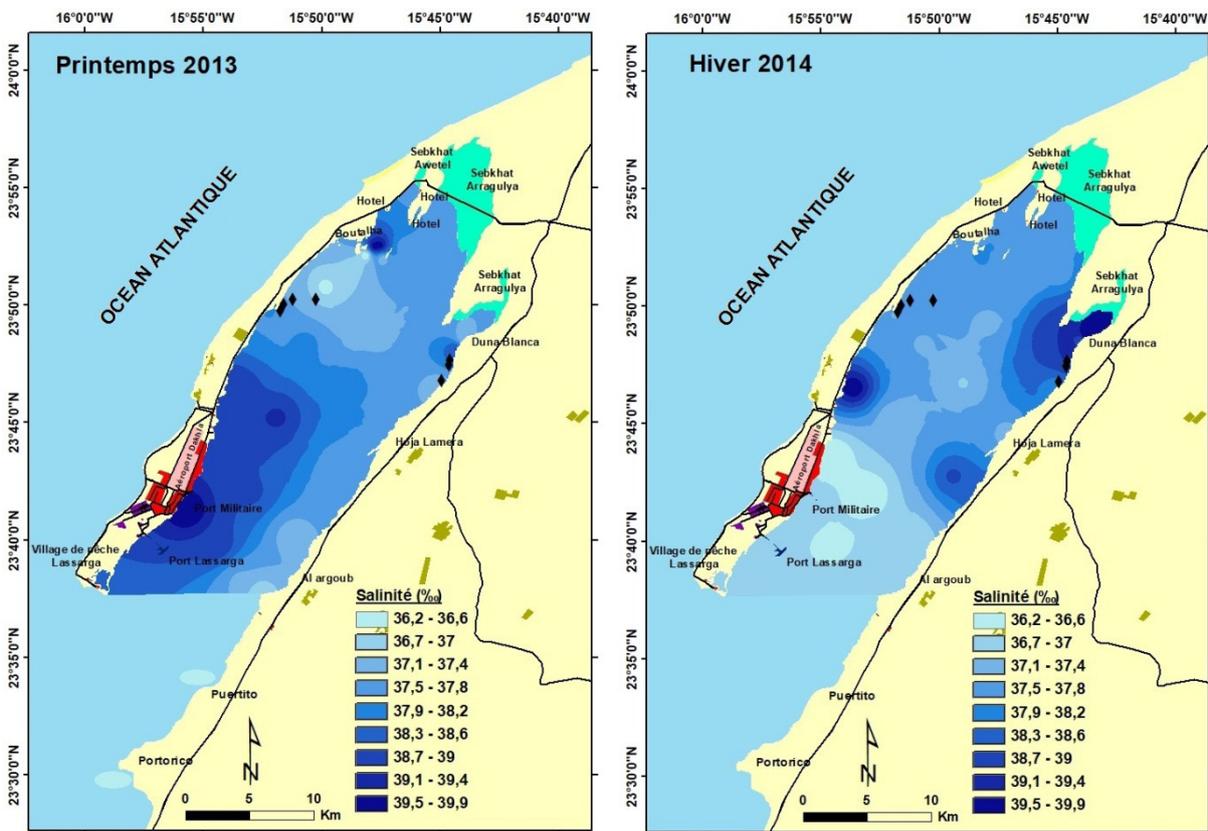


Fig. 3. Distribution spatiale de la salinité des eaux de la baie de Dakhla au printemps 2013 et en hiver 2014.
 Figure 3. Spatial distribution of water salinity in Dakhla Bay in spring 2013 and winter 2014.

qui prédomine alors qu'en hiver c'est le faciès silto-sableux qui est le plus répandu. Néanmoins, les caractéristiques sédimentaires ne varient pas de manière significative entre ces deux saisons selon le test de Wilcoxon ($p > 0,05$).

Matière organique

La quantité de la matière organique contenue dans les sédiments de la baie de Dakhla augmente de l'aval vers l'amont de la baie au printemps (Fig. 5) avec une moyenne de $2 \pm 2,5$ %. Les faibles teneurs des sédiments de la zone sud (moins de 2% dans certaines stations) sont en relation avec un hydrodynamisme fort. Les teneurs plus élevées enregistrées dans la partie nord de la baie et particulièrement au niveau de l'ombilic central, sont en relation avec la grande profondeur de cette zone qui favorise l'accumulation de la matière organique. En hiver, les teneurs en matière organique du sédiment sont un peu plus élevées par rapport à celles rencontrées au printemps et sont en moyenne de l'ordre de $2,1 \pm 2,1\%$. Cependant, leur distribution suit à peu près la même tendance que celle observée précédemment. La différence entre les deux périodes étudiées reste non significative selon le test de Wilcoxon ($p > 0,05$).

Chlorophylle «a»

La chlorophylle 'a' présente une répartition spatiale hétérogène dans les sédiments de la baie de Dakhla au printemps 2013 avec des teneurs allant de 0,4 à 24,9 mg.m⁻² (Fig. 6). Les fortes valeurs ont été enregistrées dans les stations 19 et 23 à proximité de Boutalha et dans les stations 34 et 35 au voisinage de l'aéroport. En hiver, la répartition de la chlorophylle 'a' dans les sédiments de cette baie est aussi hétérogène mais avec des quantités un peu plus élevées par rapport à la période précédente, variant entre 0,2 et 34,6 mg.m⁻². Cependant, la différence entre les deux périodes étudiées reste non significative selon le test de Wilcoxon ($P > 0,05$). Les teneurs les plus élevées ont été enregistrées dans la station 39 au voisinage du port militaire et dans les stations 17 et 22 à proximité de Boutalha.

Analyse numérique des paramètres physico-chimiques

Pour visualiser les corrélations éventuelles entre les différents paramètres étudiés et mettre en évidence les groupes de stations dont les caractéristiques hydrologiques et sédimentologiques sont similaires, une analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée.

