

Etude des facteurs influençant la répartition géographique et temporelle de la contamination des côtes atlantiques marocaines par les métaux lourds : cas du mercure, du plomb et du cadmium

Survey of the carriers influencing the geographical and temporal distribution of contamination by heavy metals along the Atlantic Moroccan coasts: the case of mercury, lead and cadmium

Samir Benbrahim, Abdelghani Chafik, Rachid Chfiri, Fatima Zohra Bouthir, Mostafa Siefeddine, Ahmed Makaoui

Laboratoire de chimie, Institut National de Recherche Halieutique (INRH), 2 rue de Tiznit - Casablanca, Maroc.
e-mail : sbenbrahim@yahoo.co

Résumé

Benbrahim S., A. Chafik, R. Chfiri, F. Zohra Bouthir, M. Siefeddine, A. Makaoui – Etude des facteurs influençant la répartition géographique et temporelle de la contamination des côtes atlantiques marocaines par les métaux lourds : cas du mercure, du plomb et du cadmium. *Mar. Life*, 16 (1-2) : 37-47.

Le présent travail, réalisé dans le cadre d'un programme de surveillance de la qualité du milieu marin, porte sur l'étude des facteurs influençant la contamination du littoral atlantique marocain par les métaux lourds (Cd, Pb, Hg), en utilisant les moules comme bioindicatrices de pollution (*Mytilus galloprovincialis* et *Perna perna*). La répartition géographique des métaux montre que le secteur nord du littoral atlantique marocain se caractérise par une contamination par le plomb, qui se manifeste essentiellement au niveau de la zone de Ain Sbâa à Casablanca, recevant des eaux usées urbaines et industrielles de la ville et des concentrations plus élevées en mercure, particulièrement au niveau du site de la plage Hmimou à Mohammadia, avoisinant les rejets industriels d'une société d'électrolyse. Les secteurs du centre et du sud révèlent une contamination par le cadmium, qui enregistre des taux non négligeables dans

les zones situées à proximité des points de rejets des industries de transformation des phosphates, situées à Jorf Lasfar, dans la région d'El Jadida et à Safi. Plus au sud, les teneurs en Cd baissent, sans toutefois atteindre les faibles concentrations enregistrées au nord. L'enrichissement de la région sud par le Cd pourrait être lié au phénomène d'upwelling.

La répartition temporelle semble suivre le cycle de reproduction de la moule. Les éléments analysés, mis à part le Cd, montrent que la période hiver – printemps est affectée par les fortes concentrations, et la période d'été se caractérise par les concentrations les plus faibles. Pour le cadmium, les résultats montrent que l'upwelling et les apports anthropiques influencent le cycle de sa bioaccumulation. En effet, au niveau des zones influencées par l'upwelling, les concentrations maximales sont enregistrées en été et coïncident avec la période de résurgence des eaux profondes.

MOTS CLÉS :

contamination, littoral atlantique, métaux lourds, moule.

Abstract

Benbrahim S., A. Chafik, R. Chfiri, F. Zohra Bouthir, M. Siefeddine, A. Makaoui – [Survey of the carriers influencing the geographical and temporal distribution of contamination by heavy metals along the Atlantic Moroccan coasts: the case of mercury, lead and cadmium]. *Mar. Life*, 16 (1-2): 37-47.

The present work, carried out as part of a monitoring program of the quality of the marine environment, is a survey of the factors influencing the contamination of the Moroccan Atlantic coastline by heavy metals (Cd, Pb, Hg), using the mussels as bioindicators of pollution (*Mytilus galloprovincialis* and *Perna perna*). The geographical distribution of the metals shows that the Northern sector of the Atlantic Moroccan coasts is characterized by lead contamination that occurs in the vicinity of areas receiving urban and industrial waste outflows, in particular the Ain Sbâa area in Casablanca, and higher concentrations in mercury, especially near the Hmimou Beach in Mohammadia, which is in the vicinity of industrial waste discharges from an

electrolysis company. The centre and south sectors also show contamination by cadmium, with significant rates recorded in the zones situated near the discharge from phosphate transformation industries, situated at Jorf Lasfar, in the region of El Jadida and in Safi. Further South, Cd rates are lower, but not as low as those recorded in the north. The enrichment of this region by Cd could be connected with the phenomenon of upwelling.

The temporal distribution seems to follow the reproduction cycle of the mussel. The elements analyzed, except for Cd, show that the Winter – Spring period shows the strongest concentrations, and the Summer period lower concentrations. For cadmium, the results show that upwelling and industrial discharges influence the cycle of bioaccumulation. In the areas influenced by upwelling, the maximum concentrations are recorded in Summer, and coincide with the period of the deep water resurgence.

KEY-WORDS:

contamination, Atlantic Littoral, heavy metals, mussel.

Introduction

Le littoral atlantique marocain s'étend sur environ 3000 km. Il présente des diversités biologiques et des richesses halieutiques considérables. Sa situation géographique lui permet d'être parmi les cinq zones connues dans le monde, où se manifestent des phénomènes d'upwelling (Orbi *et al.*, 1998 ; Makaoui *et al.*, 2005).

Ce littoral est l'objet de multiples atteintes provoquées par les activités humaines, développées essentiellement le long des côtes du nord et du centre. Le secteur nord, de Tanger à Casablanca, regroupe les plus grandes agglomérations urbaines et concentre plus de 2/3 des unités industrielles du pays (textile, tannerie, parachimie, pétrochimie, agroalimentaire,...). Le secteur du centre (Casablanca - Agadir) se caractérise par des agglomérations urbaines et des infrastructures industrielles importantes, notamment les unités de transformation des phosphates, implantées au niveau des zones littorales d'El Jadida (Jorf Lasfar) et de Safi. Le secteur sud d'Agadir à Dakhla, connaît un développement urbain et industriel moins important, qui se limite surtout au niveau de la ville d'Agadir.

Ces différentes activités humaines génèrent une contamination non négligeable du milieu littoral, notamment par les métaux toxiques. Ces derniers peuvent affecter la qualité du milieu et menacer son équilibre écologique, tout en mettant en péril la santé animal et humaine. L'introduction, par l'homme, de ces éléments dans le

milieu marin a provoqué plusieurs cas d'accidents mortels ; c'est le cas de la catastrophe de Minamata due à des rejets de mercure (Irukayama, 1967) et celle d'Itai-Itai due au cadmium (Tsuchiya, 1978).

