

Étude de l'évolution spatio-temporelle des paramètres hydrologiques caractérisant la qualité des eaux de l'estuaire du Loukkos (Maroc)

Mohamed EL MORHIT¹, Mohamed FEKHAOUI¹, Amal SERGHINI¹, Souad EL BLIDI¹
Abdallah EL ABIDI², Ahmed YAHYAOU³ & Mohamed HACHIMI⁴

1. Université Mohammed V-Agdal, Institut Scientifique, Laboratoire de Zoologie
Unité de Pollution, Hydrobiologie et Risques sanitaires, B.P. 703 Agdal, Rabat. e-mail : morhit_med@yahoo.fr
2. Institut National d'Hygiène. Laboratoire de Toxicologie et d'Hydrobiologie. Av. Ibn Batouta, Rabat.
3. Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences, Laboratoire de Biodiversité et Aquaculture, Rabat.
4. Université Ibn Tofayl, Faculté des Sciences, Laboratoire de Biologie et Santé, Kenitra.

Résumé. Cet article porte sur l'étude des caractéristiques hydrologiques de l'estuaire et du bas Loukkos (côte atlantique marocaine). Des échantillons d'eau ont été prélevés saisonnièrement de mars 2006 à mai 2007 au niveau de 5 stations, réparties sur l'ensemble de l'estuaire. Les paramètres hydrologiques mesurés (température et pH) ont montré des variations spatio-temporelles significatives (à $p < 0,001$), tandis que sur l'ensemble des stations échantillonnées, la salinité, la conductivité, les nitrates et la Demande Biologique en Oxygène ont montré des variations significatives (à $p < 0,05$). L'analyse de la variabilité spatio-temporelle approchée par l'analyse en composantes principales (ACP), combinée à l'analyse discriminante (AD), a dégagé une faible variabilité inter-stations : son pourcentage est de 33% à marée haute et à marée basse.

Mots clés : hydrologie, oued Loukkos, estuaire, côte atlantique marocaine.

Study of the spatial-temporal variation of the hydrological parameters characterizing the quality of the waters in Loukkos estuary and lower stream (Morocco).

Abstract. This paper deals with the hydrological characteristics of the Loukkos river estuary and lower stream. Surface water samples were taken seasonally from March 2006 to May 2007 in five stations distributed along the estuary. Measured hydrological parameters (temperature and pH) showed significant spatial and temporal variations ($p < 0,001$), whereas among all sampled stations, salinity, conductivity, nitrates, Biological Oxygen Demand showed significant variations ($p < 0,05$). Analysis of variability, approached by Principal Component Analysis (PCA) combined with discriminate analysis (DA) showed very small inter-stations variability. Its percentage is 33% during high and low tide.

Key words: hydrology, Loukkos river, Moroccan Atlantic coast.

INTRODUCTION

Les estuaires et les côtes sont des milieux aquatiques complexes et dynamiques caractérisés par une grande importance écologique et économique (Morris *et al.* 1995, El Morhit 2009). Ils sont le siège d'une activité humaine intense et soumis à des aménagements hydro-agricoles conduisant à des déversements de divers types de polluants qui perturbent le fonctionnement naturel en tant qu'écosystèmes (El Morhit 2005, Bakan *et al.* 2010, Mode *et al.* 2010). De nombreux polluants organiques et divers oligo-éléments métalliques introduits dans ces milieux aquatiques sont susceptibles de se concentrer chez les organismes vivants à des niveaux parfois supérieurs à leurs taux dans les sédiments, et peuvent donc entraîner des problèmes d'ordre écologique, sanitaire et économique (Bryan & Langston 1992, Colas 2011, Kumar *et al.* 2011).

L'estuaire et le bas Loukkos connaissent d'importantes activités socio-économiques en raison de la pratique de la pêche artisanale des poissons et des mollusques. Depuis les années 1930, l'estuaire a attiré l'attention des chercheurs ; toutefois, les études qui y sont effectuées sont restées pour longtemps peu nombreuses. Ce n'est qu'au début des

années 1980 que ce site a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches (Snoussi 1984, Bazairi *et al.* 2005, Cheggour *et al.* 2005, Fekhaoui 2005, Yahyaoui & Azeroual 2005, El Morhit *et al.* 2008) visant à définir son organisation hydrologique, sédimentologique et biologique. Ces études ont mis en avant l'évolution de l'environnement estuarien au fil du temps, qui se traduit par l'obstruction progressive du goulet qui assure l'échange entre l'estuaire et l'océan Atlantique. Cependant, le découpage de l'estuaire en différentes zones s'avère nécessaire pour une bonne compréhension du fonctionnement hydrologique. À cet effet, une étude typologique de l'estuaire a été entreprise sur la base des mesures saisonnières des paramètres hydrologiques durant les campagnes de prélèvement.

MATERIEL ET METHODES

La zone d'étude regroupe l'estuaire et le bas Loukkos, qui est l'un des principaux estuaires du Maroc. Il est situé sur la côte atlantique marocaine. Le périmètre est compris entre les coordonnées 35°9'N et 35° 14'N et 6°5'W et 6°30'W.

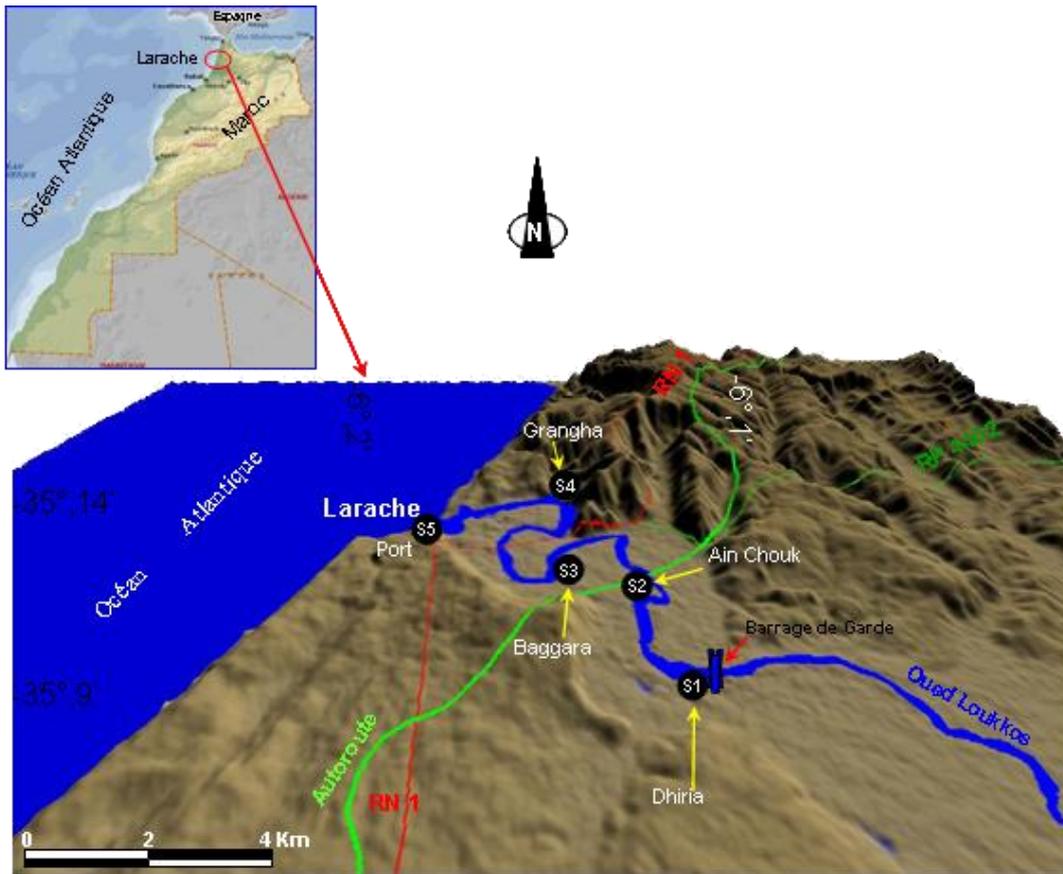


Figure 1. Localisation des stations d'étude.

Pour la réalisation de ce travail et tenant compte des diverses activités recensées dans la zone, cinq stations ont été retenues (Fig. 1) :

Dhiria (S1), située en amont de l'estuaire, au niveau du barrage de garde, à 21 km de l'embouchure.

Ain Chouk (S2) située à proximité d'un chenal à 16 km de l'embouchure.

Baggara (S3) située à 9 km de l'embouchure.

Grangha (S4) située à 3 km de l'embouchure, juste à proximité des rejets urbains de la ville.