Situation printanière

Les deux premiers axes expriment 57,7% de la variance totale. Les résultats montrent une forte corrélation des paramètres température, salinité, chlorophylle «a» et granulométrie avec l'axe 1, positive pour les trois premiers et négative pour le dernier. La matière organique présente, au contraire, une forte corrélation négative avec l'axe 2 (Fig. 7).

La projection des stations de prélèvements sur le plan factoriel des deux premiers axes a permis de mettre en évidence trois groupes de stations à caractères similaires :

Le **premier** groupe est composé par des stations de sables moyens propres plutôt océaniques de faible teneur en matière organique et en chlorophylle 'a' avec également une température et une salinité faibles. Ces stations sont situées principalement à l'entrée de la baie.

Le **deuxième** regroupe des stations où les sédiments montrent une légère augmentation du taux de matière organique et une diminution de la granulométrie, ce qui correspond à une augmentation de la teneur en pélites. Ces

stations présentent des valeurs de température, salinité et de chlorophylle 'a' élevées. Elles sont situées essentiellement dans la partie nord de la baie.

Le **troisième** groupe englobe les stations qui présentent des taux élevés en matière organique. Elles sont situées au niveau de l'ombilic central.

Les deux stations 32 et 33 sont par contre singulières, la première présente une température et une salinité élevée et la seconde une salinité faible.

Situation hivernale

Les deux premiers axes expriment 57,8% de la variance totale. La projection du cercle de corrélation permet d'identifier visuellement les descripteurs responsables de la variabilité des résultats entre les stations (Fig. 8).

L'axe 1 qui décrit la plus forte variabilité, est corrélé positivement avec la température et la salinité et négativement avec la granulométrie. L'axe 2 est basé essentiellement sur la teneur en chlorophylle 'a' dans les sédiments et la matière organique.

La projection des points de prélèvements sur le plan factoriel a mis en évidence trois groupes de stations :

Le groupe 1 est constitué essentiellement des stations côtières.

Le groupe 2 englobe principalement les stations nord de la baie.

Le groupe 3 est composé des stations ayant les taux les plus élevés de la matière organique, situées essentiellement au niveau de l'ombilic central.

Trois stations (1, 2 et 5) restent complètement isolées, elles sont situées au niveau de Duna Blanca et présentent des valeurs élevées de température et de salinité.

DISCUSSION

Pour toute étude écologique d'un site d'étude et pour bien comprendre son fonctionnement, il est nécessaire de faire des mesures de ses caractéristiques physico-chimiques et sédimentaires (Chardy 1970). En effet, les caractéristiques de chaque écosystème aquatique proviennent de l'interaction directe ou indirecte des facteurs climatiques, hydrologiques et édaphiques qui déterminent en majeure partie l'environnement aquatique dans ses dimensions tant physico-chimiques que biologiques (Durand & Chantraine 1982).

Les caractéristiques hydrologiques de la baie de Dakhla sont déterminées principalement par l'interaction des actions du vent, des courants de marée et de l'upwelling qui se manifeste par des eaux froides et riches en nutriments qui alimentent la baie (Dafir 1997).

La température de l'eau est un facteur écologique qui provoque d'importantes répercussions écologiques (Leynaud 1968). Elle agit sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous, de même que sur les réactions biochimiques et chimiques, la croissance et le développement des organismes vivants dans l'eau et essentiellement les microorganismes (W.H.O 1987).

Les variations de la température des eaux de la baie sont directement liées aux conditions climatiques locales et aux échanges océanographiques. Les valeurs enregistrées dans l'ensemble de la baie sont voisines de celles signalées par Zidane (2009) et Saad *et al.* (2013) et Zidane *et al.* (2017). La baie a gardé la même évolution de la température décrite par ces auteurs ; elle se fait selon son axe longitudinal avec des