Dans ce domaine, le présent travail vise à évaluer le niveau de contamination du littoral atlantique marocain par les métaux toxiques (cadmium, plomb et mercure) et à déterminer les facteurs qui agissent sur leur répartition géographique et temporelle au niveau de chaque secteur du littoral marocain. Son originalité réside, en plus de la toxicité prouvée des métaux lourds, dans le fait qu'il met en évidence les facteurs responsables de la contamination et leur effet sur le cycle de bioaccumulation chez deux espèces de moules, *Mytilus galloprovincialis* et *Perna perna*, connues comme bioindicateurs de pollution, pour leur capacité d'accumulation des métaux (Amiard *et al.*, 1980 ; Henry, Carles, 1985 ; Cossa, 1989).

Matériel et méthodes

Présentation des stations d'échantillonnage

Le choix des stations de prélèvement est établi selon les critères suivants :

- 1 – au niveau des zones de production conchylicole, situées loin des sources de pollution anthropique,
- 2 – au niveau des zones urbaines et industrielles, à proximité des collecteurs de rejets liquides,

3 – au niveau des embouchures d'estuaires,

Le nombre et le libellé de ces stations sont donnés dans le **tableau I**. Elles sont au nombre de 24, réparties le long du littoral atlantique (**Figure 1**).

Echantillonnage et conditionnement

Le matériel choisi comme indicateur de la contamination par les métaux toxiques est la moule, représentée par deux espèces : *Mytilus galloprovincialis* et *Perna perna*. Ces deux espèces forment des populations plus au moins denses le long des côtes marocaines et une répartition spatiale bien définie (Id Halla, 1996). *Mytilus galloprovincialis* présente une répartition atlantico-méditerranéenne, jusqu'au Sud marocain où elle cohabite avec *Perna perna*. Ainsi, entre Tanger et Agadir, les prélèvements ont porté sur *Mytilus galloprovincialis* et entre Agadir et Dakhla, les prélèvements ont porté sur *Perna perna*.

L'échantillonnage est réalisé selon une fréquence saisonnière, durant un suivi de quatre ans (2000 à 2003). Les individus de tailles moyennes (30 à 40 mm) recueillis au niveau des gisements naturels, sont débarrassés des déchets et des organismes divers qui peuvent adhérer à leurs coquilles. Les échantillons sont épurés, pendant au moins 24 h, dans de l'eau de mer prélevée à l'endroit où ils ont été récoltés. Ils sont ensuite décortiqués, rincés à l'eau distillée, égouttés et enfin lyophilisés.

Minéralisation

La minéralisation est réalisée selon des méthodes validées (Auger, 1989 ; Sanjuan, Cossa, 1993). Pour le Cd et le Pb, on pèse environ 0,20 g de tissu lyophilisé et on ajoute 4 mL d'acide nitrique pour analyse. Pour le mercure, on pèse environ 0,25 g de tissu et on ajoute 45 mg d'oxyde de vanadium et 5 mL d'acide nitrique. Les prises d'échantillons sont placées dans des bombes en téflon PFA à forte résistance, de marque Savillex, fermées hermétiquement et laissées à la température ambiante pendant au moins une heure. Elles sont ensuite placées dans un micro-onde à digestion de marque CEM MDS.81D. Les minéralisats sont, par la suite, dilués à 50 mL par l'eau Milli-Q.

Analyses

L'analyse de Cd et Pb est réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique (Perkin Elmer 3100), équipé d'un four à graphite (Perkin Elmer HGA 600/700). Pour le Hg, le dosage est réalisé par spectrophotométrie VGA FIMS 100 (Perkin Elmer), après ajout d'une solution réductrice de chlorure stanneux à 13 g.L⁻¹ dans une solution d'acide chlorhydrique à 3%.

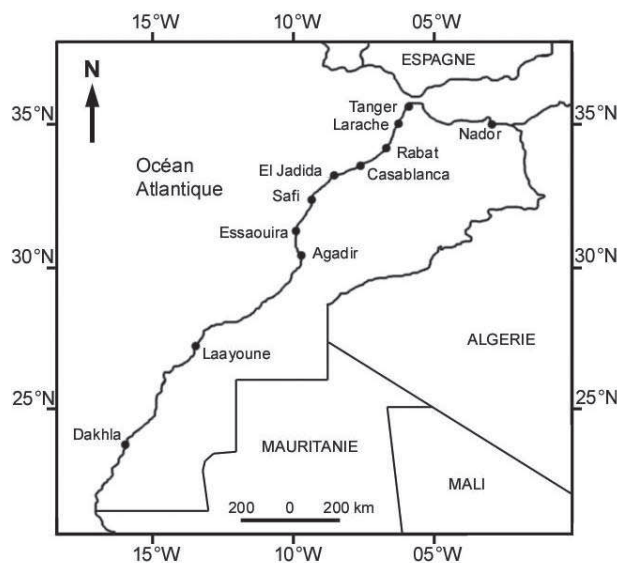


Figure 1

Carte du littoral marocain.
 Map of the Moroccan coast.

Tableau I

Situation des sites de prélèvement des moules le long du littoral atlantique marocain.

Localisation of sampling sites of mussels on the Moroccan Atlantic coast.

Régions	Points de prélèvements	Situation		
		Au niveau d'embouchure	A proximité des rejets	Loins des sources de pollution
Tanger	Malabata		x	
Larache	Embouchure Loukkos	x	x	
Mehdia	Embouchure Sebou	x		
Rabat	Embouchure Bouregreg	x		
Mohammadia	Harhoura			x
	Mansouria			x
	Oued Mellah	x	x	
Casablanca	Plage Hmimou		x	
	Ain Sbaâ		x	
	Dar Bouazza			x
El Jadida	Sidi Abed		x	
	Relais		x	
	Ouled Ghanem			x
Safi	Dar El Hamra			x
	Cap Beddouza			
	Jorf Lihoudi		x	
Essaouira	Essaouiria Lakdima			x
	zone urbaine		x	
Agadir	Tamri			x
	Cap Ghir			x
Laâyoune	Akhefnir			x
	Tarouma			x
	Aoufist			x
Dakhla	Dunfort			x

Les limites de détection (L.D) sont calculées comme étant trois fois l'écart type sur la mesure du blanc rapportée au poids de la prise d'essai moyenne. Elles sont exprimées comme suit (en mg/kg de poids sec) : pour le mercure, L.D = 0,024 ; pour le plomb, L.D = 0,023 ; pour le cadmium, L.D = 0,003. La fiabilité des mesures est testée par le dosage, avec chaque série d'analyses, d'un échantillon certifié provenant de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique de Monaco et d'un blanc d'échantillon. La précision est évaluée en comparant les valeurs obtenues avec les valeurs certifiées des échantillons de référence.

