

Variation spatio-temporelle des principales caractéristiques sédimentaires et hydrologiques de la lagune d'Oualidia (Côte atlantique marocaine)

Spatio-temporal variation of the main sedimentary and hydrological characteristics of the Oualidia lagoon (Moroccan Atlantic Coast)

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

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

Résumé. Ce travail porte sur l'étude des caractéristiques sédimentaires et hydrologiques de la lagune d'Oualidia 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 durant l'hiver et l'été 2013 au niveau de 43 stations réparties sur l'ensemble de la lagune. 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 la détermination de la quantité de chlorophylle 'a' présente dans le sédiment. Dans toutes les stations prospectées, la température et la salinité ont été mesurées in situ à l'aide d'une sonde multimétrique. Les résultats de l'analyse granulométrique ont montré une évolution de l'organisation sédimentaire de la lagune allant d'un faciès sableux en aval à un faciès vaseux en amont. L'examen des autres paramètres relevés a révélé un gradient croissant aval-amont de la teneur en matière organique mais aussi de la température de l'eau. Quant à la salinité, ses valeurs ont enregistré un gradient décroissant aval-amont alors que la quantité de chlorophylle 'a' contenue dans le sédiment a présenté une répartition spatiale hétérogène. Les paramètres étudiés ont tous montré une variation significative entre les deux saisons prises en compte.

Mots-clés : Caractéristiques sédimentaires, Variations spatio-temporelles, Lagune d'Oualidia, Maroc.

Abstract. This work concerns the study of the spatio-temporal variations of the main sedimentary and hydrological characteristics of the Oualidia lagoon 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 during winter and summer 2013 at 43 stations spread across the lagoon. Samples were taken using a Van Veen grab. They were used for particle size analysis, estimation of organic matter and analysis of the amount of chlorophyll 'a' in the sediment. In all the stations surveyed, temperature and salinity were measured in situ using a multimeter probe. The results of the particle size analysis showed an evolution of the sedimentary organization of the lagoon ranging from a sandy facies downstream to a muddy facies upstream. Examination of the other parameters noted, revealed an increasing downstream-upstream gradient in organic matter content but also in water temperature. As for the salinity, its values recorded a decreasing downstream-upstream gradient while the quantity of chlorophyll 'a' contained in the sediment showed a heterogeneous spatial distribution. The parameters studied all showed a significant variation between the two seasons taken into account.

Keywords: Sedimentary Characteristics, Spatio-temporal variations, Oualidia lagoon, Morocco.

Abridged English Version

Introduction

Coastal lagoons are particularly unstable and fragile transition zones, comprising a variety of different habitats of very unique ecological and ecosystem value (Gonenc & Wollin 2005, Newton *et al.* 2018). Their shallow depth and a high spatio-temporal variability of their physicochemical characteristics make them environments of high biological productivity (Barnaud & Fuštec 2007, Pérez-Ruzafa *et al.* 2019). The characteristics of these parallel environments are closely dependent on the balance between marine and continental influences. Climate change or erosion and sedimentation can quickly alter this balance.

The Oualidia lagoon is located on the Atlantic coast of Morocco and is ecologically very important. It is one of the most important lagoon systems in Morocco. The lagoon

is one of the twenty-four Moroccan sites considered by the RAMSAR Convention as wetlands of international interest and the most important wintering area for migratory birds in Morocco. Therefore, it has been declared a biological reserve with international interest for avifauna. This study is interested in the spatial variation of the main hydrological and sedimentary parameters of the Oualidia lagoon during two opposite seasons (summer and winter). Its main objective is to highlight potential gradients of these parameters in relation to the hydrodynamics of this lagoon and the hydro-sedimentary characterization of its different zones.

Study area

The Oualidia lagoon, 32°44'42" N - 09°02'50" W, is located on the Atlantic coast of Morocco (Fig. 1). The lagoon measures is nearly 7 km long and about 1 km wide. The basin occupies a north-south depression bordered by a continental

cliff and a coastal consolidated dune ridge. Water exchange with the ocean occurs through a major inlet about 150 m wide. There is also a secondary shallower inlet about 50 m wide, which is active only during spring tides. The lagoon morphology is characterized by lateral channels, connected to a meandering main channel, with an average depth of 2 m and a maximum depth (during flood tides) that does not exceed 5 m (Carruesco 1989). The lagoon flood tidal covers more than 75% (2.25 km²) of its surface, bringing salt water up to the most confined, inner lagoon region, as well as into a saline marsh beyond the inner dam (Fig. 1).

Sampling and data analysis

Forty-three stations (Fig. 1) were sampled in winter (March 2013) and summer (July 2013). All samples were collected using a Van Veen grab. The sediment samples were collected to analyse grain size, organic matter and chlorophyll 'a' content. The grain size of sediments collected at each sampling site was analysed using a laser granulometry (Malvern, Mastersizer) at the LETG (UMR 6554, University of Nantes) and expressed as mean grain size, in μm . The percentage of organic matter (OM, %) was obtained as the weight losses of dried samples (24 h, 60°C) after ignition (4h, 450°C). The chlorophyll 'a' content (chl-a, mg/m²) was determined according to the Lorenzen method (Holm-Hansen *et al.* 1965). Water parameters (salinity and temperature) were recorded at each site.

Results

The temperature was significantly higher ($p < 0.05$) in summer (16.1°C and 26.3°C) than in winter (16.9°C and 19.9°C) and progressively increased downstream-upstream in both seasons (Fig. 2). Salinity was also significantly higher ($p < 0.05$) in summer (10.5 ‰ and 39.6 ‰) than in winter (10.1 ‰ and 39.5 ‰) and progressively decreased downstream-upstream in both seasons (Fig. 3). Organic matter contents presented an increasing downstream-upstream gradient and Chlorophyll 'a' showed a very heterogeneous distribution among the studied stations. In contrast to temperature and salinity, the Chl-a temporal pattern, as well as that of OM, showed significantly higher ($p < 0.05$) values in winter (1.19 and 23.41 mg/m² and 1.94 to 31.97%) than in summer (0.85 and 8.79 mg/m² and 1.73 to 15.1%) (Fig. 4). The granulometry presents significant differences between the two seasons ($P < 0.05$) (Fig. 5).

Discussion

Seasonal changes of temperature as observed in this study shows a gradual rise from winter to summer, these results are consistent with previous studies (Chbicheb 1996, Bennouna *et al.* 2000, Natij *et al.* 2014). These values reflect the influence of the atmospheric temperature on the ocean temperature. This influence was observed throughout the lagoon, especially at the passes, indicating an active hydrodynamic. The salinity was low during the winter in accordance with higher precipitation and has increased in the summer due to high evaporation rates and low freshwater inputs from the land (Chbicheb 1996; Rharbi *et al.* 2001). The salinity data showed a very pronounced gradient decrease from downstream to upstream, explained by the arrival of freshwater masses upstream of the lagoon, which reduces salinity in this part. This finding has also been reported by Chbicheb (1996), Rharbi *et al.* (2001), Hennani *et al.* (2012) and Hassou *et al.* (2014). The distribution of total organic matter closely followed the trend of distribution of sediment types, i.e. higher sedimentary organic matter was found in clay soil as the clay content decreased, and the total organic matter content also increased. Seasonally, the maximum was recorded during the winter. The important levels of organic matter in winter are linked to the arrival of a thick layer of mud following the rainwater runoff. The organic matter content was higher in the Oualidia lagoon than those noted at other Moroccan lagoons, such as the Atlantic Sidi Moussa (7.47 and 20.5 %) (Joulami *et al.* 2013) and Merja Zerga (1.10 and 14.6 %) (Bazairi *et al.* 2005) lagoons, and also higher than those in well studied European lagoons, such as the Venice lagoon (0.43 and 1.09%) (Bellucci *et al.* 2002). In turn, the high concentrations of chl-a originated from the leaching of agricultural lands in the watershed, these being so rich in nutrients that the leaching into the lagoon results in a significant increase in chl-a.