Port de Larache (S5) situé au niveau de l'embouchure du Loukkos.

L'étude de la typologie de l'estuaire a été basée sur l'analyse en composantes principales (ACP) combinée à l'analyse discriminante (AD). Onze paramètres hydrologiques ont été choisis pour caractériser l'estuaire : la température de l'air (T_a) et de l'eau (T_e), la salinité (S_a), la conductivité (C_e), l'oxygène dissous (OD), le pH, la matière en suspension (MS), le carbone organique total (CO), les nitrates (NO), la demande chimique en oxygène (DC) et la demande biologique en oxygène (DB).

Les prélèvements d'eau ont été effectués en surface à marée haute et à marée basse des mortes-eaux durant les campagnes menées en mars, mai, juillet, septembre et novembre 2006 ; janvier, mars et mai 2007 au niveau des 5

stations. Le traitement des données par ACP et par AD ainsi que la représentation graphique des résultats ont été réalisés avec le logiciel XL-STAT. L'inertie totale de chacune des deux matrices des données – à marée haute et à marée basse – est décomposée en une part intra-stations et intra-mois et en une autre part inter-stations et inter-mois. Cette décomposition de l'inertie est faite en utilisant la métrique euclidienne (Doledec & Chessel 1991). Une analyse de variance (ANOVA) a été appliquée également en utilisant le même logiciel pour tester la signification des différences des paramètres hydrologiques entre les stations d'une part, et entre les mois d'autre part (Sokal & Rohlf 1995).

RESULTATS

Afin d'étudier la variation spatio-temporelle des paramètres hydrologiques, nous avons analysé, dans un premier temps, l'évolution de la valeur moyenne de chaque paramètre, calculée sur tout l'estuaire en fonction du temps. Dans un second temps, nous avons étudié la variation de la valeur moyenne annuelle de ces mêmes paramètres en fonction des stations. Les résultats sont présentés sur les figures 2 à 5.

La variation de la température des eaux de l'estuaire suit étroitement celle de la température atmosphérique. Elle varie de 14,55 à 29,00°C à marée haute et de 15,01 °C à

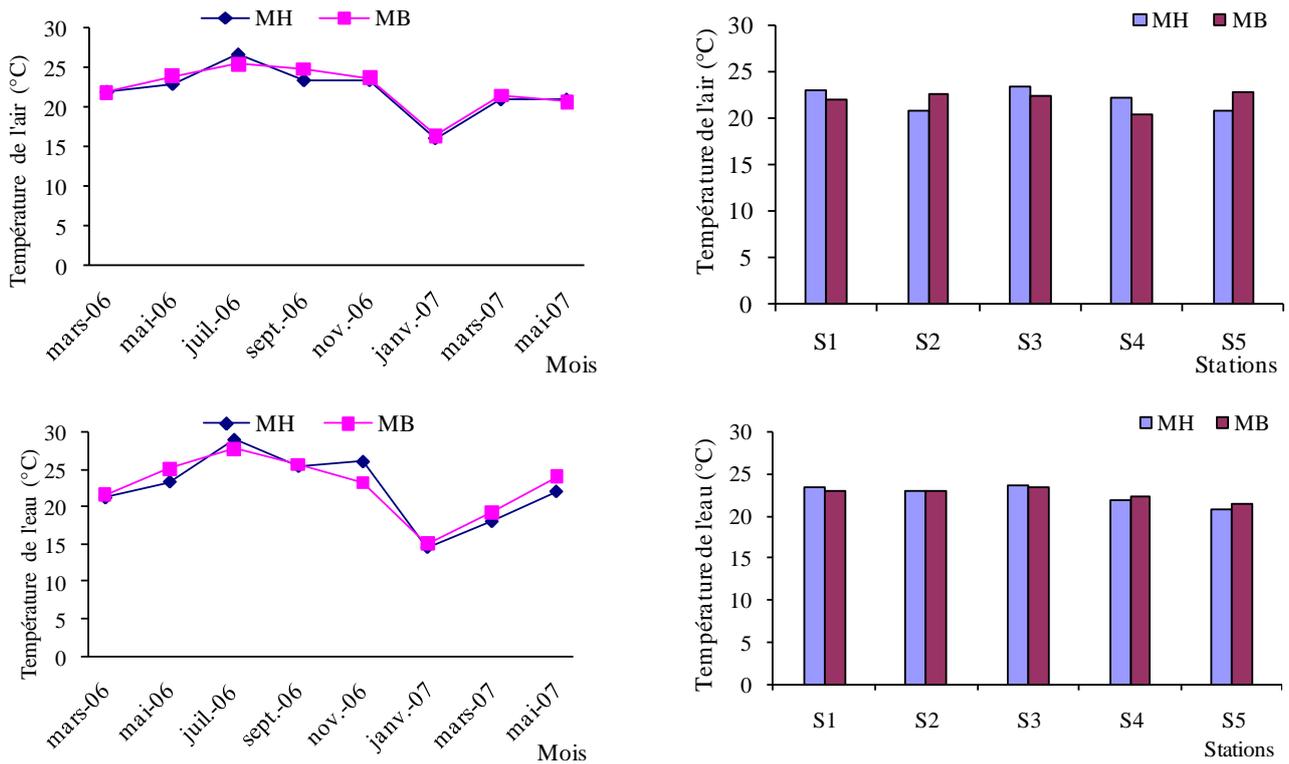


Figure 2. Variations mensuelles et spatiales moyennes des températures de l'air et de l'eau pendant les deux cycles de marées. MH : marée haute ; MB : marée basse.

27,80°C à marée basse (Fig. 2). Les courbes de l'évolution saisonnière de la température, tant à marée haute qu'à marée basse, ont montré des allures identiques pour toute la période d'observation. L'amplitude de la variation entre les points de prélèvement ne dépasse en aucun cas 2,9°C. La température sur l'ensemble du bassin est relativement homogène, tant à marée haute qu'à marée basse ; elle fluctue respectivement entre 20,82 et 23,73 °C et entre 21,54 et 23,36°C (Fig. 2).

A marée haute, les valeurs moyennes de la salinité et de la conductivité des eaux de l'estuaire fluctuent respectivement de 7,20 à 34,45 g/l et de 0,79 mS/cm à 52,70 mS/cm. A marée basse, les valeurs moyennes de la salinité et la conductivité des eaux de l'estuaire fluctuent respectivement de 6,95 à 29,80 g/l et de 2,97 mS/cm à 33,62 mS/cm (Fig. 3).

Les variations temporelles de la salinité et de la conductivité lors des cycles des marées montrent des allures opposées pour toute la période d'observation. En effet, à marée haute, la salinité et la conductivité augmentent pendant la saison d'hiver (mars 2006) et au printemps (mai 2006) et diminuent pendant la saison d'été (juillet et septembre 2006), alors qu'à marée basse elles diminuent pendant la saison d'hiver (mars 2006) et au printemps (mai 2006) et augmentent durant la saison d'été (juillet et septembre 2006).

La salinité ainsi que la conductivité suivent par contre le mouvement de la marée ; les concentrations maximales (33,74 g/l pour la salinité et 47,40 mS/cm de la

conductivité) et les concentrations minimales (6,50 g/l pour la salinité et 0,80 mS/cm de la conductivité) ont été enregistrées à marée haute. Inversement, à marée basse, les maxima sont 33,20 g/l pour la salinité et 39,90 mS/cm pour la conductivité et les minima sont 5,84 g/l pour la salinité et 0,87 mS/cm de la conductivité. Par ailleurs, la variation spatiale de la salinité à marée haute est plus élevée par rapport à celle déterminée à marée basse.

Mis à part le mois de mars 2007, où une concentration de l'oxygène dissous maximale (14,66 mg/l) a été relevée à marée haute (Fig. 3), la variation mensuelle montre que la concentration en oxygène dissous à marée haute (0,75–11,83 mg/l) est relativement conforme à celle déterminée à marée basse (1,06–11,40 mg/l). Quant à l'évolution saisonnière tant à marée haute qu'à marée basse, l'oxygène dissous diminue à partir de la saison d'hiver (mars 2006) et atteint des valeurs faibles à la saison d'été (juillet et septembre 2006) ; ensuite il augmente pendant la saison d'automne (novembre 2006). Le pic enregistré en mars est dû aux influences des eaux marines bien oxygénées. À l'échelle spatiale, à marée haute, la concentration de l'oxygène dissous varie faiblement d'une station à une autre, entre 4,85 et 9,36 mg/l. À marée basse, elle varie entre 5,72 et 6,92 mg/l, sans décrire un gradient aval-àmont.