Résultats

Répartition géographique des taux de contamination

L'étude de la répartition géographique de la contamination par le Hg, le Cd et le Pb des deux espèces de moules (*Mytilus galloprovincialis* et *Perna perna*), concerne les 24 points de prélèvement (**Figure 1**). Les résultats obtenus ont permis d'établir des statistiques sur le niveau de contamination, par le calcul des valeurs moyennes, des écarts types et des valeurs limites (**Tableau II**).

Les teneurs rencontrées pour le mercure dénotent une accumulation moyenne plus prononcée au niveau de la région du centre, entre Mohammadia et El Jadida (**Figure 2**). Le site qui présente la plus forte accumulation en Hg est celui de la plage Hmimou, situé à Mohammadia (0,79 mg/kg.ps), suivi des sites du Relais (0,56 mg/kg.ps), de Dar El Hamra (0,55 mg/kg.ps) et de Sidi Abed (0,50 mg/kg.ps), situés dans la région d'El Jadida. Par ailleurs, les teneurs moyennes sont plus faibles et varient entre 0,09 et 0,36 mg/kg.ps.

Concernant le plomb, le niveau de contamination des moules est plus important dans le secteur nord, de Tanger à Casablanca (**Figure 2**), où les concentrations varient entre 1,92 et 9,55 mg/kg.ps. Le site de Ain Sbaâ est le point le plus contaminé, avec des teneurs moyennes et maximales respectivement de 9,55 et 15,37 mg/kg.ps. Au sud, entre Agadir et Dakhla, les concentrations enregistrent les valeurs les plus faibles, comprises entre 0,66 à Tarouma (région de Laâyoune) et 1,11 à cap Ghir (région d'Agadir).

Pour le cadmium, les concentrations moyennes enregistrées dans les moules sont les plus élevées. Elles sont de 7,45 et 8,90 mg/kg.ps, mesurées respectivement au niveau des sites de Sidi Abed et du Relai (Jorf Lasfar). Ce dernier site a enregistré des taux de contamination

Points de prélèvements	[Cd] moyenne	[Pb] moyenne	[Hg] moyenne
	(écart type) Min – max	(écart type) Min – max	(écart type) Min – max
Malabata	0.19 (0.14) <LD (0.45)	3.12 (1.77) 0.2 – 5.85	0.22 (0.06) 0.14 – 0.35
Embouchure Loukkos	0.27 (0.18) <LD – 0.54	2.60 (1.81) 0.1 – 7.15	0.19 (0.08) 0.06 – 0.30
Embouchure Sebou	0.68 (1.00) <LD – 3.24	1.92 (1.25) 0.15 – 5.5	0.17 (0.07) 0.07 – 0.35
Embouchure Bouregreg	0.78 (2.28) 0.02 – 8.68	3.35 (3.01) <LD – 11.7	0.31 (0.29) 0.13 – 1.20
Harhoura	0.32 (0.45) 0.02 – 1.93	2.51 (1.64) <LD – 7.45	0.21 (0.10) 0.03 – 0.45
Mansouria	0.29 (0.16) 0.08 – 0.74	2.35 (1.70) <LD – 6.55	0.23 (0.21) <LD – 0.85
Oued Mellah	1.18 (2.32) <LD – 6.57	3.80 (1.82) 0.67 – 6.80	0.29 (0.16) 0.13 – 0.65
Plage Hmimou	1.46 (3.53) <LD – 12.60	4.04 (2.99) 0.09 – 11.5	0.79 (0.40) 0.20 – 1.55
Ain Sbaâ	0.30 (0.16) 0.06 – 0.55	9.55 (3.65) 3.03 – 15.37	0.36 (0.21) 0.05 – 0.85
Dar Bouazza	0.38 (0.20) 0.02 – 0.67	1.72 (0.74) 0.47 – 3.47	0.16 (0.08) 0.07 – 0.42
Sidi Abed	7.45 (5.53) 1.40 – 19	2.78 (3.28) 0.45 – 12.14	0.50 (0.65) 0.10 – 2.80
Relais	8.90 (8.24) 1.55 – 26.80	2.40 (2.89) <LD – 10.5	0.56 (0.28) 0.16 – 1.10
Ouled Ghanem	1.89 (1.34) 0.02 – 5.70	1.15 (1.29) 0.11 – 5.08	0.35 (0.51) 0.01 – 2.05
Dar El Hamra	2.40 (2.37) 0.75 – 10.20	1.16 (0.87) 0.06 – 3.45	0.55 (0.82) 0.06 – 2.85
Cap Beddouza	1.76 (0.95) 0.02 – 3.18	1.60 (1.61) <LD – 6.60	0.35 (0.60) 0.03 – 2.30
Jorf Lihoudi	4.15 (3.35) 0.14 – 9.35	2.95 (2.47) 0.60 – 10.55	0.12 (0.06) <LD – 0.21
Essaouiria Lakdima	4.13 (2.56) 0.02 – 9.10	1.38 (1.33) <LD – 3.76	0.20 (0.19) 0.01 – 0.60
Essaouira zone urbaine	1.79 (1.20) 0.65 – 5.30	0.89 (0.51) <LD – 2	0.24 (0.40) <LD – 1.65
Tamri	2.02 (1.11) <LD – 4.05	0.98 (0.64) <LD – 2.25	0.15 (0.14) <LD – 0.54
Cap Ghir	2.49 (2.63) 0.65 – 10.59	1.11 (0.66) 0.31 – 2.40	0.36 (0.67) 0.07 – 2.65
Akhefnir	3.63 (2.54) 0.99 – 8.73	0.90 (0.76) 0.04 – 2.42	0.11 (0.10) <LD – 0.26
Aoufist	1.56 (1.07) 0.50 – 4.48	0.64 (0.32) 0.09 – 1.20	0.09 (0.08) <LD – 0.25
Tarouma	1.13 (0.64) 0.10 – 2.12	0.66 (0.38) 0.10 – 1.23	0.14 (0.10) <LD – 0.29
Dunfort	1.94 (0.95) 0.75 – 3.50	0.91 (0.58) <LD – 1.74	0.17 (0.10) 0.03 – 0.37

Tableau II

Teneurs en métaux (mg/kg de poids sec) des moules récoltées le long du littoral atlantique (concentrations minimales, maximales et moyennes).