Conclusion

This study provides important elements for characterizing the waters and sediments of the Oualidia lagoon. It has contributed to improving knowledge of the hydrological and sedimentary structure and organization and presents therefore an updated reference state.

INTRODUCTION

Les lagunes côtières sont des zones de transition particulièrement instables et fragiles, comprenant une variété d'habitats différents d'une valeur écologique et écosystémique tout à fait unique (Gonenc & Wollin 2005, Newton *et al.* 2018). Leur faible profondeur et la forte variabilité spatio-temporelle de leurs caractéristiques physico-chimiques font d'elles des milieux de forte productivité biologique (Barnaud & Fustec 2007, Pérez-Ruzafa *et al.* 2019). Les caractéristiques de ces milieux paraliques sont étroitement dépendantes de l'équilibre entre influences marines et continentales. Le changement climatique ou l'érosion et la sédimentation peuvent modifier rapidement cet équilibre.

La lagune d'Oualidia fait partie des écosystèmes côtiers les plus importants sur la façade atlantique marocaine. De plus, elle est identifiée comme un site d'intérêt écologique et biologique (SIBE) et labellisée en tant que site RAMSAR. Par sa richesse bioécologique, cette lagune procure un grand nombre de services écosystémiques aux populations riveraines comme la pêche, l'aquaculture et un large éventail

d'activités économiques et récréatives (El Mahrad *et al.* 2020). Cependant, les activités humaines dans et à proximité de la lagune exercent de multiples pressions sur l'écosystème et entraînent des changements dans son environnement et, par conséquent, affectent ces précieux services écosystémiques.

Cette lagune a fait l'objet de nombreuses études et cela sous différents angles disciplinaires, mettant en avant l'évolution perpétuelle de la lagune au cours du temps. Le niveau de connaissances scientifiques de ce site est relativement avancé. Cependant, la préservation de ce milieu fragile, devenu une cible d'expansion économique, nécessite un suivi des processus contrôlant son évolution. Comme toutes les lagunes côtières, ce milieu est hautement évolutif sous la dépendance de multiples facteurs naturels et anthropiques. Les processus écosystémiques dans les lagunes côtières sont gouvernés par les interactions entre les facteurs de stress et les flux de matières entre le continent, l'océan et l'atmosphère, induisant des conditions très dynamiques et changeantes. Le spectre de variabilité étant complexe, on ne peut suivre et comprendre ces variations qu'en disposant de plus de données scientifiques. D'ailleurs, certains auteurs

considèrent les lagunes comme des « systèmes sentinelles » et soulignent l'importance d'échange d'information pour permettre d'anticiper au mieux leur changement (Brito *et al.* 2012).

L'hydrodynamisme dans la lagune est principalement gouverné par la marée (Orbi *et al.* 2008, Hilmi *et al.* 2005, 2009). Les courants engendrés par la marée suivent la direction du chenal principal de la lagune et sont très intenses en aval et diminuent vers l'amont. La marée constitue un élément important dans le système hydro-sédimentaire de ce milieu et intervient directement et indirectement sur sa morphogénèse. Son action se conjugue aux effets de la houle, entraînant la modification des processus de sédimentation qui peuvent se manifester, soit par des accumulations, soit par des érosions. Le marnage dans la lagune diffère légèrement à cause de l'asymétrie des courants qui dépend de la forme de la lagune, de la position de son chenal principal et de la morphologie des zones intertidales. Cela entraîne une sédimentation fine dans la partie interne de la lagune et sableuse dans sa partie externe (Koutitonsky *et al.* 2006). L'évolution des paramètres physicochimiques de l'eau au sein de la lagune dépend en grande partie de l'effet prépondérant des échanges permanents avec l'océan et des faibles apports en eau douce. Les variations spatiales de ses paramètres correspondent, de ce fait, à un gradient d'éloignement par rapport à l'océan.

Dans le contexte d'une actualisation permanente des données, cette étude s'intéresse à la variation spatiale des principaux paramètres hydrologiques et sédimentaires de la lagune d'Oualidia au cours de deux saisons opposées : l'été 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 lagune et la caractérisation hydro-sédimentaire de ses différentes zones.

MATERIEL ET METHODES

Site d'étude

La lagune d'Oualidia est située sur la façade atlantique du Maroc, à 76 km au sud d'El Jadida et à 67 km au nord de Safi (Rharbi *et al.* 2001) (Fig. 1). Ses coordonnées géographiques, au niveau de sa communication principale avec l'Océan Atlantique, sont de 32°44'42" N et 09°02'50" W. Elle s'étend parallèlement à la côte océanique. Sa longueur est de 7,5 km avec une largeur immergée de l'ordre de 0,4 à 0,5 km suivant l'état de marée. Sa superficie totale est de l'ordre de 3,5 km².

Elle communique avec l'Océan Atlantique par deux passes dont la principale est de 150 m de large environ, permanente et active toute l'année, et la secondaire est de 50 m de large, active uniquement en période de marées de vives-eaux. La partie avale (vers la mer) de cette lagune est de forme ovale, formée en plus de ses deux passes de communication permanente avec l'Océan Atlantique, d'une bande sablière (Fig. 1). Cette partie se prolonge par un chenal sinueux de 6,5 km de long, à l'extrémité duquel une digue artificielle sépare la lagune des marais salants existants. La profondeur maximale de ce chenal ne dépasse pas les 5 à 6 m à marée de vives eaux. D'autres chenaux secondaires existent aussi et dont la profondeur maximale est de l'ordre de 1 à 1,5 m avec des zones intertidales et des schorres envahis par une végétation halophile.