Au cours de période d'observation, le pH a été relativement élevé à marée haute (7,20–8,48) en comparaison avec celui déterminé à marée basse (7,42–7,97). L'allure des courbes de variation temporelle est très proche (Fig. 4). A l'échelle spatiale, le pH est relativement stable et alcalin

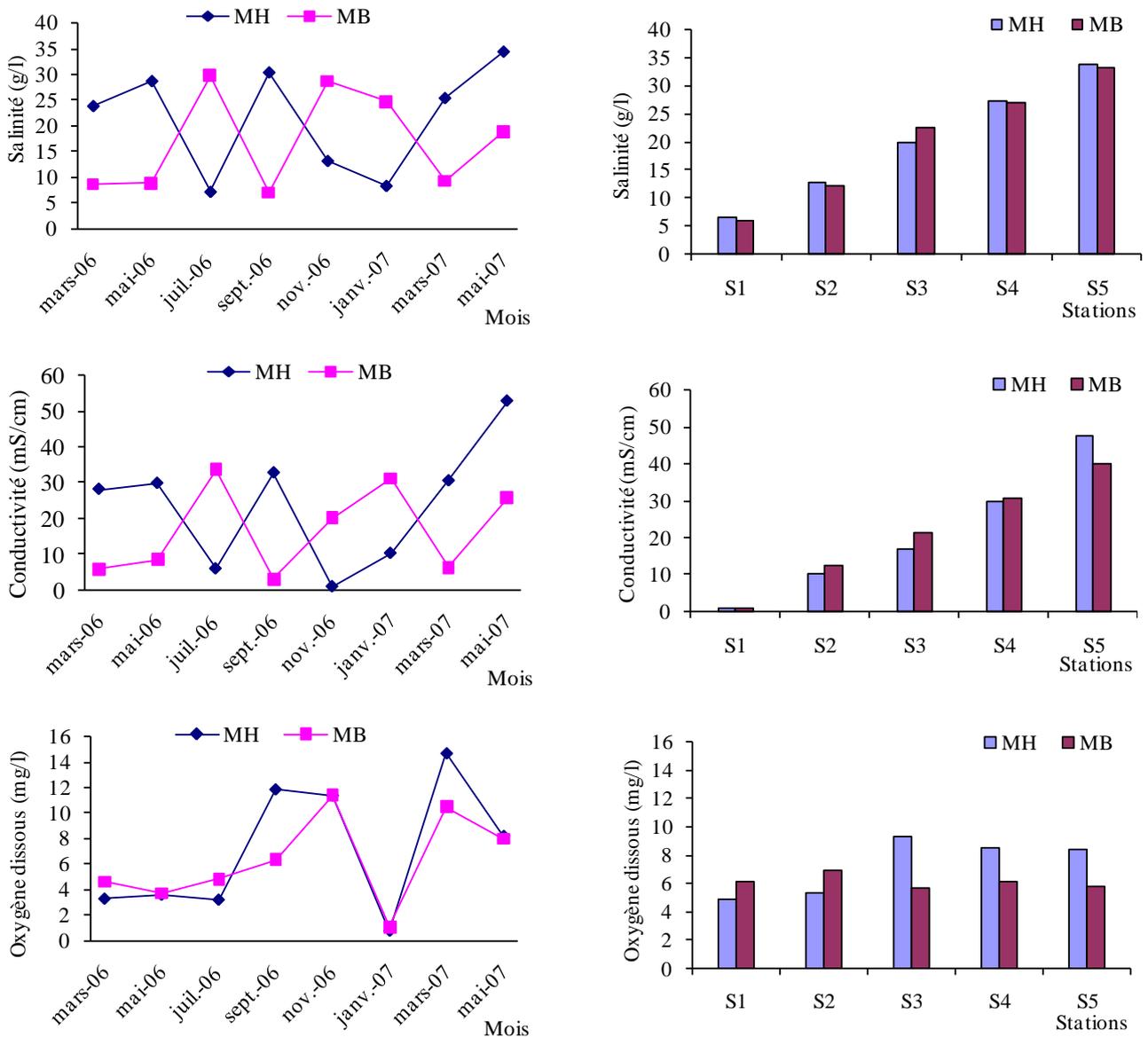


Figure 3. Variations mensuelles et spatiales moyennes de la salinité, de la conductivité et de l'oxygène dissous pendant les deux cycles de marées.

pour toutes les stations. Il varie entre 7,52 et 7,95 à marée haute et entre 7,47 et 8,04 à marée basse. Les valeurs de ce paramètre restent relativement élevées le long de l'estuaire sauf au niveau de la station 3 où a eu lieu une légère diminution liée aux apports des rejets de ruissellement.

La concentration des matières en suspension est de 24,93 à 91,90 mg/l à marée haute et de 20,73 à 82,33 mg/l à marée basse (Fig. 4). Au mois de juillet, nous avons enregistré une forte concentration en matières en suspension à marée haute (91,90 mg/l). Cette forte charge particulière est liée aux vents forts qu'a connus la région durant ce mois. En effet, étant donné la faible épaisseur de la tranche d'eau, particulièrement à marée basse, et la nature meuble du substrat, le vent a tendance à remettre en suspension les particules, tout en favorisant le brassage de la masse d'eau. La concentration de la matière en suspension augmente à partir de la saison d'hiver (mars 2006) puisqu'elle atteint des valeurs les plus élevées

pendant la saison d'été (juillet et septembre 2006), puis elle diminue durant la saison automnale (novembre 2006). A marée basse, elle est faible pendant la saison d'hiver (mars 2006), au printemps (mai 2006) et en été (juillet et septembre 2006) et élevée durant l'automne (novembre 2006). A l'échelle spatiale, la forte charge de la matière en suspension exceptionnellement enregistrée dans la station 1 à marée haute est probablement le résultat d'une intense érosion du bassin versant, suite à des pluies orageuses brutales.

La variation mensuelle de la concentration en carbone organique total (Fig. 4), montre qu'elle évolue de la même manière à marée haute (5,75–23,06 mg/l) par comparaison avec celle déterminée à marée basse (5,36–23,16 mg/l). L'évolution saisonnière de la concentration en carbone organique total durant les deux cycles augmente à partir de la saison hivernale (mars 2006), puisqu'elle atteint les valeurs les plus élevées durant la saison d'été (juillet