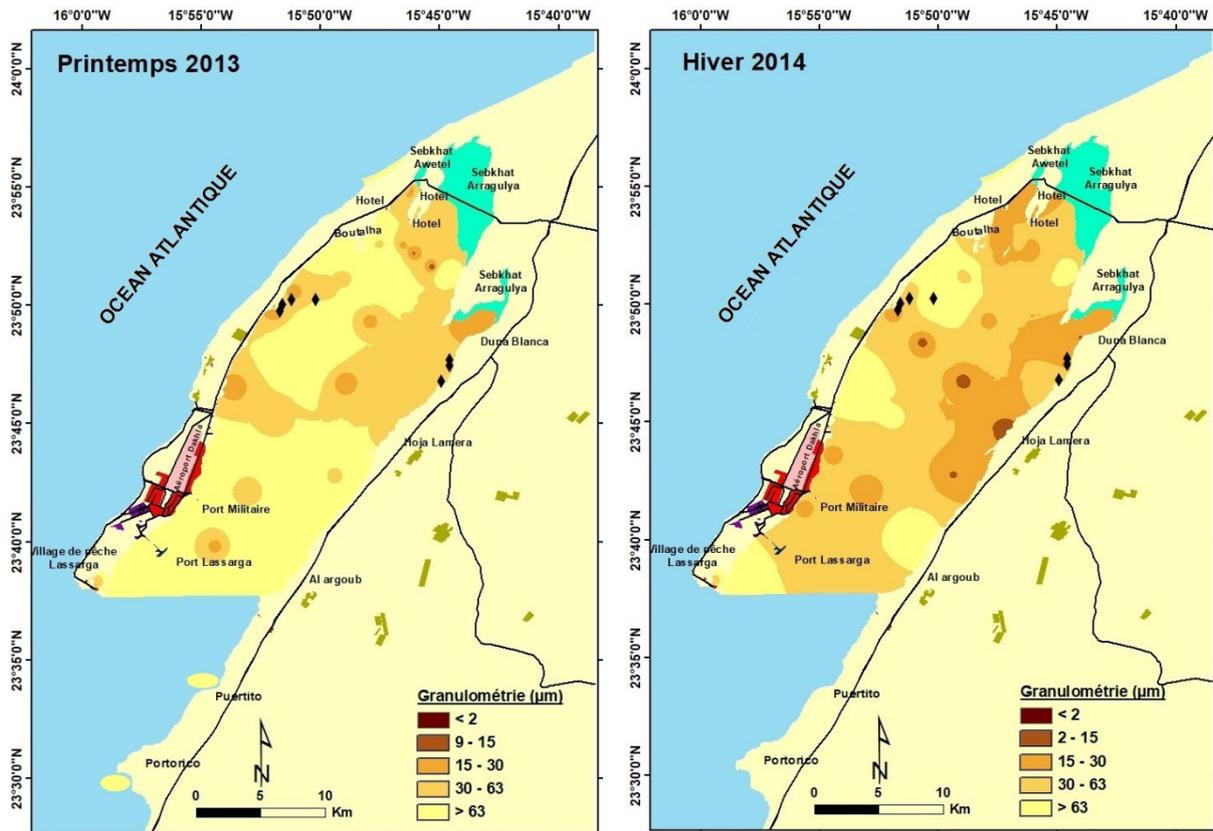


Figure 4. Variation spatiale de la granulométrie dans la baie de Dakhla au printemps 2013 et en hiver 2014.
 Figure 4. Spatial variation of grain size in Dakhla Bay in spring 2013 and winter 2014.

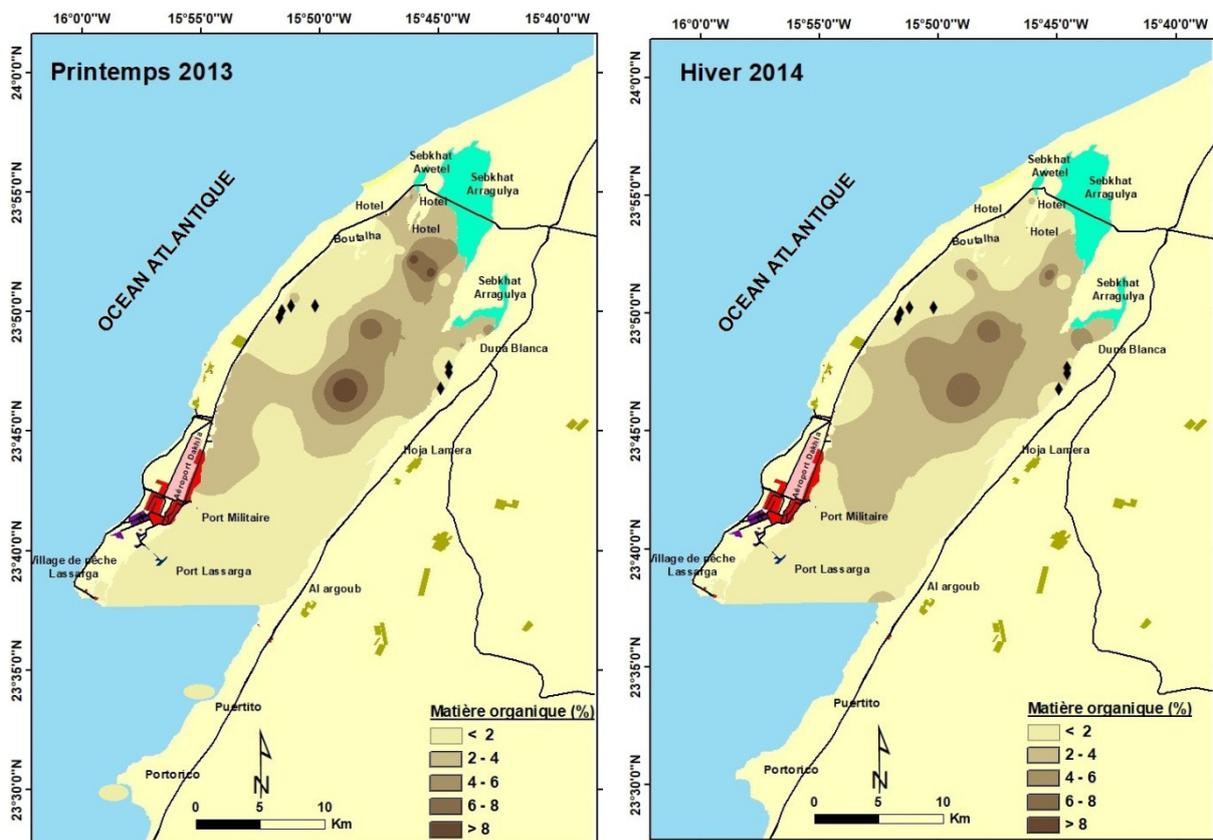


Figure 5. Distribution spatiale de la matière organique dans la baie de Dakhla au printemps 2013 et en hiver 2014.
 Figure 5. Spatial distribution of the organic matter in Dakhla Bay in spring 2013 and winter 2014.