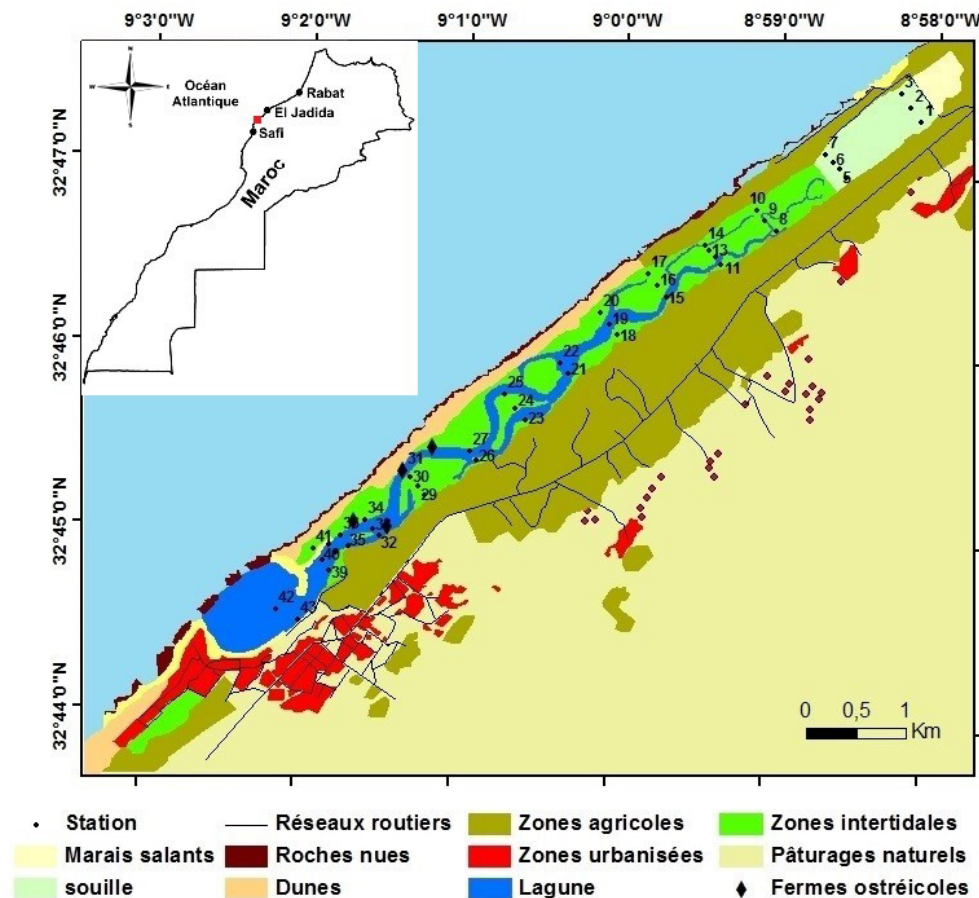


Figure 1. Localisation géographique du site d'étude et des stations échantillonnées dans la lagune d'Oualidia.

Figure 1. Geographical location of the study site and the stations sampled in the Oualidia lagoon.

Echantillonnage et analyses de laboratoire

Pour couvrir la lagune d'Oualidia 43 stations ont été choisies (Fig. 1) selon une stratégie de type « systématique » (répartition des échantillons à équidistance les uns des autres) de façon à couvrir toute la zone d'étude. Les radiales ont été tracées perpendiculairement à la côte, et sur chacune de ces radiales, une ou plusieurs stations ont été échantillonnées. Les échantillons sédimentaires ont été prélevés en hiver (mars) et en été (juillet) 2013 à marée haute avec la benne Van Veen. Ils ont servi à l'analyse granulométrique, à l'estimation de la matière organique et à l'évaluation de la quantité de chlorophylle 'a' présente dans le sédiment.

La granulométrie du sédiment a été déterminée à l'aide d'un granulomètre laser type Malvern 2000. L'ensemble des échantillons a été traité au 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* à environ 1 m de profondeur à l'aide d'une sonde multimétrique.

Analyse numérique 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 lagune d'Oualidia varie en hiver entre 16,9°C et 19,9°C et montre un gradient croissant de l'aval vers l'amont de la lagune (Fig. 2). En été, ses valeurs sont globalement plus élevées et varient entre 15,5°C et 26,2°C. Elles présentent à peu près la même tendance de variation qu'en hiver mais avec un gradient plus marqué (Fig. 2). Ces résultats montrent que les variations de la température des eaux de la lagune d'Oualidia sont soumises aux rythmes saisonniers des températures atmosphériques avec une différence significative entre l'hiver et l'été, confirmée par le test de Wilcoxon ($p < 0,05$).

Salinité

La salinité des eaux de la lagune d'Oualidia varie de 10,1 à 39,5‰ en hiver avec une moyenne de $33 \pm 4,5\%$ et montre un gradient décroissant de l'aval vers l'amont de la lagune (Fig. 3). Les salinités les plus élevées sont observées principalement au niveau des stations situées en aval de la lagune. En été, la variation spatiale de la salinité présente à peu près la même tendance qu'en hiver mais avec un gradient décroissant aval-amont plus marqué (Fig. 3). Ses valeurs varient entre 10,5 et 39,6‰ avec une moyenne de $35,1 \pm 4,9\%$. La variation des

salinités entre l'hiver et l'été reste cependant significative et cela est confirmé par le test de Wilcoxon ($p < 0,05$).

Paramètres sédimentaires

Granulométrie

L'analyse granulométrique des sédiments dans la lagune d'Oualidia en hiver a révélé la présence de trois types de faciès : faciès sableux, faciès silto-sableux et faciès silto-argileux. L'organisation sédimentaire de la lagune montre une évolution granulométrique à partir d'un pôle sableux en aval vers un pôle vaseux en amont (Fig. 4). Le faciès sableux, qui caractérise la zone de la passe et la sablière, est généralement constitué de sables présentant les mêmes caractéristiques que les sables des plages de part et d'autre de la passe, suivi d'un faciès silto-sableux au niveau de la zone médiane, et d'un faciès silto-argileux au niveau de la zone amont, riche en débris ligneux des plantes halophiles. En été, il y a également présence de trois types de faciès, avec un faciès sableux en aval, un faciès silto-sableux dans la zone centrale et un faciès silto-argileux surtout au niveau de la souille et des parcs ostréicoles (Fig. 4). Cependant, une différence significative entre les deux saisons étudiées est notée concernant la variation spatiale de la granulométrie du sédiment dans la lagune (Test de Wilcoxon, $P < 0,05$).

Matière organique

La quantité de la matière organique contenue dans les sédiments de la lagune d'Oualidia augmente de l'aval vers l'amont de la lagune en hiver (Fig. 5). Les fortes teneurs au niveau de la zone amont représentent jusqu'à 32% du sédiment. Les teneurs de la zone aval ne représentent qu'environ 2%. En été, les teneurs en matière organique des sédiments sont beaucoup moins importantes avec un maximum de 15,1% (Fig. 5). Cependant, leur répartition présente une tendance similaire à celle observée en hiver avec un gradient croissant aval-amont. La différence entre l'hiver et l'été a été confirmée par le test de Wilcoxon ($p < 0,05$).

Chlorophylle 'a'

La répartition spatiale des teneurs en chlorophylle 'a' des sédiments de la lagune d'Oualidia est présentée dans la figure 6. Ce paramètre renseigne sur la quantité de microphytobenthos. En hiver, cette chlorophylle 'a' présente une répartition spatiale hétérogène avec des quantités allant de 1,2 à 23,4 mg/m². Les teneurs les plus importantes sont rencontrées essentiellement dans la partie centrale de la lagune, et surtout au niveau de la rive continentale. En été, les teneurs en chlorophylle 'a' sont moins importantes et n'atteignent au maximum que 8,8 mg/m². Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans la zone centrale de la lagune. La différence entre l'hiver et l'été a été confirmée par le test de Wilcoxon ($p < 0,05$).

Analyse numérique des paramètres physico-chimiques

Une analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée pour visualiser les corrélations éventuelles entre les différents paramètres du milieu étudié et déterminer les groupes de stations dont les caractéristiques hydrologiques sont similaires.

Situation hivernale

Les deux premiers axes expriment 64% de la variance totale. Les résultats montrent une forte corrélation des paramètres température, matière organique et granulométrie

avec l'axe F1, positive pour les deux premiers et négative pour le dernier. La salinité et la chlorophylle 'a' présentent, au contraire, une forte corrélation positive avec l'axe F2 (Fig. 7).

Sur le plan factoriel F1/F2, la projection des stations de prélèvements a permis de mettre en évidence une disposition

aval-amont selon l'axe F1. Ainsi, deux groupes de stations à caractères similaires sont mis en évidence :

Le groupe 1 est constitué des stations situées en aval plus proches de la passe avec une influence marine marquée (salinité forte, température fraîche) et un hydrodynamisme fort.