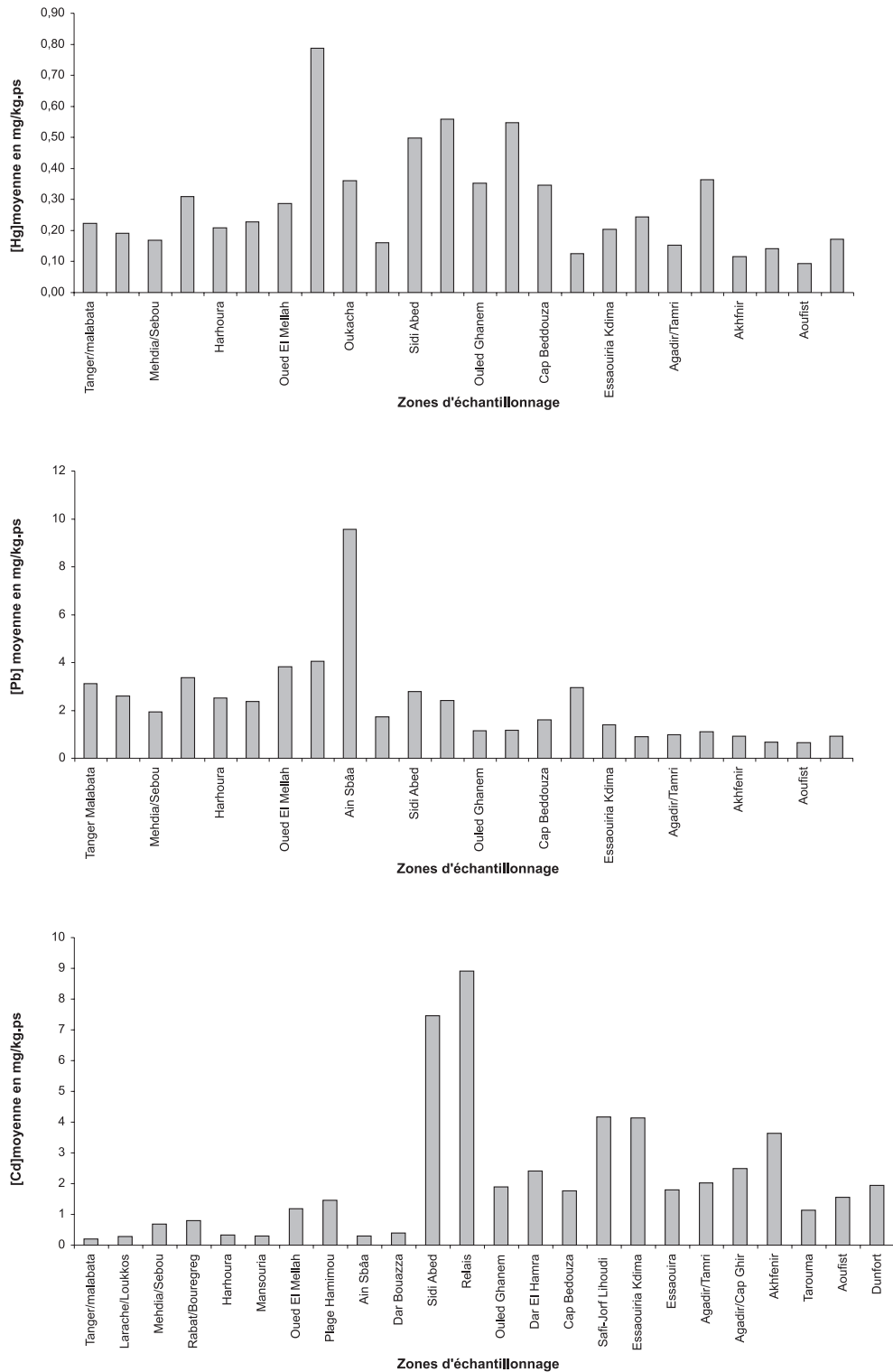
Content (mg/kg dry weight) in mussels sampled on the Atlantic coast (minimum, maximum and mean concentrations).

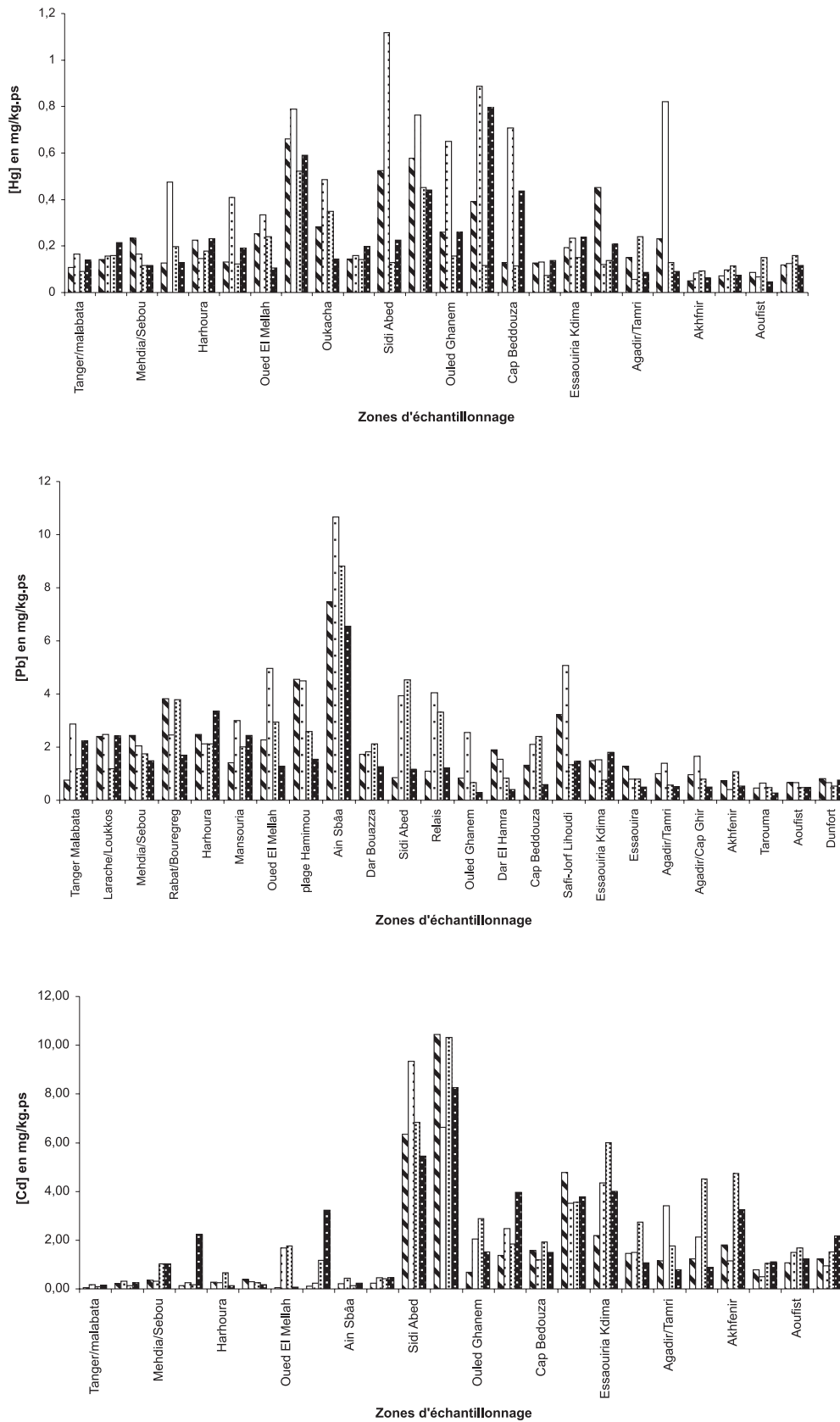
allant jusqu'à 26,80 mg/kg.ps. De même, la région de Safi a enregistré des taux assez élevés, au niveau de Jorf Lihoudi et Essouiria Lakdima, qui sont respectivement de 4,15 et 4,13 mg/kg.ps. Les résultats révèlent également qu'au niveau de la frange littorale sud, les taux de contamination par le cadmium sont plus élevés que ceux enregistrés dans le secteur nord.