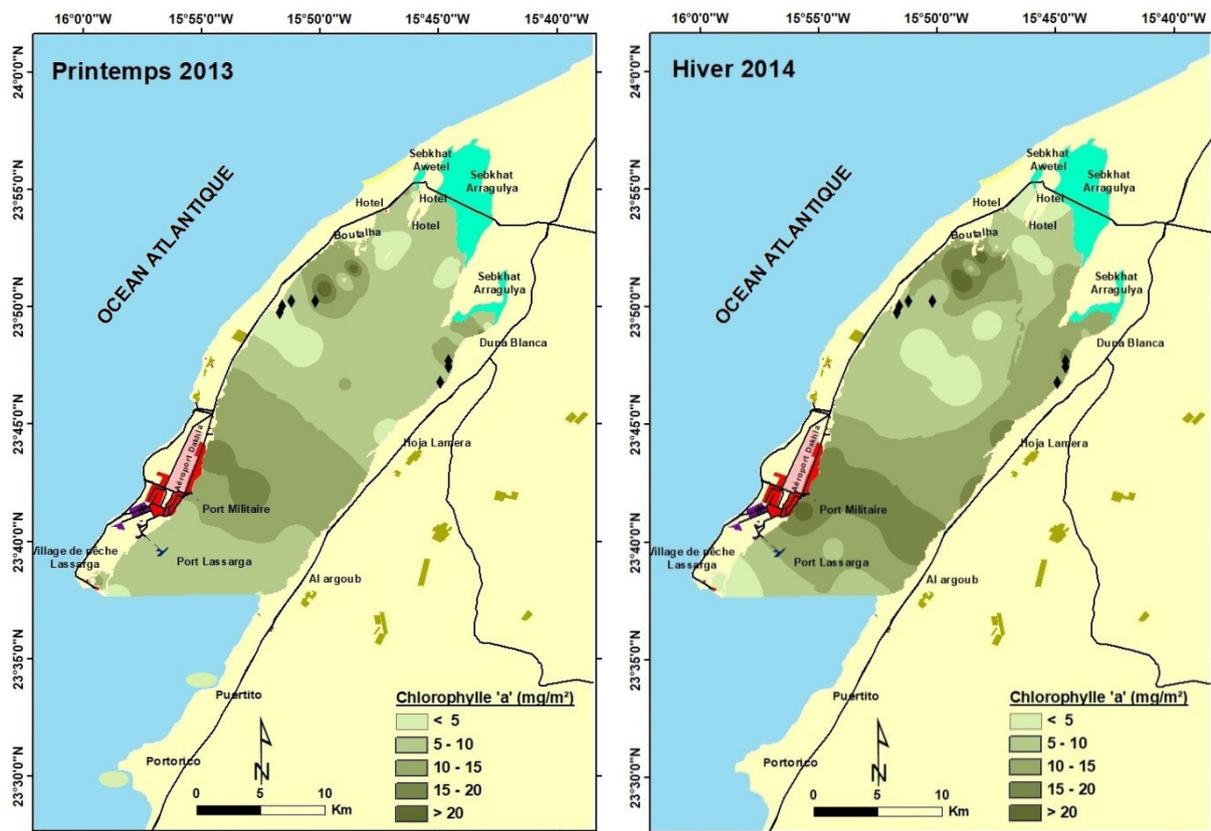


Figure 6. Distribution spatiale de la chlorophylle 'a' dans la baie de Dakhla au printemps 2013 et en hiver 2014.
 Figure 6. Spatial distribution of chlorophyll 'a' in Dakhla Bay in spring 2013 and winter 2014.

valeurs faibles dans la zone aval, traduisant l'influence des eaux océaniques froides à l'entrée de la baie et des valeurs plus élevées en amont, reflétant la diminution de la profondeur qui favorise le réchauffement rapide des eaux.

La température de la baie d'Agadir varie entre 22°C et 25°C. Globalement, la température moyenne de l'eau de mer des zones étudiées est liée aux conditions météorologiques car la couche superficielle est soumise à l'influence directe du climat régional qui est caractérisé par une saison froide et une saison chaude (Chaouay *et al.* 2016). Dans la baie de Taghazout, la température de l'eau varie de 24,5°C à 26,6°C (Lamine *et al.* 2019).

Les variations halines dans la baie de Dakhla sont sous l'influence directe des échanges avec la mer et du phénomène d'ensoleillement. La variation longitudinale se manifeste selon un gradient croissant entre le domaine océanique et les zones les plus profondes de la baie (le Nord de la baie). En effet, les valeurs de la salinité enregistrées en aval de la baie sont les plus faibles et sont presque océaniques en raison de sa position exposée à l'océan (Aminot & Chaussepied 1983). La variation transversale de la salinité suit un gradient croissant de la bordure Est vers la bordure Ouest. Cette salinité élevée est due principalement à l'eau de mer qui entre dans la baie puis retourne à l'océan par la rive orientale et son évacuation par la rive occidentale (Orbi *et al.* 1995, 1996). Les valeurs de salinité obtenues dans la baie sont assez similaires à celles signalées par Zidane (2009), Zidane *et al.* (2008, 2017), Saad *et al.* (2013) et Zidane *et al.* (2017). La salinité dans la baie de Taghazout varie de 35,2 à 37,9 g/l (Lamine *et al.* 2019), alors qu'elle varie entre 30,1% et 36,6% dans la baie d'Agadir (Chaouay *et al.* 2016).

L'analyse des paramètres physico-chimiques a permis de dégager les grandes structures de la baie de Dakhla. Ainsi, il ressort que les eaux de la baie ont une double évolution : Une évolution de l'aval vers l'amont caractérisée par une augmentation de la température et de la salinité à cause de la diminution de la profondeur et de l'affaiblissement de l'hydrodynamisme, et une évolution de la bordure Est vers la bordure Ouest caractérisée par une augmentation de ces deux paramètres. Cette double évolution est le fruit d'une circulation complexe gérée par la marée et par la bathymétrie. En effet, à marée haute, les eaux océaniques pénètrent dans la baie par les chenaux et longent ainsi la bordure Est. La bordure ouest est à l'abri de cette circulation à cause de la disposition générale de la houle oblique par rapport à l'entrée de la baie au niveau de la pointe de Lassarga. Ces eaux qui entrent dans la baie sont riches en sels nutritifs, et au fur et à mesure qu'elles pénètrent dans la baie, ces nutriments sont consommés par les algues qui, grâce à leur photosynthèse, permettent une bonne oxygénation de l'eau (Dafir 1997).

À marée basse, la morphologie interne de la baie permet la canalisation des eaux vers la bordure Est et la partie centrale par lesquelles s'effectuera la plus grande partie du vidange. Les eaux circulent très lentement car elles ne sont pas dans l'axe des circulations majeures. La marée haute suivante reprendra une partie de ces eaux sortantes riches en éléments nutritifs et les ramènera vers l'intérieur de la baie. Ainsi, à marée haute, on retrouve à l'Argoub les eaux surchauffées qui ont séjournées dans la baie et qui ont transitées à basse mer par Lassarga (Orbi *et al.* 1995). Ce même constat a été observé par Hilmi *et al.* (2017) qui ont montré que l'hydrodynamisme de la baie est dominé par les courants de marée. Durant les marées de vive eau, les courants sont très intenses (entre 1 et