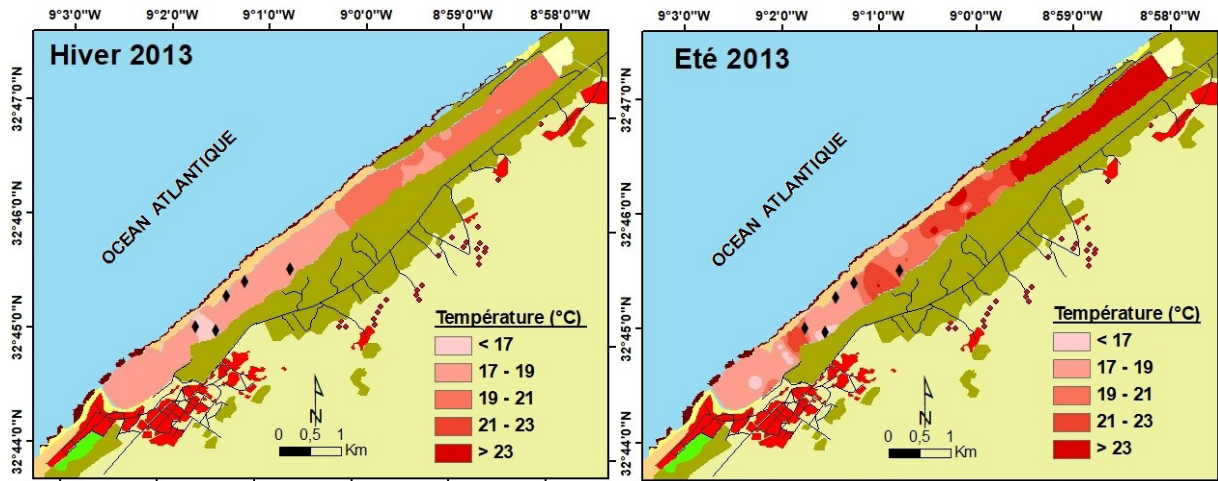


Figure 2. Distribution spatiale de la température de surface dans la lagune d'Oualidia en hiver et en été 2013.

Figure 2. Spatial distribution of the surface temperature in the Oualidia lagoon in winter and summer 2013.

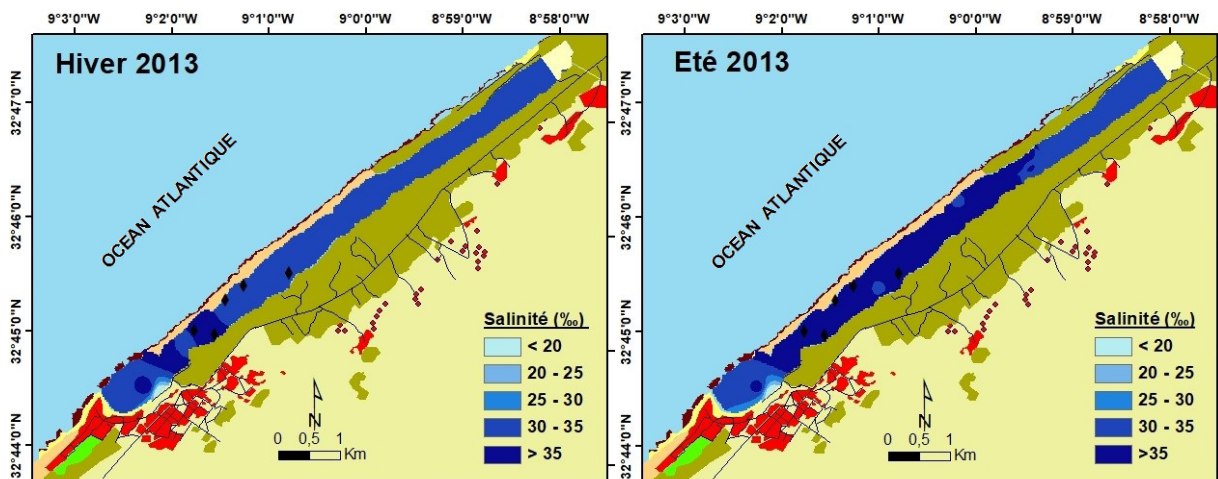


Figure 3. Distribution spatiale de la salinité dans la lagune d'Oualidia en hiver et en été 2013.

Figure 3. Spatial distribution of salinity in the Oualidia lagoon in winter and summer 2013.

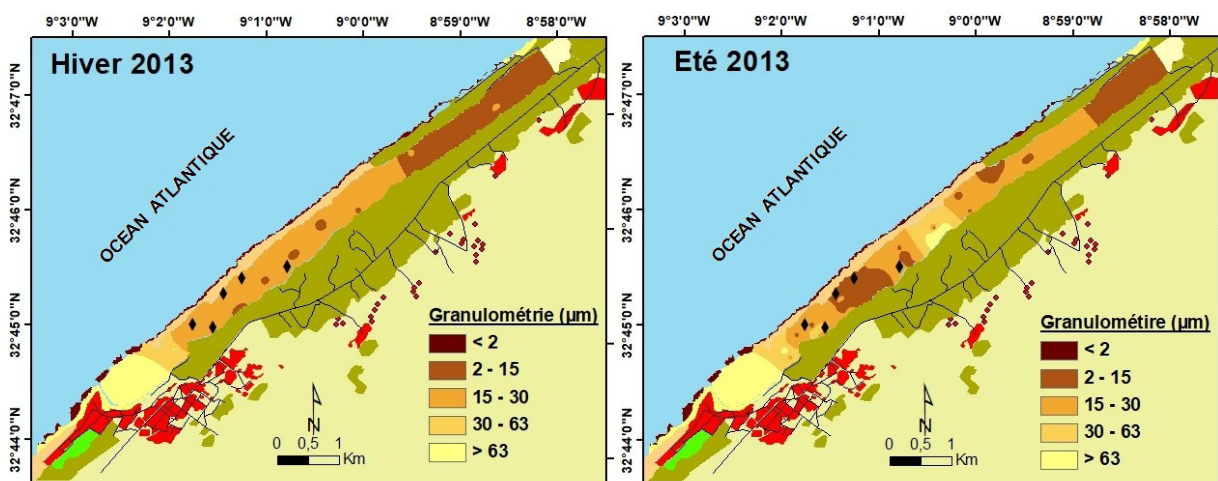


Figure 4. Variation spatiale de la granulométrie dans la lagune d'Oualidia en hiver et en été 2013.

Figure 4. Spatial variation in grain size in the Oualidia lagoon in winter and summer 2013.

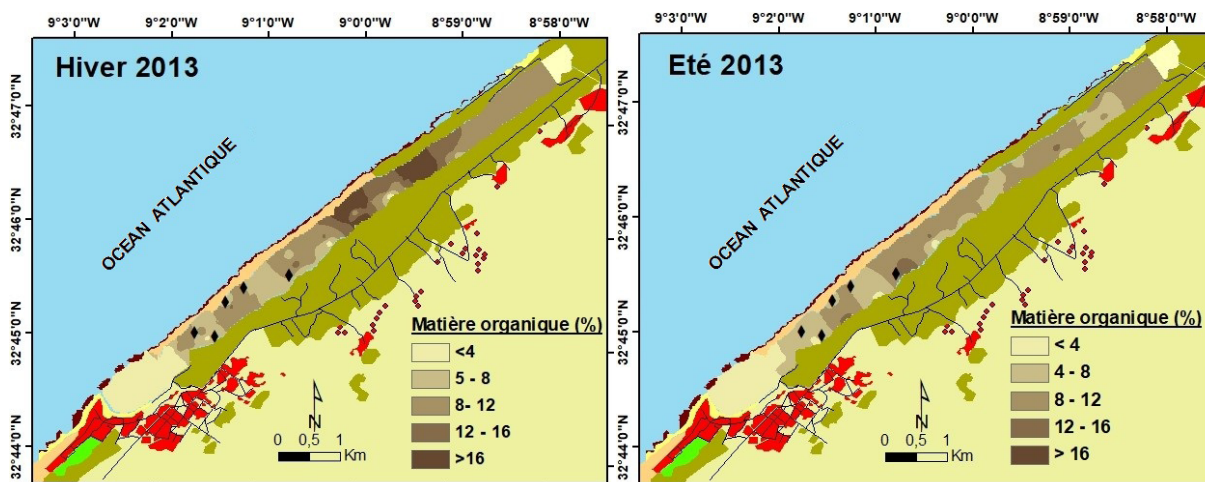


Figure 5. Distribution spatiale des teneurs en matière organique dans la lagune d'Oualidia en hiver et en été 2013.
 Figure 5. Spatial distribution of organic matter contents in the Oualidia lagoon in winter and summer 2013.