Figure 2

Concentrations moyennes du mercure, du plomb et du cadmium dans les moules prélevées le long du littoral marocain (mg/kg de poids sec).

Mean concentrations of mercury, lead and cadmium in mussels sampled along the Atlantic coast (mg/kg dry weight).



**Figure 3**

Variations saisonnières moyennes des teneurs métalliques en mg/kg de poids sec chez les moules prélevées le long du littoral marocain (▨ hiver, ▤ printemps, ▥ été, ▦ automne).

Seasonal variations of the average metal content in mussels sampled along the Atlantic coast, in mg/kg dry weight (▨ Winter, ▤ Spring, ▥ Summer, ▦ Autumn).

Variations temporelles des taux de contamination

Les résultats des variations temporelles de l'accumulation des métaux lourds dans les échantillons des deux espèces de moules (*Mytilus galloprovincialis* et *Perna perna*) sont regroupés dans la **figure 3**. Ils correspondent aux teneurs moyennes calculées en fonction des saisons de prélèvement (hiver, printemps, été, automne). Ces résultats permettent de constater que :

- pour le mercure et le plomb, les teneurs maximales sont enregistrées pendant la saison printanière ou parfois l'hiver, et les teneurs minimales apparaissent pendant la saison estivale ou en automne. La variation des concentrations par rapport à la saison n'est pas régulière dans toutes les stations d'échantillonnage, et reste parfois difficile à distinguer au niveau de certains sites où les teneurs sont très faibles (Akhefnir, Tarouma, Aoufist, Dunfort),
- pour le cadmium, les résultats ne semblent pas suivre la même évolution spatio-temporelle. Aucune corrélation entre la variation saisonnière et les concentrations maximales n'est respectée.

Discussion

Répartition géographique des taux de contamination

Mercuré : Les teneurs en mercure relevées dans les secteurs littoraux nord et sud présentent un niveau de contamination inférieur à celui du secteur central. Le site le plus contaminé est celui de la plage Hmimou à Mohammadia. La contamination de ce site serait due aux rejets liquides d'une société d'électrolyse implantée dans cette région, qui utilise des cathodes en mercure pour l'obtention du chlore et de la soude (Bouthir *et al.*, 2004). La contamination des autres sites pourrait être liée notamment aux apports anthropiques émanant des différentes activités humaines de la région. Au niveau de la zone industrielle de la ville de Casablanca, nous constatons que le taux de contamination du site d'Ain Sbâa reste inférieur à 0,4 mg/kg.ps, dénotant un faible apport anthropique et une utilisation modérée de cet élément dans les unités industrielles de cette zone. Par ailleurs, dans les zones éloignées des sources de pollution, les concentrations enregistrées s'approchent des valeurs naturelles (Gill, Fitzgerald, 1985).

Par comparaison avec les résultats des différentes études effectuées à travers le monde, le niveau de contamination par le mercure des côtes atlantiques marocaines reste très proche de celui des autres régions

du globe, notamment les côtes écossaises : 0,17 à 2,58 mg/kg.ps (Davies, Pirie, 1980), la mer Adriatique : 0,16 à 2,36 mg/kg.ps (Strohal, Dzajo, 1971), la Nouvelle Zélande : 1,11 à 2,69 mg/kg.ps (Nielsen, Nathan, 1975) et la Corée : 0,45 à 2,07 mg/kg.ps (Won, 1973).

Plomb : Le niveau d'accumulation le plus élevé est enregistré dans la région nord (Tanger – Casablanca), qui connaît la plus forte concentration urbaine et industrielle du pays. Le site le plus touché est celui de Ain Sbaâ à Casablanca, dénotant un apport important en Pb dans le milieu récepteur. La contamination par cet élément est attribuée essentiellement aux rejets liquides urbains et industriels, ainsi qu'à la pollution générée par la circulation automobile. La caractérisation des rejets a montré qu'ils ont une importante charge polluante, notamment en Pb (Benbrahim *et al.*, 1997 ; Bouthir *et al.*, 2004).

Mis à part le site d'Ain Sbaâ, le niveau de contamination par le plomb varie entre 2 et 4 mg/kg.ps et reste comparable à celui enregistré dans d'autres régions du monde, notamment les côtes françaises, Manche, Atlantique et Méditerranée, dont la valeur moyenne enregistrée en 1993 est de 3,06 mg/kg.ps (R.N.O., 1995).