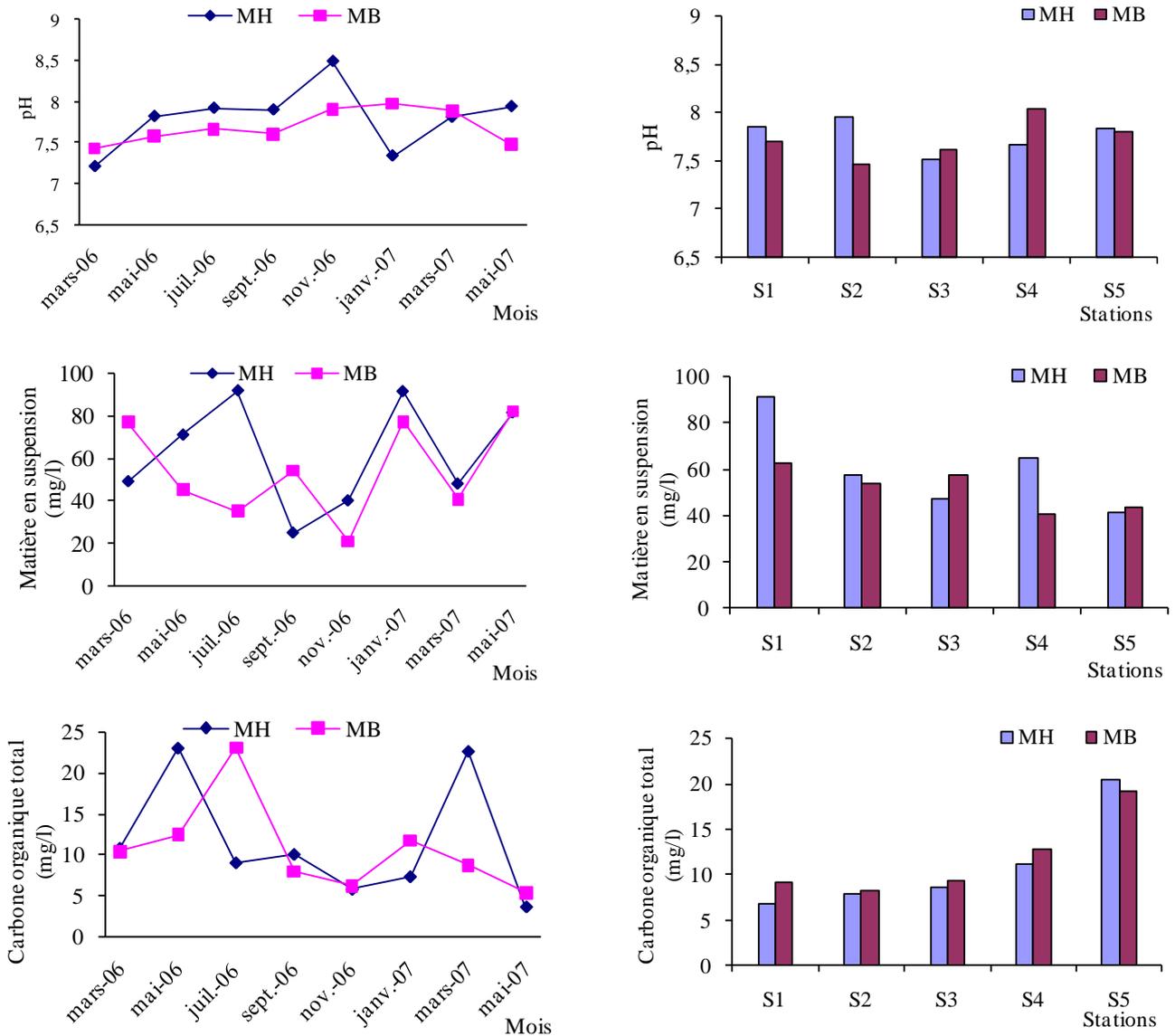


Figure 4. Variations mensuelles et spatiales du pH, de la matière en suspension et du carbone organique total pendant les deux cycles de marées.

et septembre 2006), alors qu'elle baisse tant à marée haute qu'à marée basse pendant la saison d'automne (novembre 2006). La variation spatiale montre un gradient qui s'accroît de l'amont vers l'aval aussi bien à marée haute qu'à marée basse (6,83–20,38 et 8,28–19,26 mg/l respectivement). L'augmentation moyenne de la concentration en carbone organique total peut être attribuée aux eaux usées urbaines de la ville de Larache et à la dynamique marégraphique.

Le mois de mai 2007 a été la seule période où l'on a pu trouver des nitrates (13,65 mg/l à marée haute et 10,00 mg/l à marée basse) (Fig. 5). Les autres mois ont connu des teneurs très faibles, qui peuvent être attribuées en partie à l'action de la microflore aquatique susceptible de les utiliser pour la synthèse de nouvelles molécules organiques.

Au cours du mois de mai 2007, période de crue, l'enrichissement est dû à une nitrification très active en

cette période de réoxygénation du milieu. L'évolution saisonnière des nitrates pendant les deux cycles de marées a connu une diminution brutale durant l'année 2006, à partir de la saison d'hiver (mars 2006) jusqu'à la saison d'automne (novembre 2006). Par ailleurs, les résultats révèlent des apports forts des nitrates d'origine marine en aval de cet estuaire à marée haute dans la station 5 (5,87 mg/l) et à marée basse dans la station 4 (3,86 mg/l).

La demande chimique en oxygène (Fig. 5) évolue dans le même sens à marée haute (10,80–43,95 mg/l) qu'à marée basse (12,56–40,30 mg/l), à l'exception du mois de mars 2007, où une concentration de la demande chimique en oxygène maximale (63,50 mg/l) a été enregistrée à marée haute. La demande chimique en oxygène augmente tant à marée haute qu'à marée basse, en hiver (mars) et au printemps (mai) au cours de l'année 2006 puis, elle connaît une diminution pendant la saison d'été (juillet et septembre 2006). Cependant, la variation spatiale montre qu'une

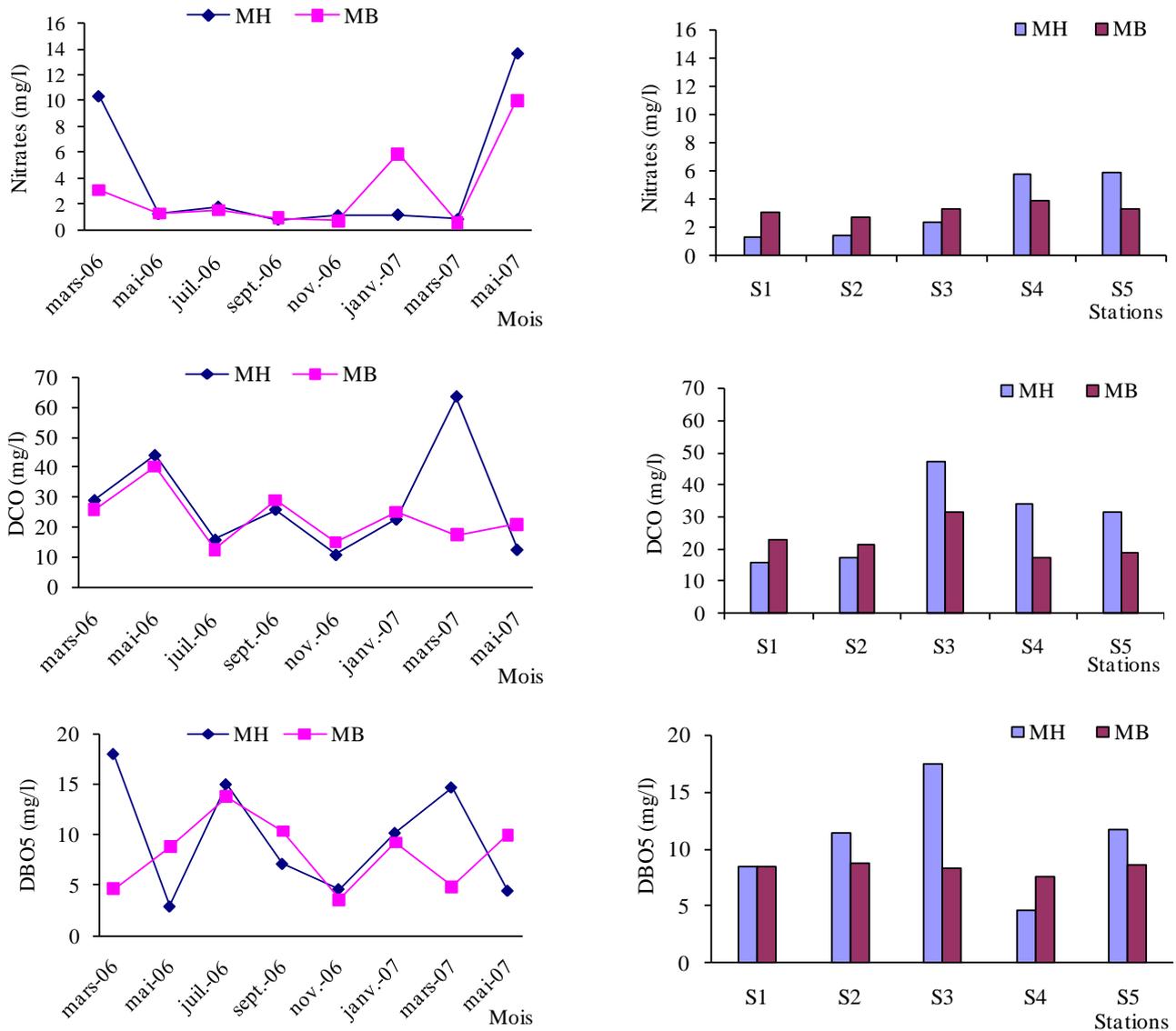


Figure 5. Variations mensuelles et spatiales des nitrates, de la DCO et de la DBO5 pendant les deux cycles de marées.

teneur élevée a été enregistrée dans la station 3 à marée haute (47,06 mg/l) qu'à marée basse (31,29 mg/l) en comparaison avec celle des autres stations.

L'évolution temporelle de la demande biologique en oxygène (Fig. 5) se caractérise par des fluctuations plus au moins importantes à marée haute (2,95–17,99 mg/l) et à marée basse (3,57–13,83 mg/l). Cette fluctuation est liée d'une part à la variation saisonnière et à la dynamique marégraphique d'autre part. L'évolution saisonnière de la demande biologique en oxygène est opposée tant à marée haute qu'à marée basse durant la saison d'hiver (mars 2006) et au printemps (mai 2006), puis ils s'alignent au cours des autres saisons (été et automne 2006) pendant les deux cycles de marée. Dans les différentes stations, aucune variation n'a été enregistrée à marée haute (4,62–11,72 mg/l) et à marée basse (7,61–8,74 mg/l) à l'exception de la station 3 où a été mesurée une valeur maximale pendant la marée haute (17,56 mg/l). Cette charge en demande biologique en oxygène pourrait être liée à la persistance de

la charge amont véhiculée par le cours central de l'oued Loukkos.