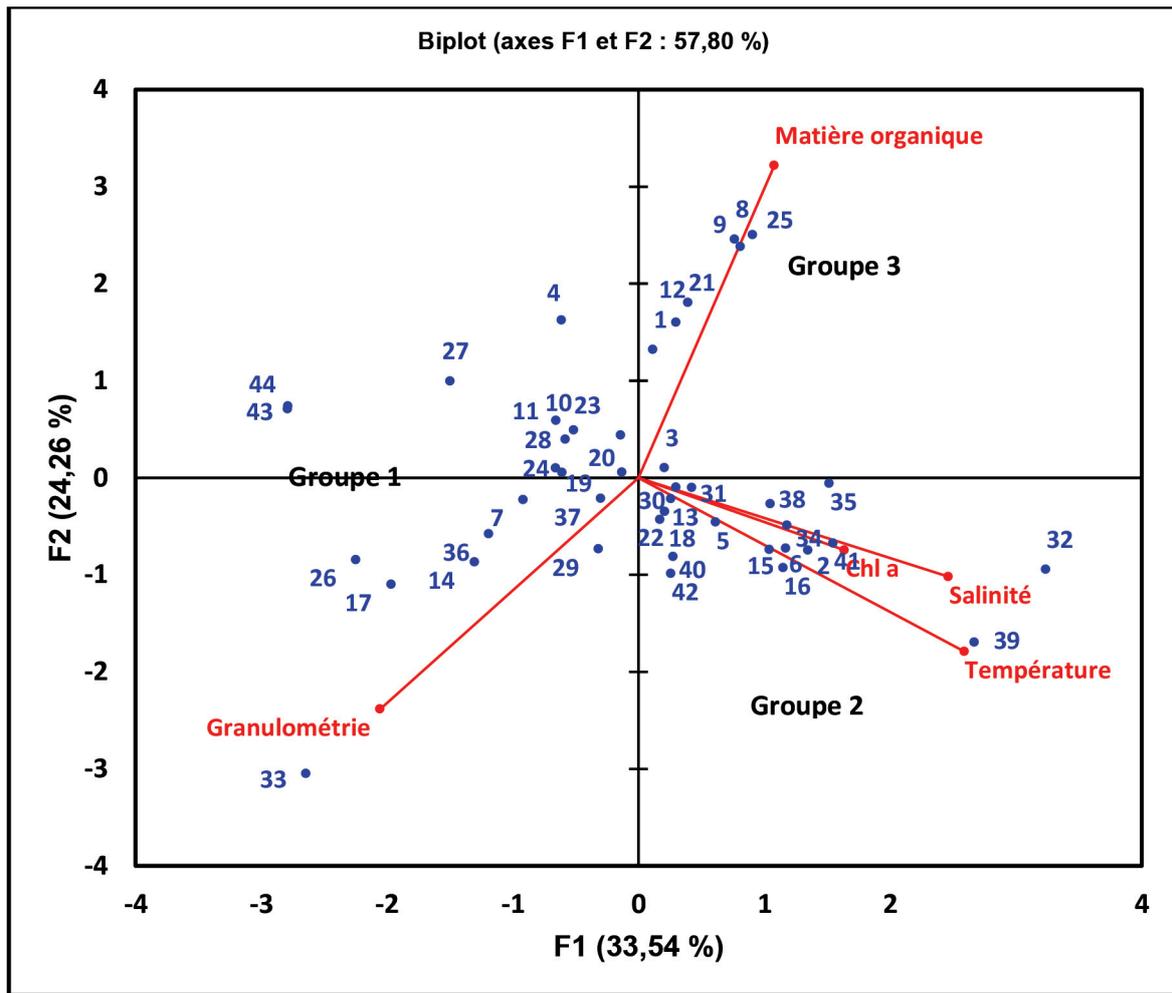


Figure 7. ACP normée des paramètres hydrologiques et sédimentologiques mesurés au printemps 2013 dans la baie de Dakhla.
 Figure 7. Standard ACP of hydrological and sedimentological parameters measured in spring 2013 in the Bay of Dakhla.

2 m.S⁻¹) au niveau de l'entrée de la baie et à son voisinage, inférieures à 1 m.s⁻¹ dans la partie centrale de la baie et inférieures à 0,5 m.s⁻¹ en se dirigeant vers l'amont de la baie. Durant les marées de mortes eaux, les intensités du courant de marée sont généralement moindres et inférieures à 0,5 m. s⁻¹ dans la baie.

La répartition des faciès sédimentaires dans la baie reflète les caractéristiques dynamiques de celle-ci. En effet, dans les zones sous l'influence d'une dynamique élevée (zone sud et chenaux), le sédiment est sableux. Dans les zones à faible dynamique (zone amont et bordure ouest), la tendance est vers l'envasement, le caractère sableux dans ces zones est dû aux apports éoliens.

La Baie de Dakhla a une double source d'apports de sédiments : éolienne et marine. Les apports éoliens sont surtout importants dans le Nord de la baie et sur la bordure ouest (Dafir 1997). L'organisation sédimentaire générale correspond à la résultante de l'action éolienne (matérialisée par les apports importants) et de l'action combinée de la houle et de la marée matérialisée par une dérive littorale le long de la côte atlantique ramenant des sédiments du nord (Khali 1990) et par les courants de marée qui redistribuent ces sédiments, ainsi que ceux ramenés par l'action éolienne à l'intérieur de la baie. Il en ressort globalement des zones sous la haute influence éolienne, caractérisées par des dépôts importants (bordure ouest et amont de la baie) et des zones sous l'influence de la

marée, caractérisées par des remaniements dans les chenaux et des dépôts sableux dans les interchenaux (centrale aval) et dans les zones côtières (bordure ouest).

La baie se dispose selon un axe Nord-Nord Est (dans la même direction que celle des vents dominants). De ce fait, la partie amont (nord) se situe dans l'axe des apports de sable continentaux et se trouve ainsi en comblement progressif. En plus de l'action des vents, les transports résiduels, dus uniquement aux courants des marées, sont principalement orientés vers le fond de la baie, ce qui contribue également à son ensablement (Sogreah 1983, 1984).