Cadmium : La distribution géographique de Cd montre que la frange littorale El Jadida - Dakhla présente une contamination plus prononcée par rapport à la frange littorale nord. Les stations situées à proximité des unités de traitement des phosphates, implantées respectivement dans les régions d'El Jadida (Jorf Lasfar) et de Safi, sont les points les plus contaminés. Des études antérieures (Chafik *et al.*, 1996, 2001 ; Cheggour *et al.*, 1999 ; Kaimoussi *et al.*, 2001) ont montré que les effluents de ces deux unités industrielles sont chargés en Cd et en Cu. En effet, le phosphate naturel contient des teneurs en Cd de l'ordre de plusieurs µg/g (Cossa, Lassus, 1989).

Les taux de Cd enregistrés au niveau des sites de la région d'El Jadida (Jorf Lasfar et Sidi Abed) sont plus élevés que ceux de Safi (Jorf Lihoudi et Essaouria Lakdima) à cause de la situation des points de prélèvement par rapport à la source de contamination et des teneurs en Cd dans les phosphates naturels qui peuvent varier selon le gisement minier exploité.

Malgré l'éloignement des sources de pollution et la chute des taux de Cd, la contamination de la frange littorale, Agadir – Dakhla, reste plus élevée que celle du secteur nord. Ceci pourrait être lié à d'autres facteurs qui contribuent à l'enrichissement du milieu par le Cd, notamment l'upwelling qui caractérise cette zone côtière marocaine (Orbi *et al.*, 1998 ; Makaoui *et al.*, 2005).

Ce phénomène a été constaté dans plusieurs régions du monde, influencées par l'upwelling. Mart et Nurenberg (1986), en réalisant un travail de synthèse, ont montré

que les zones d'upwelling présentent les teneurs les plus élevées en Cd. Kavun *et al.* (2002), ont relevé des concentrations plus importantes en cadmium, par rapport à d'autres cations métallique, chez la moule *Mytilus trossulus*, prélevée au niveau des îles de Kuril (nord-ouest de l'océan Pacifique). Ils ont lié la présence de Cd au phénomène d'upwelling.

Par comparaison avec les concentrations de cadmium enregistrées dans les moules d'autres aires géographiques (Cossa, Lassus, 1989), seuls les sites à proximité des unités de transformation des phosphates, montrent des valeurs dépassant les moyennes relevées ailleurs, notamment en mer de Barentz (0,6 mg/kg.ps), en mer Baltique (2,7 mg/kg.ps), en Atlantique des Etats-Unis (1,80 mg/kg.ps) et dans le Pacifique (4,1 mg/kg.ps). Toutefois, les concentrations relevées au niveau de ces sites restent intermédiaires entre les valeurs limites de la littérature.

Variations temporelles des taux de contamination

L'accumulation de Hg et de Pb en fonction des périodes d'échantillonnage montre que les teneurs maximales sont enregistrées pendant la saison printanière ou parfois l'hiver, et les teneurs minimales apparaissent pendant la saison estivale ou en automne. Ces résultats concordent avec de nombreux travaux qui ont mis en évidence l'influence des saisons sur l'accumulation des métaux par la moule, qui induisent un maximum de bioconcentration en hiver et au début du printemps et un minimum en été (Amiard *et al.*, 1980 ; Bryan *et al.*, 1980 ; Cossa, Rondeau, 1985 ; Langston, Spence, 1995). Ces travaux ont montré que les processus physiologiques liés aux différentes phases du cycle de reproduction, qui inclut la gamétogenèse et la constitution de substances de réserves, expliquent l'essentiel des variations saisonnières des concentrations métalliques dans les tissus des mollusques. Pendant la gamétogenèse, les gonades se développent et constituent un piège efficace pour les métaux. En revanche, la période de ponte s'accompagne d'une baisse de poids et d'une chute des teneurs métalliques, dont une partie est émise avec les gamètes.

Pour le cadmium, les résultats ne dénotent pas la même évolution temporelle au niveau des différents secteurs étudiés et ne sont pas corrélés au cycle de reproduction de la moule. Selon la littérature (Bryan, 1976 ; Laurier, 2001 ; Lawson, Mason, 1998 ; Wong, Cheung, 2001 ; Rainbow *et al.*, 2004), cette exception pourrait être liée à plusieurs facteurs, qui peuvent agir sur la bioaccumulation des métaux lourds par les mollusques, tels que la disponibilité de la nourriture, l'apport

anthropique ou naturel et les paramètres abiotiques (température, salinité...).

Ainsi, au niveau de la région El Jadida - Safi, les rejets industriels de transformation des phosphates représentent le principal facteur de la perturbation du cycle d'accumulation de la moule. Les travaux de Kaimoussi *et al.* (2000), réalisés dans cette région confirment que le Cd ne suit pas le cycle de reproduction de la moule dans cette zone.

Au niveau de la région Safi - Dakhla, la forte accumulation est enregistrée pendant la saison d'été, qui coïncide avec la période d'upwelling, essentiellement en été au niveau de cette frange côtière. En effet, selon Orbi *et al.* (1998) et Makaoui *et al.* (2005), quatre zones sont alimentées par la résurgence côtière, dont l'activité varie dans le temps et dans l'espace (**Figure 4**). Cette activité est importante en été au niveau des deux zones situées entre Safi et Laâyoune, en hiver et en été au niveau de la zone située entre Laâyoune et Dakhla, tandis qu'elle est quasi permanente au niveau de la zone située au sud de Dakhla.

Ce phénomène s'accompagne également de la variation de certains paramètres physico-chimiques, notamment la baisse de température de l'eau de mer. En effet, des mesures de températures côtières, réalisées pendant les saisons d'été 2001 et d'hiver 2002 (**Tableau III**), ont montré que les valeurs enregistrées pendant la saison d'été, au niveau des zones 1 et 2 des résurgences (**Figure 4**) sont plus faibles que les températures mesurées pendant la saison d'hiver. Ces résultats confirment les travaux de Makaoui *et al.* (2005), qui ont montré que les zones d'upwelling sont caractérisées par des températures superficielles plus froides en été. Si la température est un facteur qui pourrait également agir sur le cycle de bioaccumulation chez la moule, son effet n'a pas été enregistré dans le cas de Hg et de Pb.

De ce fait, et en concordance avec la littérature (Mart, Nurenberg, 1986 ; Kavun *et al.*, 2002), la résurgence des eaux profondes pourrait provoquer une augmentation de la bioaccumulation du Cd chez la moule, suite à un enrichissement des eaux superficielles par cet élément. Selon Chong, Wang, (2001), la cinétique de bioaccumulation de Cd chez la moule, reste linéaire et directement proportionnelle à sa concentration dans l'eau, dans les premiers temps de bioaccumulation.