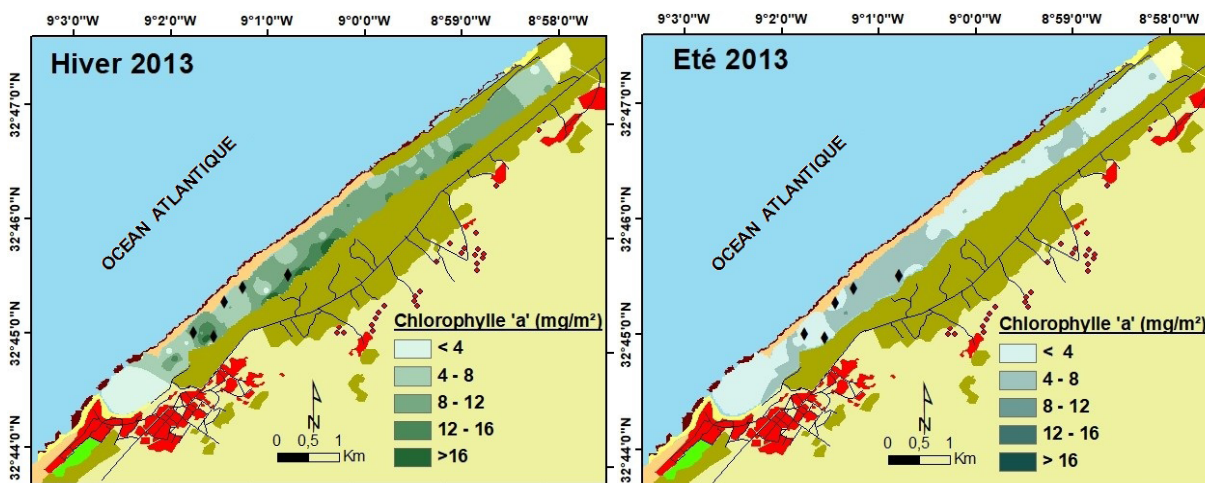


Figure 6. Distribution spatiale de la teneur en chlorophyll 'a' dans le sédiment de la lagune d'Oualidia en hiver et en été 2013.
 Figure 6. Spatial distribution of the chlorophyll 'a' content in the sediment of the Oualidia lagoon in winter and summer 2013.

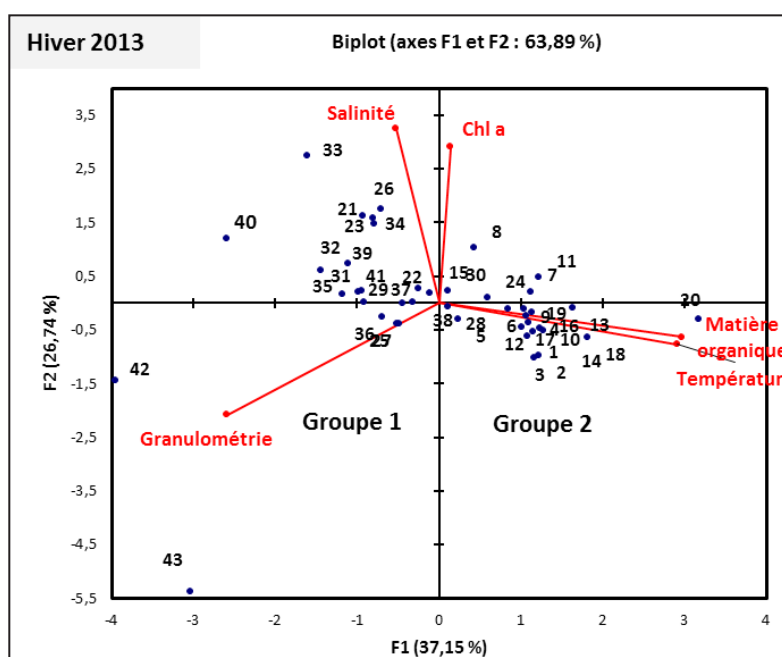


Figure 7. ACP normée des paramètres physico-chimiques mesurés en hiver 2013 au niveau de la lagune d'Oualidia.
 Figure 7. Normalized PCA of the physico-chemical parameters measured in winter 2013 in the Oualidia lagoon.

Le groupe 2 est constitué des stations situées en amont caractérisées par avec une influence marine faible (salinité faible, température élevée), un hydrodynamisme faible et des apports d'eau douce à partir des résurgences et des eaux de ruissellement lors de la période pluvieuse.

Situation estivale

Les deux premiers axes expriment 66,3% de la variance totale. Les résultats montrent une forte corrélation des paramètres température, matière organique et granulométrie

avec l'axe F1, négative pour les deux premiers et positive pour le dernier. La salinité présente, au contraire, une forte corrélation positive avec l'axe F2. La chlorophylle 'a' est, par contre, faiblement corrélée avec les deux axes (Fig. 8). Sur le plan factoriel F1/F2, la projection des stations de prélèvements a permis de mettre en évidence une disposition amont-aval selon l'axe F1, inversée par rapport à la situation hivernale. Les deux groupements de stations mis en évidence sont similaires à ceux identifiés en hiver mais dont la disposition est inversée selon l'axe F1 par rapport à la situation hivernale.

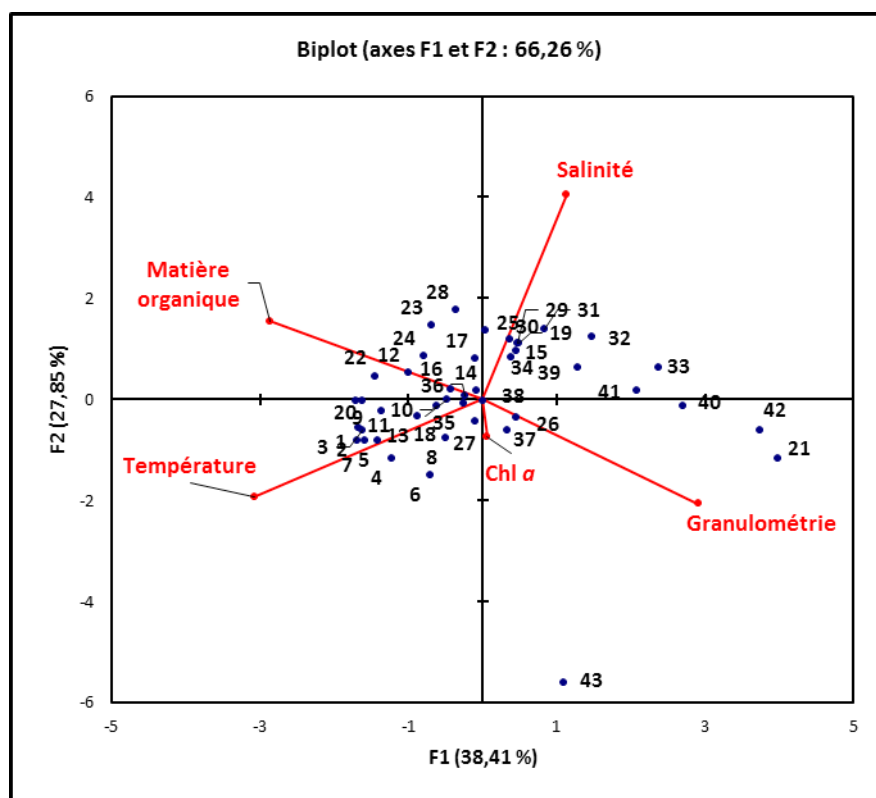


Figure 8. ACP normée des paramètres physico-chimiques mesurés en été 2013 au niveau de la lagune d'Oualidia.