Egalement au niveau de la Baie de Tanger, la distribution des sédiments est contrôlée par des facteurs hydrodynamiques, ainsi que par les principales sources d'apport (oueds). Les sédiments sableux apparaissent dans la zone orientale, où prédomine la houle du NNE et NE, traduisant un milieu agité. Dans la zone occidentale, généralement plus protégée de l'action des houles du NO, les sédiments fins sont de plus en plus importants, avec d'autres mélanges de faciès de type sable vaseux et vase sableuse. Alors qu'au niveau de la baie de Cadix la dynamique sédimentaire est contrôlée principalement par les courants de marée, en particulier les courants de jusant. Il s'agit donc d'un exemple de milieu marin côtier dominé par les marées. Ces dernières sont responsables de la distribution des faciès sédimentaires, du remaniement des fonds peu profonds de la baie interne et du transport

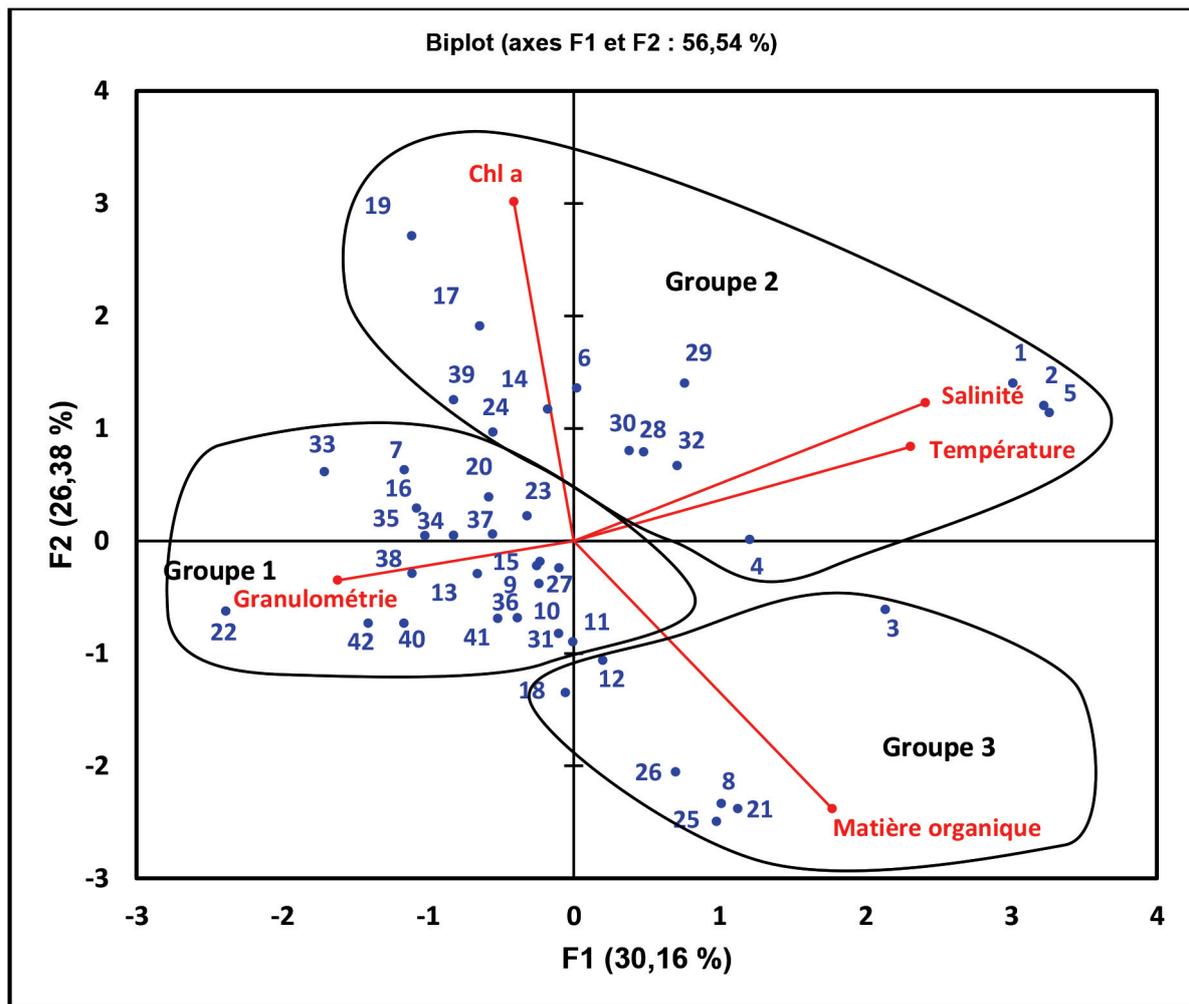


Figure 8. ACP normée des paramètres hydrologiques et sédimentologiques mesurés en hiver 2013 dans la baie de Dakhla.
 Figure 8. ACP standardized hydrological and sedimentological parameters measured in winter 2013 in the Bay of Dakhla.

des sédiments fins qui en résultent vers la partie externe de la baie. Ceci explique la présence des faciès vaseux dans le secteur central de la baie externe. Les courants produits par les houles de composante NO favorisent le transport des sédiments dans le sens de la dérive littorale. Les houles de SO sont responsables de l'érosion des plages, des cordons dunaires et les falaises plio-quaternaires qui bordent le littoral de Cadix. La morphologie de la côte et celle du fond marin, ainsi que la variation du niveau marin ont conditionné la dynamique sédimentaire et la distribution des faciès dans la baie de Cadix. Tandis que dans la baie d'Agadir, Les analyses granulométriques ont permis de montrer une forte relation entre les caractéristiques des sables de la plage d'Agadir et les agents dynamiques (houles, marées et courants) qui sont influencés en partie par les aménagements (port, brises lames, épis, extractions des matériaux...etc.). Les zones agitées et ouvertes aux actions des agents hydrodynamiques (Anza et la partie sud de la baie) présentent généralement des sables de taille moyenne (échanges avec le large). Tandis que les zones calmes protégées et abritées favorisent la sédimentation des sables de taille assez fine (faible échange avec le large) (Aouiche *et al.* 2017).