ANALYSE DISCRIMINANTE

Les résultats de l'analyse discriminante mettent en évidence la faible variabilité inter-stations du site étudié (33%) aussi bien à marée haute qu'à marée basse (Tab. I). Les résultats de la variabilité inter-stations d'une part, et ceux de la variabilité inter-mois d'autre part sont représentés ci-après dans les figures 6 et 7. Une fois calculées les composantes principales de l'ACP, les deux premiers axes ont été retenus pour la représentation graphique des résultats pour chaque type de variabilité. Ces deux axes expliquent plus de 83% de l'information contenue dans la matrice de données (Tab. II).

À marée haute, les stations se distribuent le long de l'axe F1 (Fig. 6, A-B), qui traduit la salinité (la conductivité)

Tableau I. Pourcentages des différents types de variabilité obtenus par l'analyse discriminante.

Type de variabilité	Pourcentage de variabilité (%)	
	MH	MB
Intra-stations/inter-stations	20/33	20/33
Intra-mois/inter-mois	6/13	6/13

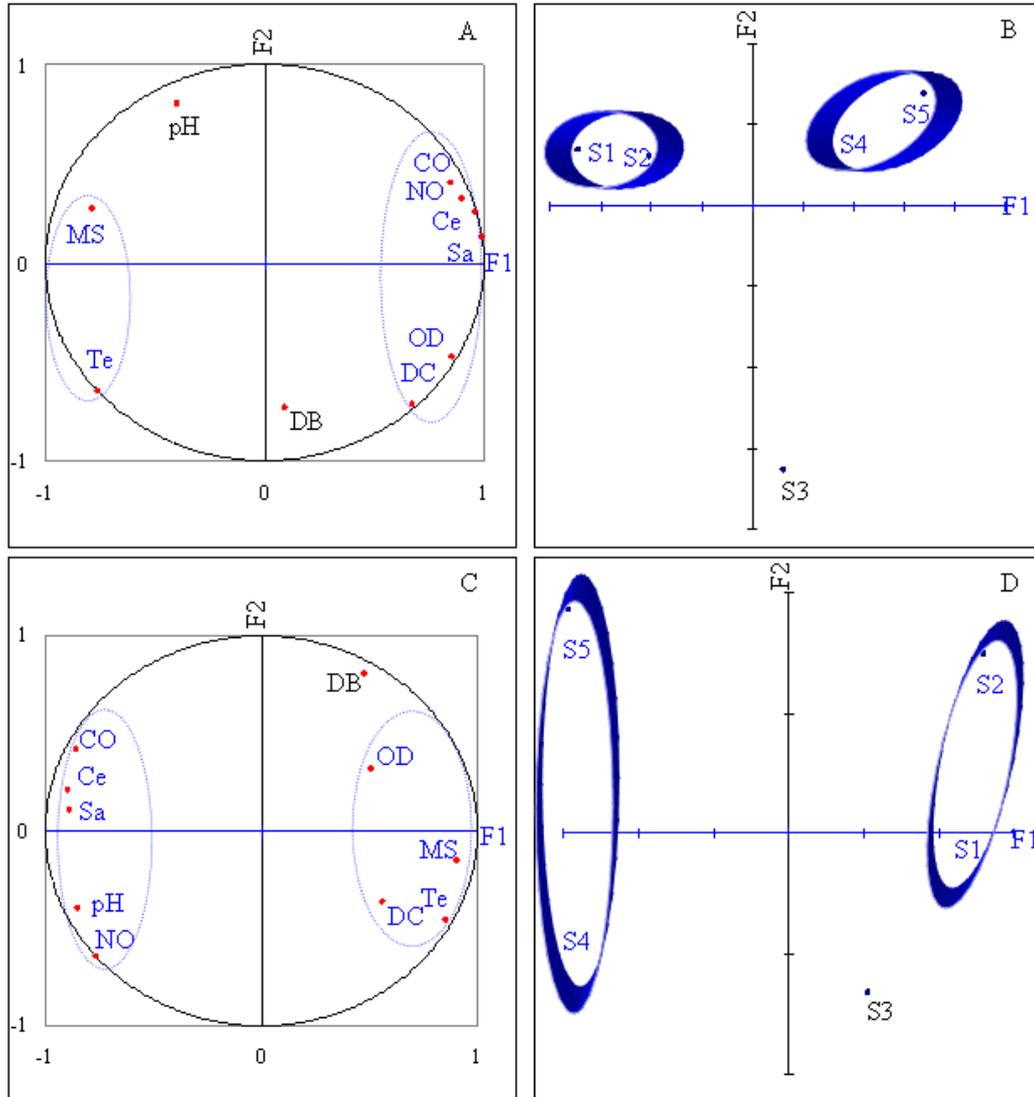


Figure 6. Résultats de la variabilité inter-stations à marée haute (A, B) et à marée basse (C, D) dans le plan factoriel F1×F2.

et les nitrates opposés à la température et la matière en suspension. La station S3 s'individualise nettement des autres stations, qui dessinent à leur tour un gradient de la demande biologique en oxygène du côté négatif opposé au pH du côté positif de l'axe F2. À marée basse, la disposition des stations selon l'axe F1 reflète une hiérarchisation progressive de l'amont vers l'aval de l'estuaire, dictée également par la salinité. Cette configuration permet de subdiviser le site en trois zones différentes, bien que cette zonation ne soit pas très marquée (Fig. 6, C-D), ce qui justifie la faible valeur du pourcentage de la variabilité inter-station (33%) (Tab. I)

On distingue : une zone située en aval, comprenant les stations S4 et S5, soumise à une nette influence marine, riche en nitrates pour les deux cycles ; une zone intermédiaire ou zone de transition, représentée par une seule station (S3), riche en matières organiques particulièrement à marée haute, et enfin une zone amont, comprenant deux stations (S1 et S2), alimentée par les eaux douces de l'oued Loukkos, riche par les matières en suspension tant à marée haute qu'à marée basse. De plus, ces stations ont connu une forte activité agricole (rizicultures). Les autres paramètres mesurés, carbone organique total, oxygène dissous et demande chimique en