Figure 8. Normalized PCA of the physico-chemical parameters measured in summer 2013 in the Oualidia lagoon.

DISCUSSION

La connaissance du milieu à travers les mesures de ses caractéristiques physico-chimiques et sédimentaires est particulièrement indispensable à toute étude écologique (Chardy 1970). En effet, les caractéristiques propres aux écosystèmes aquatiques résultent de l'interaction directe ou indirecte des facteurs climatiques, hydrologiques et édaphiques qui définissent en grande partie l'environnement aquatique dans ses dimensions tant physico-chimiques que biologiques (Durand & Chantraine 1982).

L'ensemble des facteurs environnementaux et tout particulièrement la température, la salinité, la disponibilité alimentaire et la nature du substrat sont les plus importants dans la régulation de la distribution, l'abondance et le cycle de reproduction des organismes benthiques. La répartition du macrobenthos est fortement déterminée par la nature granulométrique qui, à son tour, est liée aux conditions environnementales, telles que la vitesse du courant (Buchanan 1984). En plus de la texture, d'autres caractéristiques sédimentaires contrôlent cette structuration, telle que sa teneur en chlorophylle 'a' ou en matière organique si bien que leurs modifications sont susceptibles de bouleverser

l'organisation des peuplements benthiques. Cette matière organique représente une source potentielle de nourriture pour la macrofaune (Edgar 1999), et la teneur en chlorophylle 'a' révèle la quantité de microphytobenthos contenue dans le sédiment qui est une source de nourriture pour les dépositives en raison de leur productivité élevée (Macintyre *et al.* 1996) et également pour les suspensivores quand il est remis en suspension dans la colonne d'eau (Miller *et al.* 1996).

De même, les caractéristiques hydrologiques jouent un rôle très important dans la détermination de la nature, la composition et la distribution de la faune benthique. La température revêt une importance capitale directement en agissant sur l'activité métabolique des organismes, ou indirectement en modifiant les facteurs écologiques du milieu et par conséquent leur répartition biogéographique. La salinité conditionne la répartition et la dynamique des espèces (Verschuren *et al.* 2000).

La température de l'eau de la lagune d'Oualidia est fonction surtout de l'éclairement solaire (source d'énergie), des échanges avec l'atmosphère et avec l'eau de mer à marée haute. En ce qui concerne les échanges par mélange avec les eaux sous-jacentes, les eaux peu profondes de la lagune,

les vents et les courants importants provoquent un brassage suffisant pour répartir de façon quasi-homogène l'énergie solaire.

La température de l'eau de la lagune d'Oualidia suit un rythme saisonnier net avec des valeurs minimales en hiver et maximales en été. Cette gamme de température de l'eau, allant de 15,5°C à 26,2°C est comparable à celle observée par d'autres auteurs (Rharbi *et al.* 2001, Hilmi *et al.* 2009, Hennani *et al.* 2012, Damsiri *et al.* 2014, Natij *et al.* 2014, Damsiri *et al.* 2017, Hilmi *et al.* 2017, Makaoui *et al.* 2018, Anhichem *et al.* 2021). Cette gamme est également observée dans la lagune voisine de Sidi Moussa (Joulami *et al.* 2013). De plus, la température augmente de l'aval vers l'amont, traduisant l'influence des eaux océaniques froides à l'entrée de la lagune et reflétant la diminution de la profondeur vers l'amont qui favorise un réchauffement rapide des eaux.

L'analyse de la salinité montre des variabilités de fortes amplitudes (10,1 à 39,5‰), aussi bien spatiales que temporelles (10,1 à 39,5‰), dans la lagune d'Oualidia. Cependant, cette lagune n'est l'exutoire d'aucun cours d'eau. L'influence continentale se manifeste uniquement par les apports des résurgences qui alimentent la lagune en eau douce ainsi que par les précipitations en période humide. La salinité dépend donc de ces apports d'eau douce qui sont variables avec les saisons et de la marée qui régule le flux d'eau entre l'océan et la lagune.

La répartition de la salinité est marquée par deux particularités ; les valeurs maximales sont enregistrées en été et celles minimales en hiver. Les caractéristiques halines de la lagune d'Oualidia sont fortement influencées par les conditions climatiques et il se produit donc, soit une dessalure induite par les précipitations en période hivernale, soit une sursalure en période estivale induite par l'ensoleillement qui conduit à l'évaporation des eaux. Ce même schéma de variation saisonnière est observé dans d'autres lagunes du littoral, à Merja Zerga avec des salinités maximales de 35,0‰ en été (Bazaïri *et al.* 2003) et à Nador où les salinités enregistrées atteignent un maximum de 40,9‰ en été (Bloundi 2005).

La distribution spatiale de la salinité au sein de la lagune d'Oualidia suit un gradient de dessalure de l'aval vers l'amont de la lagune. En effet, en aval les valeurs de salinité sont équivalentes à l'échelle de l'eau océanique qui alimente la lagune à travers les passes. Cette salinité diminue de façon régulière vers l'amont. Cette diminution s'explique par la décharge des eaux souterraines le long de la lagune. Cette décharge se fait en général de manière ponctuelle à travers des sources. Parmi ces sources il y en a celles qui émergent à marée basse et d'autres qui sont continuellement immergées dans la lagune (Kaid Rassou, 2009).

En période humide, la salinité de la lagune est généralement plus faible qu'en période sèche car les apports de cette nappe sont naturellement plus forts en période humide quand la nappe est en charge, d'où la différence des salinités par rapport à la période estivale pendant laquelle le niveau de la nappe baisse en raison du manque des précipitations. A ceci s'ajoute l'effet de l'évaporation induit par l'ensoleillement. Ces résultats confirment de manière générale ceux des travaux antérieurs menés dans cette lagune, en particulier Chbicheb (1996), Rharbi *et al.* (2001), Hennani *et al.* (2012), Hassou *et al.* (2014), Natij *et al.* (2014, 2021), Damsiri *et al.* (2017), Hilmi *et al.* (2017), Makaoui *et al.* (2018) et Anhichem *et al.* (2021).

Les faciès sédimentaires varient d'un faciès silto-argileux dans la partie amont à un faciès sableux dans la partie aval.

La répartition spatiale de ces faciès sédimentaires est due essentiellement aux courants des marées qui constituent le facteur essentiel de transport des particules sédimentaires. Ces courants sont forts dans la partie aval et s'affaiblissent vers l'amont de la lagune ce qui facilite la sédimentation des particules fines.