Le traitement statistique réalisé par test ANOVA et appliqué aux résultats a confirmé la validité des variations saisonnières enregistrées pour Hg et Pb, alors qu'il n'enregistre pas de variations significatives pour Cd (**Tableau IV**).

Conclusion

L'étude de la répartition spatio-temporelle des concentrations métalliques (Hg, Pb, Cd) chez les deux espèces de moules, *Mytilus galloprovincialis* et *Perna perna*, prélevées le long du littoral atlantique marocain, a permis d'évaluer le niveau de contamination des secteurs littoraux et de mettre en évidence les facteurs influençant l'état de salubrité de chaque secteur.

La répartition géographique a permis de déduire que le secteur nord, entre Tanger et Casablanca, présente une contamination plus prononcée par le Pb. Les résultats ont enregistré les plus fortes teneurs au niveau de la zone de Casablanca, qui sont attribuées aux effluents émanant de la zone industrielle de Ain Sbaâ. La zone de Mohammadia présente une contamination plus importante par le mercure au niveau du site de la plage Hmimou, due aux rejets industriels d'une société d'électrolyse. Par contre, le secteur littoral allant d'El Jadida à Dakhla, dénote une contamination plus élevée par le Cd, avec des teneurs non négligeables au niveau des sites proches des rejets émanant des industries de transformation des phosphates, implantées à El Jadida (Jorf Lasfar) et à Safi.

Le phénomène d'upwelling est un facteur qui pourrait être à l'origine de l'enrichissement du milieu marin par le cadmium, et qui se manifeste surtout au sud, où les sources de pollution anthropique sont presque absentes.

Si les variations temporelles de l'accumulation de Hg et Pb montrent que les fortes concentrations sont enregistrées pendant la période hiver-printemps, en corrélation avec le cycle de reproduction de la moule, les variations des concentrations en Cd ne semblent pas suivre la même évolution. Les résultats enregistrés pour cet élément pourraient être liées au phénomène d'upwelling et aux apports anthropiques, qui agissent sur le cycle d'accumulation de cet élément chez les deux espèces de moules.

La comparaison de nos données avec d'autres travaux réalisés dans différentes régions du globe, pour les mêmes espèces ou des espèces voisines d'organismes bioindicateurs de pollution, montre une similitude significative des résultats. La contamination du littoral atlantique marocain par le Hg, le Pb et le Cd reste sans aucun dépassement significatif par rapport aux valeurs limites de la littérature.



Figure 4
 Situation des zones d'upwelling de la côte atlantique marocaine.
 Location of upwelling zones along the Moroccan Atlantic coast.

Tableau III

Températures mesurées dans les zones d'upwelling en été 2001 et en hiver 2002.

Measured temperatures in the zones of upwelling in Summer 2001 and Winter 2002.

	Latitude (N)	Longitude (W)	Profondeur (m)	Température d'été 2001 (°C)	Température d'hiver 2002 (°C)
Zone 1	32,5	9,3	10	14,89	17,36
	31	9,87	10	15,60	18,20
Zone 2	28,5	11,43	10	15,89	17,53
	26	14,57	10	18,70	17,08
Zone 3	25,5	14,87	10	17,90	16,69
	24	15,88	10	18,80	18,24

Tableau IV

Analyse de variance (Test F, ANOVA) de l'accumulation de Hg, Pb et Cd en fonction de la variation saisonnière chez la moule *Mytilus galloprovincialis* et *Perna perna*. NS : Non Significatif ; * : Significatif ($p < 0.05$), ** : Hautement significatif ($p < 0.01$).

Analysis of variance (Test F, ANOVA) of Hg, Pb and Cd accumulation, according to the seasonal variation at the mussel *Mytilus galloprovincialis* and *Perna perna*. NS: Non Significant;

* : Significant ($p < 0.05$), ** : Highly Significant ($p < 0.01$).