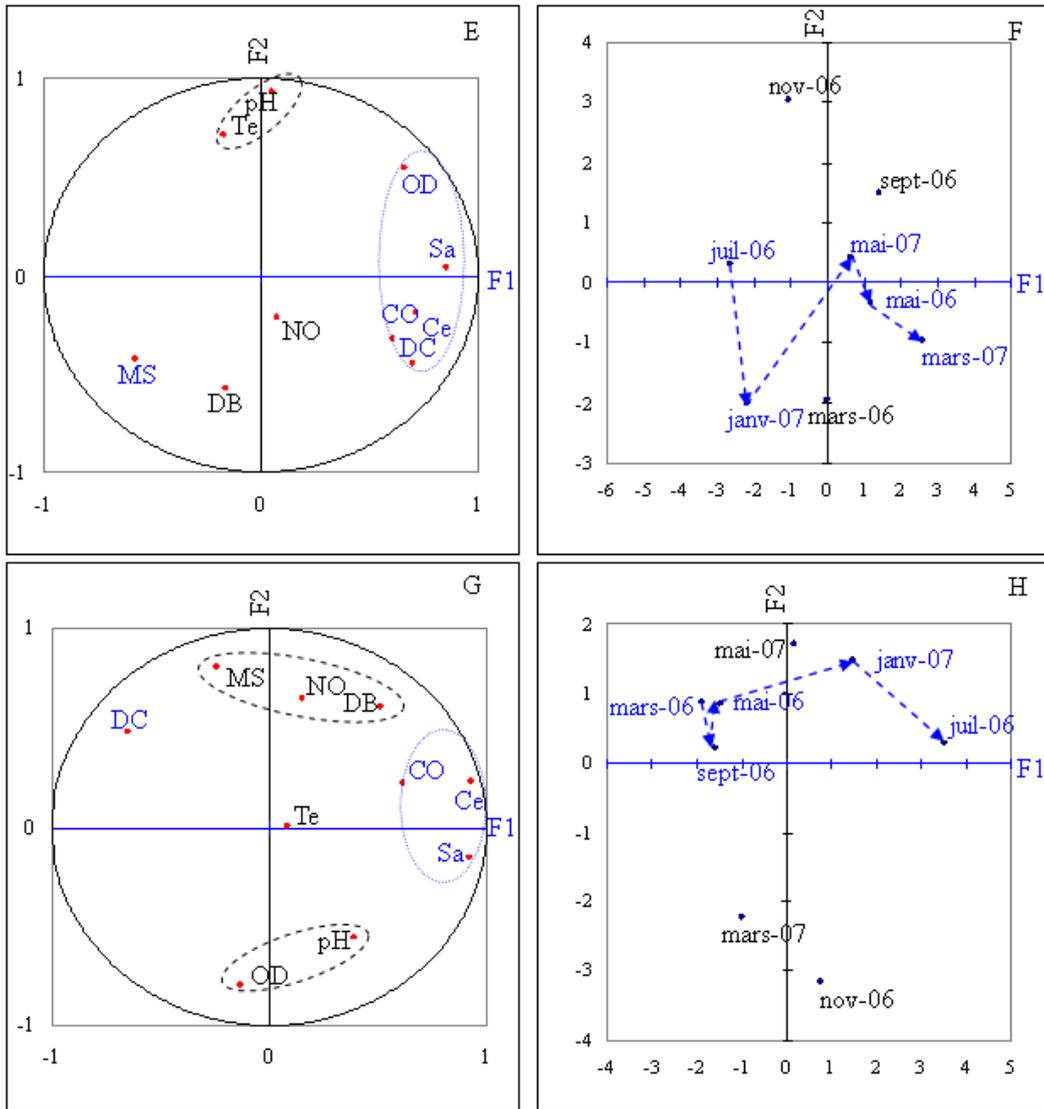


Figure 7. Résultats de la variabilité inter-mois à marée haute (E, F) et à marée basse (G, H) dans le plan factoriel F1×F2.

Tableau II. Pourcentages d'inerties et d'inerties cumulées des deux premiers axes factoriels.

Type de variabilité		Pourcentage de l'inertie (%)		Pourcentage d'inerties cumulées des deux premiers axes (%)
		F1	F2	
Inter-station	MH1	59,93	27,53	87,46
	MB1	59,79	19,37	79,17
Inter-mois	MH2	29,31	25,73	55,05
	MB2	30,37	27,27	57,64

oxygène ne contribuent pas à l'explication de la variabilité inter-station, aussi bien à marée haute qu'à marée basse.

À marée haute, dans le plan factoriel F1×F2, la répartition des mois (juil-06, janv-07, mai-07, mai-06, mars-07) se fait suivant l'axe F1, qui exprime, de la droite vers la gauche, l'opposition des mois chauds (juil-06), riche en matières en suspension ce qui traduit un gradient d'enrichissement en matière en suspension, aux mois froids

(mars-07) à forte salinité (conductivité) ce qui traduit un gradient de minéralisation (Fig. 4, E et F).

À marée basse, bien que leur dispersion soit plus importante, les mois s'ordonnent de façon opposée à celle de la marée haute. Ils se répartissent d'une façon longitudinale le long de l'axe F1. Suivant cet axe, on peut subdiviser ce groupe en trois sous-ensembles. Dans ces valeurs positives, un premier sous-ensemble représente la

Tableau III. Résultats de l'analyse de variance des paramètres hydrologiques.

Paramètres	Stations				Mois			
	Marée Haute		Marée Basse		Marée Haute		Marée Basse	
	F	P>F	F	P>F	F	P>F	F	P>F
Te (°C)	Inf	<0,0001***	Inf	<0,0001***	Inf	<0,0001***	Inf	<0,0001***
pH	Inf	<0,0001***	Inf	<0,0001***	Inf	<0,0001***	Inf	<0,0001***
Sa (g/l)	26,927	0,036*	1,172	0,460	0,006	0,994	1,178	0,381
Ce (mS/cm)	20,779	0,046*	1,536	0,394	0,121	0,888	0,309	0,747
OD (mg/l)	15,956	0,059	0,235	0,810	1,949	0,237	0,439	0,667
MS (mg/l)	0,576	0,635	2,562	0,281	0,192	0,831	9,213	0,021*
CO (mg/l)	6,263	0,138	11,207	0,082	0,088	0,917	0,397	0,692
NO (mg/l)	39,487	0,025*	9,627	0,094	0,231	0,802	1,081	0,407
DC (mg/l)	10,957	0,084	1,342	0,427	0,539	0,614	0,656	0,558
DB (mg/l)	0,252	0,799	21,670	0,044*	1,596	0,291	0,617	0,576

Les valeurs du test statistique (*F*) et celles de la probabilité sont mentionnées [ns : ($p > 0,05$); * : ($p < 0,05$); ** : ($p < 0,01$); *** : ($p < 0,001$)].

saison d'été (juillet-06), durant laquelle les eaux de l'estuaire sont chaudes et plus salées, un sous-ensemble intermédiaire à la saison du printemps représenté par le mois mai-06, durant laquelle les eaux sont riches en matière en suspension, en nitrates et en matières organiques, et un troisième sous-ensemble comprenant le mois de mars-06, correspondant à la saison d'hiver, pendant laquelle les eaux sont froides et moins salées (Fig. 4 G et H).

Excepté le mois de novembre qui se détache des autres, le graphe traduit à marée haute un gradient de saisonnalité combiné à un gradient d'alcalinité du côté positif de l'axe F2, alors qu'à marée basse, il ne se traduit que par le gradient de l'alcalinité du côté négatif du même axe.

DISCUSSION

L'étude typologique des campagnes de prélèvement dans l'estuaire du Loukkos a permis de définir les grands traits de son fonctionnement hydrologique. Les résultats de l'ACP et de l'AD montrent que le pourcentage de la variabilité inter-station est faible, de l'ordre de 33% pour les deux cycles de marées (Tab. I). Ce pourcentage de variabilité est attribué à la température et au pH qui montrent une variation spatio-temporelle très significative pour les deux cycles de marées (à $p < 0,001$) et significative ($p < 0,05$) à la salinité, la conductivité, les nitrates, les matières en suspension et la demande biologique en oxygène (Tab. III).

De telles structures hydrologiques spatiales déterminées à chaque cycle de marée montrent que malgré l'étroitesse du goulet, les eaux océaniques constituent le moteur principal de circulation des eaux intra-estuaire. Le volume des eaux océaniques oscillant dans l'estuaire est plus élevé que celui des apports d'eaux continentales, véhiculés par les oueds afférents, essentiellement ceux provenant des oueds Mansora, Ouarour et Alza sur la rive droite et Sakhsoukh et Smid El Ma sur la rive gauche. Bien que les apports continentaux soient négligeables par rapport aux apports

marins, leur effet est plus ressenti à marée basse avec un gradient aval-amont. Avec ce gradient décroissant hyalin se manifestent des gradients écologiques liés aux différents peuplements qui colonisent cet écosystème, tant dans la composition qualitative des peuplements que dans les paramètres de structure (richesse spécifique, densité, biomasse), depuis la communication avec la mer jusqu'aux zones les plus internes de l'estuaire (Bazairi *et al.* 2005). Bazairi *et al.* (2005) ont déterminé trois peuplements macrozoobenthiques de l'aval vers l'amont de l'écosystème : le premier est un peuplement d'Annélides Polychètes ; le deuxième est un peuplement de Crustacés ; le troisième est un peuplement de Bivalves.

L'estuaire du Loukkos se caractérise par des températures de l'eau sans différences significatives entre les différentes stations ($p < 0,001$) pour les deux cycles de marées (Tab. III). La moyenne voisine de 20 °C reste liée aux conditions locales. Ces concentrations sont similaires à celles trouvées dans d'autre site (Hatje 2003, Damotharan *et al.* 2010). El Morhit *et al.* (2008) ont expliqué cette situation par l'aménagement hydraulique du bassin versant du bas Loukkos. Comparé à d'autres études, la température de l'eau de l'estuaire du Loukkos est faible par rapport à celle trouvée dans la rivière de Ganges où elle fluctue de 15 à 35 °C, suggérant que cette augmentation est due aux influences naturelles et anthropiques (Sarkar *et al.* 2007).

Les eaux de l'estuaire du Loukkos montrent un pH très variable, en rapport avec les fluctuations probables de la salinité qui suivent le cycle marégraphique et probablement les fluctuations de la charge organique (El Morhit *et al.* 2008). Les valeurs moyennes enregistrées du pH sont alcalines pour toutes les stations avec des différences significatives ($p < 0,001$; Tab. III). Cette alcalinité est due à l'effet tampon des eaux océaniques. D'autres auteurs ont montré que le pH de l'eau des estuaires (Sebou et Oum Rbiâ) est très tamponné. Le pH y est de l'ordre de 8 en raison du système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates (Ezzaouak 1991, El Blidi & Fekhaoui 2003, Himmi *et al.* 2003). Les concentrations faibles du pH enregistrées au niveau de la station 3 peuvent être dues à la

présence de la matière organique. Plusieurs auteurs ont expliqué ce résultat dans le même écosystème par la présence de la matière organique biodégradable (Fekhaoui 2005, El Morhit *et al.* 2009). Par ailleurs, les valeurs de ce paramètre relevées dans l'estuaire du Loukkos sont voisines de celles trouvées par Hatje (2003) et Sarkar *et al.* (2007).