La caractérisation des sédiments indique un environnement dynamique avec un faciès sableux qui occupe la zone aval. Il s'agit d'un sable fin à moyen riche en débris coquilliers de lamellibranches et gastéropodes. Un faciès silto-sableux se localise au niveau des chenaux de marée et des slikkes au niveau de la zone médiane de la lagune. Un faciès silto-argileux caractérise la zone amont, riche en débris ligneux des plantes halophiles. Ces résultats concordent avec d'autres études dans la même lagune (Bidet & Carruesco 1982, Zourarah 2002, Maanan 2013, Makaoui *et al.* 2018).

La répartition de la matière organique dans la lagune d'Oualidia semble être liée à trois facteurs :

- Facteur hydrodynamique : les courants sont forts dans la partie aval et s'affaiblissent vers l'amont de la lagune ce qui facilite la sédimentation des particules fines. Les zones enrichies en matière organique correspondent aux zones où la fraction fine est relativement riche en silt fin et en argile. Les teneurs les plus faibles correspondent aux sables. L'accumulation de la matière organique est favorisée essentiellement par la décomposition des macroalgues, la faible hydrodynamique et la présence de sédiments fins. La faible énergie hydrodynamique intervient dans le dépôt des sédiments fins qui favorise la croissance d'une faune abondante (Civinades *et al.* 2002).

- Facteur biologique : la faune et la flore jouent un rôle important dans la production de la matière organique. La lagune d'Oualidia présente une biomasse phytoplanctonique importante (Bennouna *et al.* 2000, Natij *et al.* 2014, 2021, Soumoue *et al.* 2020) et présente également, dans la zone intertidale, une abondante flore lagunaire à *Spartina maritima*, *Fucus*, *Cladophora*, *Zostera maritima*, *Zostera nana*, *Suaeda fructicosa*. Dans les zones les plus hautes du schorre, c'est une abondante flore halophile qui prolifère (*Salicornia lignosa*, *Obione partulactoides* et *Salicornia fructicosa*) (Maanan 2013).

- Facteur anthropique : l'action anthropique semble jouer un rôle primordial dans l'enrichissement en matière organique. Les valeurs les plus importantes en matière organique sont signalées en face du parc d'ostréiculture par la production in situ intra-lagunaire de la matière fécale.

Les apports terrigènes à travers les eaux de ruissellement et les résurgences constituent une source supplémentaire de matière organique qui peut devenir prépondérante surtout en amont de la lagune. La teneur en matière organique est beaucoup plus élevée en hiver qu'en été. L'apport en matière organique par le ruissellement et les infiltrations d'eau douce par les résurgences est donc plus important que celui issue de la production locale obtenue par la faune et la flore du milieu. Ce même résultat a été rapporté par Chbicheb (1996) et Makaoui *et al.* (2018).

La répartition de la matière organique dans les sédiments suit le même schéma de la distribution de la fraction fine. En effet, en aval de la lagune, les taux de la matière organique sont très faibles car les courants de marée importants empêchent la sédimentation des particules fines et de la matière organique. Vers l'amont de la lagune, ces courants diminuent d'intensité, et cette diminution à l'intérieur de la lagune serait la cause

des dépôts des particules fines et l'accumulation de la matière organique.

La lagune d'Oualidia enregistre des teneurs en matière organique plus fortes que celles enregistrées au niveau de la lagune de Sidi Moussa (7,47 et 20,5 %) (Joulami *et al.* 2013), la lagune de Merja Zerga (1,10 et 14,6 %) (Bazaïri *et al.* 2005) et la lagune de Smir (8 et 13,5 %) (Chaouti & Bayed 2008).

Les fortes concentrations en chlorophylle 'a' dans les sédiments de la lagune d'Oualidia sont relevées en hiver. Pendant cette saison, la lagune subit un enrichissement en éléments nutritifs issus du lessivage des terrains agricoles du bassin versant. En été, les valeurs ont été faibles et les fortes teneurs sont notées dans la partie aval alimentée par les eaux marines chargées en sels nutritifs grâce à l'upwelling qui se manifeste dans cette zone du littoral (Makaoui *et al.* 2018). Dans la partie amont, ces sels sont rapidement utilisés par les organismes végétaux par l'intermédiaire de la photosynthèse. Cette activité est favorisée, à ce niveau, par un fort ensoleillement, des températures élevées et des profondeurs très faibles.

CONCLUSION

Dans un contexte général de gestion et de préservation des écosystèmes côtiers, cette étude a eu pour objectif la caractérisation des eaux et du sédiment de la lagune d'Oualidia. Pour cela, un échantillonnage systématique a été adopté sur un réseau d'échantillonnage couvrant la totalité de la zone d'étude afin d'avoir une image plus complète que possible de l'écosystème étudié. Les prélèvements au niveau du site d'étude ont été effectués en deux campagnes d'échantillonnage de façon à constituer un éventail de situations prises à deux saisons différentes.

Dans la lagune d'Oualidia, la température, la granulométrie et la teneur du sédiment en matière organique présentent un gradient de variation croissant aval-amont, la salinité présente un gradient décroissant et la variation de la chl-a ne montre pas de gradient visible. Les valeurs de la température et de la salinité sont plus élevées en été par rapport à l'hiver et les teneurs en matière organique et en chl-a sont plus élevées en hiver par rapport à l'été. La préservation de la lagune et l'exploitation rationnelle de ses ressources naturelles nécessitent l'élaboration d'un plan d'aménagement, et cette étude offre les connaissances de base pour le réaliser.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent particulièrement à remercier B. Moutaki et M. Tounani, tout le personnel de la station RSSL de l'INRH à Oualidia pour leurs précieux appuis durant la campagne de mesures ainsi que les évaluateurs anonymes pour leurs utiles commentaires.