La distribution de la matière organique reste identique à celle décrite par Dafir (1997). En effet, les zones les plus riches sont localisées dans l'ombilic central. Ce schéma se

superpose à un fonctionnement de la baie qui redistribue les eaux entrantes selon un cycle rapide par un retour le long de la rive Est et selon un cycle lent le long de la rive Ouest. Cette organisation entraînerait une accumulation de la matière organique dans la zone amont et dans la bordure ouest. Cependant, ce schéma d'organisation est perturbé par les apports éoliens en particules silicoclastiques qui provoquent une dilution sédimentaire des éléments déposés dans ces deux zones. La seule partie qui continue à refléter ce fonctionnement est la zone d'ombilic grâce à sa disposition géomorphologique et à sa profondeur. Cette zone joue également un rôle essentiel dans la baie en récoltant une grande partie de la matière organique produite. L'augmentation de la profondeur à ce niveau favorise un tel fonctionnement. Ce même schéma de distribution a été observé également au niveau de la baie d'Ubatuba au Brésil (Burone *et al.* 2003).

La baie de Dakhla enregistre des teneurs en matière organique plus fortes que celles enregistrées au niveau de la baie d'Ubatuba (Brésil) (0,97 et 17,27 %) (Burone *et al.* 2003) et la baie d'Arcachon (France) (3 et 10 %) (Mosbahi *et al.* 2017).

Ces différences d'une baie à une autre peuvent être expliquées par la variation de surface d'une baie à une autre, la bathymétrie, l'hydrodynamisme, le vent, le climat, la houle, la marée et l'upwelling.

Les fortes concentrations en chlorophylle 'a' trouvée dans les sédiments de la baie de Dakhla, qui se trouve dans une zone d'upwelling permanent (Makaoui *et al.* 2001, 2005), sont dû au phénomène d'upwelling qui est un système dynamique qui sous l'action du vent, crée un flux vertical ascendant à la côte. Il apporte sur le plateau continental des eaux d'origine superficielle. Ce sont les sels nutritifs apportés dans la couche euphotique qui vont permettre de développer et de maintenir une forte production biologique dans la zone côtière (Roy 1991). Cette remontée d'eau froide augmente le contenu nutritif, qui augmente la production phytoplanctonique et qui se répercute sur le taux de concentration des organismes chlorophylliens, qui a connu des valeurs importantes aussi bien en saison printanière qu'hivernale. Ces fortes concentrations ont été trouvées par plusieurs auteurs (Makaoui *et al.* 2001, 2005, Somoue *et al.* 2013, Saad *et al.* 2013, 2015).

CONCLUSION

La présente étude apporte des éléments de caractérisation des eaux et du sédiment de la baie de Dakhla. De même, cette étude a relevé la complexité du fonctionnement de cet écosystème, qui réside dans l'instabilité temporelle des paramètres hydrologiques régis par les facteurs climatiques et l'upwelling. Ainsi, cette étude va être complétée par des recherches plus avancées et plus approfondies sur la macrofaune benthique et ses interactions avec le biotope pour comprendre le fonctionnement de cet écosystème et proposer des mesures de prévention et de conservation de cette zone humide d'importance internationale.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent particulièrement à remercier Mr. Mohmoud El khattat, tout le personnel de l'INRH de Dakhla pour leurs précieux appuis durant la campagne de mesures ainsi que les évaluateurs anonymes et l'éditeur du journal Hamid Slimani pour leurs utiles commentaires.