La différence entre la concentration de la salinité ainsi que la conductivité entre l'amont et l'aval de l'estuaire du Loukkos peut s'expliquer par l'influence des eaux marines et par les rejets industriels qui pénètrent à l'intérieur de l'estuaire, favorisés par la faible pente du cours d'eau principal, ce qui entraîne une augmentation importante des ions chlorure. Cette influence permet de définir un gradient de minéralisation décroissant de l'aval vers l'amont et la dilution des apports en eau amont douce où la nature géologique salifère et gypsifère qui caractérise les stations amont influencent la charge en sels dissous (Fekhaoui 2005, El Morhit *et al.* 2008). Les valeurs moyennes de la conductivité relevées dans l'ensemble de l'écosystème sont élevées par rapport à celles relevées par exemple dans l'estuaire de Sebou (Malki *et al.* 2008), entre 0 et 29 mS/cm, et dans les stations de Babughat et de Diamond Harbor de la rivière de Ganges en Inde (Sarkar *et al.* 2007) où elles fluctuent entre 0,8 et 3,9 mS/cm.

Les valeurs moyennes extrêmes de la salinité enregistrées au cours des différentes campagnes sont relativement élevées par rapport à celles déterminées dans d'autres sites. En Inde, Sarkar *et al.* (2007) ont expliqué cette situation par l'influence des apports naturels ainsi que par des apports anthropiques. D'autres auteurs ont trouvé que la concentration de la salinité est voisine à celle trouvée dans notre étude (Snoussi 1984, Fekhaoui 2005). El Morhit *et al.* (2008) ont expliqué ce phénomène par l'influence de la dynamique marégraphique et les eaux douces.

Dans l'ensemble du site, la concentration de la DBO est relativement élevée par rapport à celle mesurée dans d'autres sites tels que la rivière de Ganges où elle fluctue entre 2,7–5,95 mg/l dans la station de Babughat et entre 0,75–2,8 mg/l dans la station de Gangasar (Sarkar *et al.* 2007) suggérant l'excès de rejets des polluants d'origine organique.

Les teneurs en nitrates enregistrées dans l'estuaire du Loukkos sont relativement plus faibles que celles observées dans le même estuaire par Fekhaoui (2005). Ces valeurs ont été expliquées par la présence de phytoplancton. Ailleurs, les nitrates peuvent atteindre des valeurs faibles (3,54–7,05 mg/l) dans le sud-est de l'Inde (Damotharan *et al.* 2010), suggérant la présence de la matière organique. Gassama & Violette (2002) ont expliqué l'augmentation des nitrates par la présence d'engrais azotés du bassin versant de Kaluvelly, Sud-Est de l'Inde. D'autres auteurs ont trouvé que les concentrations des nitrates peuvent atteindre 7,74 mg/l enregistrées dans la rivière du Kizihrmak du littoral de la Turquie (Bakan *et al.* 2010).

Contrairement à leur variation spatiale, les paramètres mesurés montrent une variation mensuelle significative (Tab. III). Cependant, les résultats de l'analyse de la

variabilité inter-mois montrent que seules la température et le pH (à $P < 0,001$) et la matière en suspension (à $P < 0,05$) ont un rythme saisonnier net (Fig. 4 E-H).

Les valeurs de la température, maximales en été et minimales en hiver, sont voisines de celles qui ont été mesurées dans les travaux antérieurs (El Blidi & Fekhaoui 2003, Hatje 2003, Fekhaoui 2005, Yurkovskis 2007, Malki *et al.* 2008). On retrouve dans l'évolution générale de la température les caractères particuliers aux milieux des estuaires. Des températures minimales ont été relevées en janvier 2007 et mars 2006 pendant les deux cycles, alors que les températures maximales ont été enregistrées pendant les mois de juillet 2006 et novembre 2006. Les températures peuvent différer sensiblement entre le ruissellement et la basse mer en raison des différences des hauteurs d'eau à ces deux périodes (2006-2007) et des conditions atmosphériques. Les écarts maximaux surviennent en hiver et en été (Fig. 4, F et H), tandis qu'au début du printemps (mai 2006 et mars 2007), les températures tendent à s'équilibrer avant de s'inverser. Il faudrait aussi souligner l'influence des apports d'eaux fluviales en hiver, plus froides que les eaux marines.

Les valeurs moyennes maximales du pH ont été enregistrées pendant la période automnale (novembre 2006), alors que les valeurs moyennes minimales ont été enregistrées pendant la période hivernale (mars 2006) durant les deux cycles de marées. Pendant la période hivernale, le pH subit une diminution progressive, ce qui est le résultat de la synthèse d'acides pendant la dégradation ou l'oxydation de la matière organique.

Dans l'estuaire du Loukkos, les eaux sont assez chargées en matière en suspension en relation avec le potentiel érosif relativement faible du bassin. La forte charge (108 mg/l) exceptionnellement enregistrée en janvier 2007 est probablement le résultat d'une manifestation hydrologique brutale (crue), dont la matière en suspension montre une grande différence entre les valeurs minimales et maximales enregistrées. Ceci pourrait être lié aux variations saisonnières très importantes et aussi à la dynamique marégraphique (Fig. E et G). L'augmentation moyenne de la matière en suspension peut être attribuée à une activité agricole et à une intense érosion du bassin versant, suite à des pluies orageuses brutales. Lors des pluies, le transport par ruissellement de particules de sol vers les cours d'eau occasionne une augmentation des matières en suspension. Une hausse des matières en suspension est généralement accompagnée d'une élévation de la turbidité, ce qui rend le traitement de l'eau à des fins d'approvisionnement en eau potable plus complexe et plus coûteux. Une telle hausse peut aussi entraîner un réchauffement de l'eau, lequel aura pour effet de réduire la qualité de l'habitat pour les organismes d'eau froide (Hébert & Légaré 2000).

Par ailleurs, au cours des deux cycles de marée, l'ACP et l'AD ont montré que les autres paramètres hydrologiques (oxygène dissous, carbone organique total et demande chimique en oxygène) ne contribuaient que faiblement dans l'estuaire du Loukkos, à la variation spatio-temporelle.,

Ce résultat met en évidence la dynamique des eaux qui a joué un rôle de brassage des différentes masses d'eau, empêchant tout établissement d'une stratification verticale et diminuant le gradient aval-amont.

Dans notre étude, la concentration de l'oxygène dissous est relativement faible par rapport aux valeurs habituellement obtenues dans d'autres estuaires (El Blidi & Fekhaoui 2003). Le taux qu'a été trouvé dans notre étude est voisin à celui déterminé par Fekhaoui (2007) et varie entre 6 et 9 mg/l. Fekhaoui (2005) a expliqué ce taux par l'élévation anormale de la température qu'a connu l'estuaire au début de l'année 2005. En plus, El Morhit *et al.* (2008) ont expliqué la concentration de l'oxygène par le mouvement de la marée, qui engendre un brassage continu de la masse d'eau et par conséquent un enrichissement de la phase dissoute en oxygène. D'autres études ont trouvé que la concentration de l'oxygène est faible et dépend de la dynamique marégraphique (Hatje 2003, Yurkovskis 2007, Malki *et al.* 2008). L'évolution spatio-temporelle de la teneur de l'oxygène dissous au niveau de l'estuaire du Loukkos montre que la charge en matière organique biodégradable d'origine domestique, industrielle et agricole rejetée et accumulée, contribue à une chute sensible de l'oxygénation du milieu, surtout dans la station 3. Les apports excessifs en matières organiques fermentescibles rejetées par les égouts de la ville de Larache susceptibles d'être oxydés, se traduisent par une consommation accrue de l'oxygène et d'une baisse intermédiaire de sa teneur.

L'évolution saisonnière de l'oxygène dissous montre des concentrations plus élevées au cours de la saison estivale (juillet et septembre 2006) que lors de la saison hivernale (mars 2006). Ceci est en désaccord avec les études antérieures, suggérant qu'une eau froide contient une plus grande quantité d'oxygène dissous qu'une eau chaude (Hébert & Légaré 2000).