REFERENCES

- Anhichem M., Yahyaoui A., Adil O. *et al.* 2021 Evaluation of the growth potential and contamination of the European clam (*Ruditapes decussatus*), raised using the suspension culture technique at the Oualidia lagoon in Morocco. *AAFL Bioflux*, 2,786–803.
- Barnaud G. & Fuštec E. 2007. *Conserver les zones humides : pourquoi ? Comment ?* Educagri, Ed. Lavoisier. 241 pp.
- Bazaïri H., Bayed A., Glémarec M. *et al.* 2003. Spatial organization of macrozoobenthic communities in response to environmental factors in a coastal lagoon of the NW African coast (Merja Zerga, Morocco). *Oceanologica Acta*, 26, 457–471.
- Bazaïri H., Bayed A. & Hily C. 2005. Structure et bioévaluation de l'état écologique des communautés benthiques d'un écosystème lagunaire de la côte atlantique marocaine. *Comptes Rendus Biologies*, 328, 977–990.
- Bellucci L.G., Frignani M., Paolucci D. *et al.* 2002. Distribution of heavy metals in sediments of the Venice Lagoon: the role of the industrial area. *Science of the total Environment*, 295 (1–3), 35–49.
- Bennouna A., Assobhei O., Berland B. *et al.* 2000. Study of phytoplankton populations of Oualidia Lagoon (Morocco) : potentially harmful dinoflagellates. *Marine life*, 1–2, 3–18.
- Bidet J.C. & Carruesco C. 1982. Étude sédimentologique de la lagune de Oualidia (Maroc). *Oceanologica Acta*, 29–37.
- Bloundi M.K. 2005. *Étude géochimique de la lagune de Nador (Maroc oriental) : impact des facteurs anthropiques*. Thèse de Doctorat d'Université, ULP Strasbourg et Université Mohammed V. Agdal, Rabat, Maroc, 238 p.
- Brito A.C., Newton A., Tett P. *et al.* 2012. How will shallow coastal lagoons respond to climate change? A modelling investigation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 112, 98–104.
- Buchanan J.B. 1984. Sediment analysis. In: Holme N.A. & McIntyre A.D. (Eds.). *Methods for the study of marine benthos*. IBP hand book 16, Blackwell scientific publication, Oxford, 41–65.
- Chaouti A. & Bayed A. 2008. Spatial patterns of soft-bottom macro-invertebrates and relationships with environmental conditions in a North African coastal lagoon (Smir lagoon, Morocco). *Vie Milieu*, 58, 25–35.
- Chardy P. 1970. *Ecologie des Crustacés Péracarides des fonds rocheux de Banyuls-sur-Mer. Amphipodes, Isopodes, Tanaïdés, Cumacés, infra-et cirralittoraux*. *Vie Milieu*, 657–728.
- Chbicheb A. 1996. *Organisation biogéologique d'un bassin paralique: la lagune d'Oualidia (côte atlantique marocaine)*. Thèse de Doctorat. Université de Nantes, Nantes (France), 167 p.
- Civinales S., Incera M. & Lopez J. 2002. Temporal variability in the biochemical composition of sedimentary organic matter in an intertidal flat of the Galician coast (NW Spain). *Oceanologica Acta*, 25, 1–12.
- Damsiri Z., Natij L., Khalil K. *et al.* 2014. Spatio-temporal nutrients variability in the Oualidia lagoon (Atlantic Moroccan coast). *International Journal of Advanced Research*, 8, 609–618.
- Damsiri Z., Natij L., Khalil K. *et al.* 2017. Seasonal characterization of the nutrients state in Oualidia lagoon (Moroccan atlantic coast). *International Journal of Advanced Research*, 8, 67–77.
- Durand U.R. & Chantraine U.M. 1982. L'environnement climatique des lagunes ivoiriennes. *Revue d'hydrobiologie tropicale*, 2,25–113.
- Edgar G.J. 1999. Experimental analysis of structural versus trophic importance of sea grass beds. Effects on macrofaunal and meiofaunal invertebrates. *Vie Milieu*, 49, 239–248.
- El Mahrad B., Abalansa S., Newton A. *et al.* 2020. Social-environmental analysis for the management of Coastal Lagoons in North Africa. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 37.
- Gonenc I.E., & Wollin J. P. 2005. *Coastal Lagoons: Ecosystem processes and modeling for sustainable use and development*. Boca Raton: CRC Press, 392–422
- Hassou N., Maanan M., Hennani M. *et al.* 2014. Spatial and temporal variation of faecal pollution indicators (*Escherichia coli* and faecal streptococci) and physico-chemical parameters at the Oualidia lagoon and its watershed (Morocco). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3, 675–694.
- Hennani M., Maanan M., Robin M. *et al.* 2012. Temporal and spatial distribution of faecal bacteria in a Moroccan lagoon. *Polish Journal of Environmental Studies*, 21, 627–634.

- Hilmi K., Koutitonsky V., Orbi A. *et al.* 2005. Oualidia lagoon, Morocco: an estuary without a river. *African Journal of Aquatic Science*, 30, 1–10.
- Hilmi K., Orbi A. & Lakhdar Idrissi J. 2009. Hydrodynamisme de la lagune de Oualidia (Maroc) durant l'été et l'automne 2005. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Section Sciences de la Terre*, 31, 29–34.
- Hilmi K., Makaoui A., Ettahiri O. *et al.* 2017. Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Oualidia (Maroc) avant l'aménagement de la souille. *International Journal of Advanced Research*, 7, 2015–2027.
- Holm-Hansen O., Lorenzen C.J., Holmes R.W. *et al.* 1965. Fluorometric Determination of Chlorophyll. *ICES Journal of Marine Science*, 30, 3–15.
- Joulami L., Daief Z., El Malki S. *et al.* 2013. Variation spatio-temporelle des caractéristiques physico-chimiques et la qualité des eaux et des sédiments d'une lagune côtière marocaine (Sidi Moussa-El Jadida). *ScienceLib*, 5, 1–18.
- Kaid Rassou K. 2009. *Étude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'Oualidia*. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech (Maroc), 214 p.
- Koutitonsky V.G., Orbi A., Ouabi M. *et al.* 2006. L'étude du comportement hydrosédimentaire du système lagunaire Oualidia par la modélisation mathématique, Volet 1 : synthèse des données et simulation de la réfraction des houles. Rapport technique MET/DPDPM, Royaume du Maroc.
- 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.
- Macintyre H.L., Geider R.J. & Miller D.C. 1996. Microphytobenthos: The ecological role of the "secret garden" of unvegetated, shallow-water marine habitats 1. Distribution, abundance and primary production. *Estuaries*, 19, 186–201.
- Makaoui A., Idrissi M., Agouzouk A. *et al.* 2018 Oceanographic State of the Oualidia Lagoon, Morocco (2011–2012). *European Scientific Journal*, 14, 1857–7881.
- Miller C.W., Zuckerman B. & Charig A. J. 1966. Water translocation of diazinon-C14 and parathion-S35 off a model cranberry bog and subsequent occurrence in fish and mussels. *Transactions of the American Fisheries Society*, 95 (4), 345–349.
- Natij L., Damsiri Z., Khalil K. *et al.* 2014. Phytoplankton abundance and diversity in the coastal waters of Oualidia lagoon, south Moroccan Atlantic in relation to environmental variables. *International Journal of Advanced Research*, 2, 1022–1032.
- Natij L., Khalil K., Damsiri Z. *et al.* 2021. The influence of hydrochemical parameters on microphytoplankton distribution along Oualidia lagoon, Moroccan Atlantic. *Community Ecology*, 22, 177–191.
- Newton A., Brito A.C., Icely J.D. *et al.* 2018. Assessing, quantifying and valuing the ecosystem services of coastal lagoons. *Journal for Nature Conservation*, 44, 50–65.
- Orbi A., Hilmi K., Lakhdar Idrissi J. *et al.* 2008. Lagoon ecosystem study through two cases: Oualidia (Atlantic) and Nador (Mediterranean) - Morocco. In: Gönenç I.E., Vadineau A., Wollfin J.P. & Russo R.C. (Eds.): Sustainable Use and Development of Watersheds. Springer Eds, Serie C. 289–298.
- Pérez-Ruzafa A., Pérez Ruzafa I.M., Newton A. *et al.* 2019. Coastal Lagoons: Environmental Variability, Ecosystem Complexity, and Goods and Services Uniformity. In: Wolanski E., Day J.W., Elliott M. *et al.* (Eds.), Coastal sand Estuaries. The Future. pp. 253–276.
- Rharbi N., Ramdani M., Berraho A. *et al.* 2001. Caractéristiques hydrologiques et écologiques de la lagune d'Oualidia : milieu paralique de la côte atlantique marocaine. *Marine life*, 11, 3–9.
- Soumou L., Demarcq H., Makaoui A. *et al.* 2020. Influence of Ocean-Lagoon exchanges on spatio-temporal variations of phytoplankton assemblage in an Atlantic Lagoon ecosystem (Oualidia, Morocco). *Regional Studies in Marine Science*, 40, 101–512.
- Verschuren D., Tibby J., Sabbe K. *et al.* 2000. Effect of depth, salinity, and substrate on the invertebrate community of a fluctuating tropical lake. *Ecology*, 61, 70–82.
- Zourarah B. 2002. *Les processus côtiers actuels et leur impact sur l'environnement littoral des Doukkala : Approches hydrodynamique, morphologique, sédimentologique et géochimique*. Thèse de Doctorat, Université Chouaib Doukkali, El Jadida (Maroc), 232 p.

Manuscrit reçu 13/04/2021

Version révisée acceptée le 02/03/2022

Version finale reçue le 10/03/2022

Mise en ligne le 14/03/2022