RÉFÉRENCES

- Ait Chattou E.M., Abounahel N., Kassila J. *et al.* 2019. Differential growth of the brown mussel, *Perna perna* (Linnaeus, 1758), in longline and pole cultures in Dakhla Bay (SW Morocco, Atlantic Ocean). *Aquaculture Research*, 50(3), 736–747.
- Aminot A. & Chaussepied M. 1983. Manuel des analyses chimiques en milieu marin. Ed. CNEXO, BNDO / Documentation, BREST.
- Aouiche I., Daoudi L., Elmimouni A. *et al.* 2017. Dynamique morpho-sédimentaire de la baie d'Agadir : Caractérisation sédimentologique et évolution des petits fonds. *Revue Marocaine de Géomorphologie*, 1, 31–46.
- Berraho A., Abdelouahab H., Larissi J. *et al.* 2019. Biodiversity and spatiotemporal variability of copepods community in Dakhla Bay (southern Moroccan coast). *Regional Studies in Marine Science*, 28, 100437.
- Burone L., Muniz P., Pires-Vanin A.M. *et al.* 2003. Spatial distribution of organic matter in the surface sediments of Ubatuba Bay (Southeastern – Brazil). *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 75(1), 77–90.
- Chardy P. 1970. Ecologie des Crustacés Péricarides des fonds rocheux de Banyuls-sur-Mer. Amphipodes, Isopodes, Tanaïdacés, Cumacés, infra-et cirralittoraux. *Vie Milieu*, 657–728.
- Chaouay A., Okhrib R., Hilali M. *et al.* 2016. Contribution à l'étude de l'analyse physico-chimique et de la contamination métallique de l'eau de mer du littoral d'Agadir (Sud du Maroc). *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(8), 2748–2759.
- Dafir J.E. 1997. *Application de la dynamique du phosphore à l'étude de l'organisation et du fonctionnement de certains écosystèmes aquatiques (lagune Nador, baie Dakhla, barrage Al Massira) (gestion et préservation)*. Thèse de Doctorat, Université Hassan II Ain Chock, Casablanca (Maroc), 300 p.
- Durand J.R. & Chantraine J.M. 1982. L'environnement climatique des lagunes ivoiriennes. *Revue d'hydrobiologie tropicale*, 15, 85–113.
- El Asri F., Martin D., Tamsouri MN. *et al.* 2019. Spatial and temporal variability in distribution, diversity, and structure of the polychaete assemblages from Dakhla Bay (Atlantic coast of South Morocco). *Marine Biodiversity*, 49, 1271–1281.
- Guélorget O. & Perthuisot J.-P. 1992. Paralic Ecosystems. *Vie Milieu*, 42(2), 215–251.
- Guélorget O. & Perthuisot J.-P. 1983. Le domaine paralic : Expressions géologiques, Biologiques et Economiques du Confinement. Presse de l'École Normale Supérieure (16), Paris, 137 p.
- Hilmi K., Makaoui A., Ettahiri O. *et al.* 2017. Fonctionnement hydrodynamique des baies de cintra et de Dakhla (sud du Maroc). *International Journal of Advanced Research*, 5(6) 91–100.
- Holm-Hansen O., Lorenzen C.J., Holmes R.W. *et al.* 1965. Fluorometric Determination of Chlorophyll. *ICES Journal of Marine Science*, 30(1), 3–15.
- Izzabaha O., Gjjje A., Dergoun A. *et al.* 2020. First trial on rearing European seabass *Dicentrarchus labrax* in floating cages in Dakhla Bay-SW Morocco, Atlantic Ocean. *AACL Bioflux*, 13(3), 1557–1569.
- Izzabaha O., Dergoun A., Bounacir A. *et al.* 2021. Growth rate, condition index and culture potential of the brown mussel *Perna perna* (Linnaeus, 1758) reared in a submerged longline system in Dakhla Bay, Morocco. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 25(4), 823–837.
- Khai T. 1990. *Sédimentologie des dépôts superficiels de la baie d'Ad-Dakhla*. Thèse 3^{ème} cycle Université Mohamed V, Faculté des sciences, Rabat, 118 pp.
- Lamine I., Ait Alla A., Bourouache M. *et al.* 2019. Monitoring of Physico-Chemical and Microbiological Quality of Taghazout Seawater (Southwest of Morocco) : Impact of the New Tourist Resort "Taghazout Bay". *Journal of Ecological Engineering*, 20(7), 79–89.
- Leynaud G. 1968. Les pollutions thermiques, influence de la température sur la vie aquatique. B.T.I. Ministère de l'agriculture, 224–881.
- Maanan M. 2013. *Impact des changements de l'occupation des sols sur l'état de l'environnement dans des écosystèmes côtiers : cas des lagunes d'Oualidia et de Moulay Bousselham (façade atlantique marocaine)*. Thèse de Doctorat, Université Chouaib Doukkali, El Jadida (Maroc), 188 p.
- Makaoui A., Orbi A., Hilmi K. *et al.* 2005. L'upwelling de la côte atlantique du Maroc entre 1994 et 1998. *C. R. Géoscience*, 337, 1518–1524.
- Makaoui A., Orbi A., Larissi J. *et al.* 2001. Principales caractéristiques océanographique de la côte atlantique marocaine de 1994 à 1998. Travaux de l'Institut Scientifique, Rabat, Section science de la vie, 23, 47–56.
- Mosbahi N., Blanchet H., Lavesque N. *et al.* 2017. Main ecological features of benthic macrofauna in Mediterranean and Atlantic intertidal eelgrass beds: a comparative study. *Journal of Marine Biology & Oceanography*, 6(2), 100174.

- Newton A., Brito A.C., Icelly J.D. *et al.* 2018. Assessing, quantifying and valuing the ecosystem services of coastal lagoons. *Journal for Nature Conservation*, 44, 50–65.
- Orbi A., Dafir J.E. & Berraho A. 1995. Etude pluridisciplinaire de la baie de Dakhla. Rapport N°86, INRH, Casablanca (Maroc), 26 p.
- Orbi A., Guélorget O. & Lefèbvre A. 1996. La baie de Dakhla, organisation biologique et fonctionnement. INRH, Dakhla, Maroc, 240 p
- Qninba A. 2013. Inventaire des zones humides du Maroc (IZHM) Fiche d'inventaire. *GREPOM*, 13 p.
- Roy C. 1991. Les upwellings : le cadre physique des pêcheries côtières ouest africaines. Ed. ORSTOM, p. 38–66.
- Saad Z., El-Gharmali A., El-Khallouf F. *et al.* 2015. Metal contamination of the macrobenthic fauna of the Dakhla Bay (South of Morocco): an ecotoxicological diagnostic and environmental perspective. *South Asian Journal of Experimental Biology*, 5(2), 55–69.
- Saad Z., Orbi A., Abouabdellah R. *et al.* 2013. Impact of economic development on the dynamics of phytoplankton and physicochemical quality of Dakhla Bay (south of Morocco). *South Asian Journal of Experimental Biology*, 3(5), 274–287.
- Sogreah J. 1983. Rapport de l'étude hydraulique des futures installations du port d'Ad Dakhla. Marché 29, DP82 Direction des ports secondaires, Rabat.
- Sogreah J. 1984. Etude sédimentologique de la baie d'Ad Dakhla. Direction des ports Secondaires, Rabat, p. 31.
- Somoue L., Berraho A., Ettahiri O. *et al.* 2013. Le plancton (phytoplancton, zooplancton et ichtyoplancton) de la côte atlantique sud marocaine (Cap Boujdor-Cap Blanc). Travaux de l'Institut Scientifique, Série Zoologie, 49, 7–18.
- W.H.O. 1987. Global pollution and health results of related environmental monitoring. *Global Environment Monitoring System*, WHO, UNEP.
- Zidane H. 2009. *Biologie et potentialités aquacoles de l'huître creuse Crassostrea Gigas (thunberg, 1793) en élevage dans la baie de Dakhla (sud du Maroc)*. Thèse de Doctorat, Université Ibn Tofail, Kénitra (Maroc), 154 p.
- Zidane H., Maanan M., Mouradi A. *et al.* 2017. Environmental and ecological risk of heavy metals in the marine sediment from Dakhla Bay, Morocco. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9), 7970–7981.
- Zidane H., Orbi A., Mouradi A. *et al.* 2008. Hydrological and edaphic structure of an oyster-farming site: Duna Blanca (Bay of Dakhla, south Morocco). *Environmental Technology*, 29(9), 1031–42.

Manuscrit reçu le 20/10/2022
Version révisée acceptée le 22/12/2023
Version finale reçue le 25/12/2023
Mise en ligne le 25/12/2023