Les valeurs du carbone organique total montrent des variations importantes dénotant un gradient amont-aval. Cette situation peut être attribuée sans doute à la dynamique marégraphique. Ces valeurs sont très élevées par rapport à celles déterminées dans l'estuaire du port Jackson (4,54 mg/l; Hatje 2003), suggérant que cette situation ne peut être expliquée que par les mouvements de la marée.

Sarkar *et al.* (2007) ont expliqué la faible concentration de la demande chimique en oxygène par la présence de matière organique. Le même phénomène a été décrit par Romero *et al.* (2004) et Bakan *et al.* (2010). Par ailleurs, des valeurs maximales ont été enregistrées à marée haute pendant la saison hivernale (mars 2007). Ceci confirme l'origine domestique d'une eau usée de la ville de Larache.

CONCLUSION

Le renouvellement de l'estuaire du Loukkos en eau d'origine marine est considérable et constitue la pompe principale de la circulation des eaux intra-estuaire. 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 dans l'alimentation permanente par les eaux continentales. Ainsi, cette étude permettra d'adopter une meilleure approche méthodologique visant à réduire le nombre de stations et d'augmenter la fréquence d'échantillonnage, en vue d'une compréhension approfondie du fonctionnement hydrologique du site pour garantir sa protection.

Remerciements

Une grande partie de ce travail a été réalisée dans le cadre du Programme Thématique d'Appui à la Recherche Scientifique PROTARS III D 14/52 au sein de l'UFR : Biodiversité et aquaculture à la Faculté des Sciences de Rabat en collaboration avec l'Institut Scientifique et l'Institut National d'Hygiène (Rabat). Les auteurs remercient les évaluateurs anonymes pour les remarques et commentaires qui ont permis d'améliorer le manuscrit. Nous remercions également Amina El Morhit (Fac. Sci. Kénitra) qui a bien voulu relire et corriger le manuscrit.

Références

- Bakan G., Özkoç H.B., Tülek S. & Cüce H. 2010. Integrated environmental quality assessment of Kizilirmak river and its coastal environment. *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.*, 10, 453-462.
- Bazairi H., Gam M., Kalloul S. & Zourarah B. 2005. Caractérisation bio-géologique des habitats benthiques d'un écosystème côtier de l'Atlantique marocain : l'estuaire du bas Loukkos. *3^{èmes} Journ. Intern. Géosci. Environnement*, El Jadida, 8-10 juin 2005.
- Bryan G.W. & Langoston W.J. 1992. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to united estuary. *Environ. Poll.*, 76, 89-131.
- Cheggour M., Chafik A., Fisher N.S. & Benbrahim S. 2005. Metal concentrations in sediments and clams in four Moroccan estuaries. *Mar. Environ. Res.*, 59, 119-137.
- Colas S. 2011. Pollutions et qualité du milieu marin. *Références*, Service de l'observation et des statistiques / Commissariat général au développement durable / Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, France, mai 2011, pp. 103-128 p. www.onml.fr/uploads/media/references_littoral-chap.V.pdf
- Damotharan P., Vengadesh Perumal N., Arumugam M., Vijayalakshmi S. & Balasubramanian T. 2010. Seasonal variation of physico-chemical characteristics in point Calimere Coastal Waters (South East coast of India). *Middle-East J. Sci. Res.*, 6, 4, 333-339.
- Doledec S. & Chessel D. 1991. Recent developments in linear ordination methods for environmental sciences. *Adv. Ecol.*, 1, 133-155.
- El Blidi S. & Fekhaoui M. 2003. Hydrologie et dynamique marégraphique de l'estuaire du Sebou (Gharb, Maroc). *Bull. Inst. Sci.*, sect. Sci. Vie, 25, 57-65.
- El Morhit M. 2005. *Évaluation de la pollution métallique de la côte atlantique marocaine (port Laïyoune, Fom l'oued et Laâsilia)*. Dipl. Etudes Sup. Approf., Univ. Ibn Tofail. Fac. Sci. Kenitra, Maroc.
- El Morhit M., Fekhaoui M., Serghini A., El Blidi S., El Abidi A., Bennaakam R., Yahyaoui A. & Jbilou M. 2008. Impact de l'aménagement hydraulique sur la qualité des eaux et des sédiments de l'estuaire du Loukkos (côte atlantique, Maroc). *Bull. Inst. Sci.*, sect. Sci. Terre, 30, 39-47.
- El Morhit M., Fekhaoui M., Elie P., Girard P., Yahyaoui A., El Abidi A. & Jbilou M. 2009. Heavy metals in sediment, water

- and the European glass eel, *Anguilla anguilla* (Osteichthyes : Anguillidae) from Loukkos river estuary (Morocco, eastern Atlantic). *Cybium*, 33, 3, 219-228.
- Ezzaouak M. 1991. *La caractérisation hydrodynamique physico-chimique et bactériologique des eaux superficielles de l'estuaire de Bouregreg (Maroc) soumis aux rejets des villes de Rabat et Salé*. Thèse Doct. 3^{ème} cycle, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 140 p.
- Fekhaoui M. 2005. *Projet gestion intégrée du Complexe des Zones Humides du Bas Loukkos (Larache, Maroc); phase du diagnostic : Hydrologie*. Fondation Ciconia, Lichtenstein, et géré par le GREPOM, 40 p (inédit).
- Gassama N. & Violette S. 2002. Contributions à l'étude hydro-géochimique du bassin versant de Kaluvelly, Sud-Est de l'Inde. DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie. Univ. Pierre et Marie Curie, Univ. Paris-Sud, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 34 p.
- Hatje V. 2003. Particulate trace metal and major element distributions over consecutive tidal cycles in Port Jackson Estuary, Australia. *Environ. Geol.*, 44, 231-239.
- Himmi N., Fekhaoui M., Foutlane A., Bourchich H., El Maroufy M., Benazzou T. & Hasnaoui M. 2003. Relazione plankton-parametri fisici chimici in un bacino di maturazione (laguna mista Beni Slimane – Morocco. *Riv. Idrobiol.*, 110-111.
- Hébert S. & Légaré S. 2000. Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau. Direction du suivi de l'état de l'environnement, Ministère de l'Environnement Gouvernement du Québec, 5 p (inédit).
- Kumar A.A., Dipu S. & Sobha V. 2011. Seasonal variation of heavy metals in Cochin Estuary and adjoining Periyar and Muvattupuzha rivers, Kerala, India. *Global J. Environ. Res.*, 5, 1, 15-20.
- Malki M., Marín I., Essahale A., Amils R. & Moumni M. 2008. Physico-chemical parameters and bacterial diversity in the Moroccan's Sebou River. *J. Food, Agric. & Environ.*, 6, 172-176.
- Mode A.W., Onokwai N.G., Onwuka O.S., Ekwe A.C. & Oha I.A. 2010. Integrating geographic information system (GIS) and hydrochemistry for heavy metal pollution studies: The case of Ubeji and Omadino areas of Delta State, Southern Nigeria. *J. Geol. Mining Res.*, 2, 7, 183-196.
- Morris A.W., Allen J.I., Howland R.J.M. & Wood RG. 1995. The estuary plume zone: source or sink for land-derived nutrient discharges? *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, 40, 387-402.
- Romero A.H., Hernandez C.T., Malo E.A. & Bello-Mendoza R. 2004. Water quality and presence of pesticides in a tropical coastal wetland in southern Mexico. *Mar. Poll. Bull.*, 48, 1130-1141.
- Sarkar S.K., Saha M., Takada H., Bhattacharya A., Mishra P. & Bhattacharya B. 2007. Water quality management in the lower stretch of the river Ganges, east coast of India: an approach through environmental education. *J. Cleaner Prod.*, 15, 1559-1567.
- Snoussi M. 1984. Comportement du Pb, Zn, Ni et Cu dans les sédiments de l'estuaire de Loukkos et du proche plateau continental (côte Atlantique marocaine). *Bull. Inst. Géol. bassin d'Aquitaine*, 35, 23-30.
- Sokal R.R., Rohlf J.F. 1995. *Biometry*, third ed., W.H. Freeman and Co., New York.
- Yahyaoui A. & Azeroual A. 2005. Etude de diagnostic : « Poissons du Complexe de Zones Humides du Bas Loukkos (Larache, Maroc) ». *Projet Gestion Intégrée du Complexe de Zones Humides du Bas Loukkos, Actions Opérationnelles*, 36 p.
- Yurkovskis A. 2007. Dynamics of particulate major and trace elements in the lower reaches of the Daugava River and adjacent area of the Gulf of Riga (Baltic Sea). *Mar. Poll. Bull.*, 49, 249-263.

Manuscrit reçu le 20 octobre 2011

Version modifiée acceptée le 31 juillet 2012