Classement par élément	Hg	Pb	Cd
F	4,24 **	3,74 *	0,45 NS

Bibliographie

- Amiard J.C., C. Amiard-Triquet, C. Metayer, J. Marchand, R. Ferre**, 1980 - Etude du transfert de Cd, Pb, Cu et Zn dans les chaînes trophiques néritiques et estuariennes I. Etat dans l'estuaire interne de la Loire (France) au cours de l'été 1978. *Wat. Res.*, **14** : 665-673.
- Auger D.**, 1989 - *Méthode de dosage du cadmium, du cuivre, du plomb et du zinc dans la chair de poisson*. Rapport IFREMER DERO-89-07-MR, 7 pp.
- Benbrahim S., A. Chafik, J. Dafir, F. Zidane**, 1997 - Contribution à l'étude de l'impact des rejets liquides sur le littoral casablançais. In : *Ressources halieutiques et environnement marin*, deuxièmes journées maghrébines des sciences de la mer, Agadir, Maroc, pp : 32.
- Bryan G.W.**, 1976 - Heavy metal contamination in the sea. In : *Marine pollution*. R. Johnston (ed.), Acad. Press., London, pp : 186-302.
- Bryan G.W., W.J. Langston, L.G. Hummerstone**, 1980 - The use of biological indicators of heavy metal contamination in estuaries. *J. mar. biol. Ass. U.K.*, Occ. Publ., **1** : 73 pp.
- Bouthir F.Z., A. Chafik, S. Benbrahim, S. Souabi, H. Mardhy, A. Messoudi**, 2004 - Qualité physico-chimique des eaux côtières du littoral de la Wilaya du grand Casablanca (océan Atlantique marocain) utilisant la moule *Mytilus galloprovincialis* comme indicateur de la contamination métallique. *Mar. Life*, **14** (1-2) : 59-70.
- Chafik A., M. Cheggour, A. Kaimoussi**, 1996 - Etude préliminaire de l'impact des activités de traitement et de transformation des phosphates sur le milieu marin : Cas de Jorf Lasfar. *Trav. Doc., INRH*, **94**, 18 pp.
- Chafik A., M. Cheggour, D. Cossa, S. Benbrahim, M. Siefeddine**, 2001 - Quality of moroccan atlantic coastal waters: water monitoring and mussel watching. *Aquat. living resour.*, **14** : 239-249.
- Cheggour M., W.J. Langston, A. Chafik, H. Texier, H. Idrissi, A. Boumezzough**, 1999 - Phosphate industry discharges and their impact on metal contamination and intertidal macrobenthos : Jorf Lasfar and Safi coastline (Morocco). *Toxicol. environ. Chem.*, **70** : 159-179.
- Chong K., W.X. Wang**, 2001 - Comparative studies on the biokinetics of Cd, Cr and Zn in the green mussel *Perna viridis* and the Manila clam *Ruditapes philippinarum*. *Environ. Pollut.* **115** (1) : 107-121.
- Cossa D.**, 1989 - A review of the use of *Mytilus* spp. as quantitative indicators of cadmium and mercury contamination in coastal waters. *Oceanol. Acta.*, **12** : 417-432.
- Cossa D., J-G. Rondeau**, 1985 - Seasonal, geographical and size-induced variability in mercury content of *Mytilus edulis* in an estuarine environment: a reassessment of mercury pollution level in the estuary and Gulf of St. Lawrence. *Mar. Biol.*, **88** : 43-49.
- Cossa D., P. Lassus**, 1989 - *Le cadmium en milieu marin ; Biogéochimie et écotoxicologie*. Rapp. Scient. Tech., IFREMER, **16**, 110 pp.
- Davies I.M., J.M. Pirie**, 1980 - Evaluation of a 'Mussel watch' Project for heavy metals in scottish coastal waters. *Mar. Biol.*, **57** : 87-93.
- Gill G.A., W.F. Fitzgerald**, 1985 - Mercury sampling of open ocean waters at picomolar level. *Deep Sea Res.*, **32** : 287-297.
- Henry M., D. Carles**, 1985 - Sensitivity to pollutants of the secretory cells in the digestive gland of the marine bivalves. In : *IIIrd Int. Symp. on responses of marine organisms to pollutants*. J.S. French, J.M. Kennish (eds), Plymouth pp : 12-16.
- Id Halla M.**, 1996 - Etude biologique des moules *Perna perna* L. (1758) et *Mytilus galloprovincialis* Lmk. (1819) dans la baie d'Agadir. *Haliotis*, **29** : 27-41.
- Irukayama K.**, 1967 - The pollution of Minamata Bay and Minamata disease. In : *Proc. Third int. Conf.*, J. Maroto, F. Josa (eds). Water Pollut. Res., vol. 3, Washington, D. C. pp : 153-180.
- Kaimoussi A., A. Chafik, M. Cheggour, A. Mouzdahir, S. Bakkas**, 2000 - Variations saisonnières des concentrations en métaux (Cd, Cu, Zn, Fe et Mn) chez la moule *mytilus galloprovincialis* du littoral de la région d'El Jadida (Maroc). *Mar. Life*, **10** (1-2) : 77-85.
- Kaimoussi A., A. Chafik, A. Mouzdahir, S. Bakkas**, 2001 - The impact of industrial pollution on the Jorf Lasfar coastal zone (Morocco atlantic ocean) : the mussel as an indicator of metal contamination. *C. r. Acad. Sci., Paris, Ser. Ila*, **333** : 337-341.
- Kavun V.Y., V.M. Shulkin, N.K. Khristoforova**, 2002 - Metal accumulation in mussels of the Kuril Islands, north-west Pacific Ocean. *Mar. environ. Res.*, **53** : 219-260.
- Laurier F.**, 2001 - *Cycle du mercure en estuaire, Baie de Seine et pays de Caux : Spéciation chimique et biodisponibilité*. Thèse doctorat ès sciences, univ. Paris 7, 177 pp.
- Langston W.J., S.K. Spence**, 1995 - Biological factors involved in metal concentration observed in aquatic organisms. In : *Metal speciation and bioavailability in aquatic systems*. W.J. Langston, S.K. Spence, A. Tessier, D.R. Turner (eds), IUPAC, J. Wiley and Sons Ltd, pp : 407-478.
- Lawson N.M., R.P. Mason**, 1998 - Accumulation of mercury in estuarine food chains. *Biogeochemistry*, **40** : 235-247.

- Makaoui A., A. Orbi, K. Hilmi, S. Zizah, J. Larissi, M. Talbi**, 2005 – L'upwelling de la côte atlantique du Maroc entre 1994 et 1998. *C. r. Geoscience*, **337** : 1518-1524.
- Mart L., H.W. Nurenberg**, 1986 – The distribution of cadmium in the sea. *Experientia*, **50** suppl. : 28-40.
- Nielsen S.A., A. Nathan**, 1975 - Heavy metal levels in New Zeland molluscs. *N.Z. Jl mar. Freshwat. Res.*, **9** : 467-481.
- Orbi A., K. Hilmi, J. Larissi, H. Zidane, S. Zizah, N. El Moussaoui, J.I. Lakhdar, F. Sarf**, 1998 - Hydrologie et hydrodynamique des côtes marocaines : Milieux paraliques et zones côtières. Royaume du Maroc, Commissariat général, Exp. 98, Lisbonne, pp : 13-25.
- R.N.O.**, 1995 - Les contaminants dans la matière vivante. In : *Rapport R.N.O. de la surveillance du milieu marin*, IFREMER, pp : 9-24.
- Rainbow P.S., W. Fialkowski, A. Sokolowski, B.D. Smith, M. Wolowicz**, 2004 - Geographical and seasonal variation of trace metal bioavailabilities in the Gulf of Gdansk, Baltic Sea using mussels (*Mytilus trossulus*) and barnacles (*Balanus improvisus*) as biomonitors. *Mar. Biol.*, **144** : 271-286.
- Sanjuan J., D. Cossa**, 1993 - Dosage automatique du mercure total dans les organismes marins par fluorescence atomique. Rapp. IFREMER, R.INT.DEL/93.12/ Nantes.
- Strohal P., M. Dzajo**, 1971- Concentration of mercury in the North Adriatic Biota. *Thalassia Jugosl.*, **7** : 591-596.
- Tsuchiya K.**, 1978 – *Cadmium studies in Japan. A review.* Elsevier Amsterdam, 238 pp.
- Won J.H.**, 1973 - The concentration of mercury, cadmium, lead and copper in fish and shellfish of Korea. *Bull.Korean Fish. Soc.*, **6** : 1-19.
- Wong W.H., Cheung S.G.**, 2001 - Feeding rhythms of the green-lipped mussel, *Perna viridis* (Linnaeus, 1758) (Bivalvia : Mytilidae) during spring and neap tidal cycles. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, **257** (1) : 13-36.