

Caractérisation hydrochimique d'un site Ramsar : le complexe zones humides de Mohammedia (Maroc)

Amal SERGHINI¹, Mohammed FEKHAOU¹, Abdellah EL ABIDI²
Souad EL BLIDI¹ & Rachid BEN AKKAME²

1. Université Mohammed V-Agdal, Institut Scientifique, Département de Zoologie et Ecologie animale, B.P. 703 Agdal, Rabat.
e-mail : serghini_amal@hotmail.com ; serghini@israbat.ac.ma

2. Institut National d'Hygiène, Laboratoire d'hydrobiologie-hygiène industrielle et environnementale, Av. Ibn Battouta Agdal, Rabat.

Résumé. Le déterminisme hydrochimique d'un site Ramsar, le complexe zones humides de Mohammedia (CZHM), a été effectué par le suivi et l'analyse spatiotemporels d'un certain nombre de traceurs physiques et chimiques (température, pH, salinité, conductivité, oxygène dissous, demande biologique en oxygène, nitrates, sulfates et phosphore total) des eaux superficielles pendant les années 2000-2002. Il a permis, d'une part, de dégager une zonation qui fait apparaître 3 pôles d'influences : le secteur I proche de l'embouchure et soumis à des influences conjuguées marines et continentales ; le secteur II, à caractère temporaire, soumis principalement aux aléas climatiques (précipitations, crues,...) et également aux influences anthropiques (eaux usées), le secteur III situé loin des influences marines mais sous l'emprise des eaux souterraines et anthropiques, et d'autre part, de montrer que les relevés des différents traceurs témoignent d'une pollution organique d'origine anthropique, ce qui illustre bien à quel point l'écosystème se défend par l'autoépuration pour lutter contre l'eutrophisation d'autant plus que nous avons enregistré des concentrations très fortes en phosphore total.

Mots clés : Maroc, Mohammedia, Zones humides, caractérisation hydrochimique, zonation.

Hydrochemical characterization of a Ramsar site: the Mohammedia wetland complex (Morocco).

Abstract. The hydrochemical determinism of a Ramsar site, the wetland complex of Mohammedia (CZHM), was performed by monitoring and spatial-temporal analysis of several physical and chemical tracers (temperature, pH, salinity, conductivity, dissolved oxygen, biological oxygen demand, nitrates, sulfates and total phosphorus) of surface waters during the years 2000-2002. On the one hand, the study allowed us to distinguish three zones: sector I, which is close to the outfall and subjected to combined marine and continental influences; sector II, which is temporary, subjected to both climatic (rainfall, floods, ...) and anthropogenic influences (sewage); sector III, located away from the marine influence, but under the influence of groundwater and anthropogenic water. On the other hand, the different tracers found constitute a proof of an organic pollution from an anthropogenic origin, which clearly illustrates how the ecosystem defends itself by auto-purification against eutrophication, especially very high concentrations of total phosphorus were recorded.

Key words: Morocco, Mohammedia, Wetlands, Hydrochemical characterization, zoning.

INTRODUCTION

Le Maroc possède un ensemble de zones humides littorales qui, grâce à leur position géographique et leurs caractéristiques biotiques et abiotiques, présentent un intérêt à la fois biologique, écologique, économique et paysager.

Dans le cadre de l'identification et la valorisation de certaines zones humides, le complexe zones humides de Mohammedia (CZHM), classé site Ramsar depuis juillet 2005 (El Hamoumi & Qninba 2008) est apparu comme un site présentant un intérêt écologique et hydrobiologique. Il montre une richesse biologique de premier ordre, 80 espèces d'oiseaux, des mammifères, des reptiles, des amphibiens et une diversité floristique intéressante, sans oublier les moustiques et les invertébrés aquatiques. Néanmoins, bien qu'il soit caractérisé par un réseau hydrique très développé, ses ressources en eau sont confrontées à des problèmes de quantité et de qualité. Elles sont limitées en raison du climat semi-aride de la région et subissent une détérioration de leur qualité par les intenses activités urbaines, industrielles, artisanales et agricoles que connaît cette zone (Serghini *et al.* 2003, Serghini 2003).

Le présent travail, réalisé en collaboration entre l'Equipe « Pollution, Ecotoxicologie et Risques Sanitaires » de l'Institut Scientifique et le Laboratoire d'hydrobiologie-hygiène industrielle et environnementale de l'Institut

National d'Hygiène, avait pour objectif d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux superficielles du CZHM en relation avec les effets des rejets polluants domestiques et industriels sur les eaux de ce complexe.

MATERIEL ET METHODES

Site d'étude

Le CZHM est situé à l'embouchure de l'oued El Maleh, au sein de la ville de Mohammedia (33°33'N ; 7°23'W), ville du littoral atlantique marocain à 65 km au sud de Rabat et à 20 km au nord de Casablanca. La particularité de cette zone est qu'elle est située dans une partie du milieu urbain. Elle protège ainsi la ville des inondations et alimente la nappe phréatique.

Il contient des eaux stagnantes ou "dayas" qui recouvrent la partie nord de la ville. Elles sont alimentées par les pluies qui s'accumulent dans les dépressions ou cuvettes de différentes profondeurs, formant des mares temporaires qui abritent des gîtes à moustiques. Les plus grandes ne dépassent pas quelques dizaines de mètres de diamètre et leur profondeur excède rarement le mètre. En plus, la présence d'une glaisière dans la plaine côtière, permet la formation de plusieurs fosses, plus ou moins



Figure 1. Situation géographique et localisation des différentes stations d'étude dans le complexe zones humides de Mohammedia.

grandes, qui sont submergées par les eaux provenant de la nappe sous-jacente peu profonde, développant ainsi des dayas ou mares permanentes (S.G.M 1975).

Choix des stations

Neuf stations d'échantillonnage largement réparties sur le complexe ont été choisies de telle sorte qu'elles soient représentatives, accessibles, témoins des caractéristiques réelles de ces eaux au niveau des différents sites prospectés et permettant de cerner l'ensemble des processus physiques et chimiques définissant le fonctionnement de cet écosystème (Fig. 1). Ainsi, deux types de stations ont été définis :

- les stations ZH1, ZH2, F, ZH3, ZH4 et ZH5, correspondant aux zones humides temporaires qui s'assèchent pendant la saison estivale ; les stations ZH1, ZH2 sont situées en aval de l'oued El Maleh, au niveau de la plaine ouljiennne ; la station F est une fosse localisée sur le bord de l'oued ; les stations ZH3, ZH4 et ZH5 sont situées du côté des sites industriels ;
- les stations ZH6, ZH7 et ZH8, correspondant à des zones humides permanentes, alimentées par des eaux de pluie, des eaux usées et par la nappe phréatique.

Echantillonnage

Les échantillons d'eau de surface ont été prélevés mensuellement au niveau de chaque station, depuis le mois de janvier 2000 jusqu'au mois d'août 2002, soit 33 campagnes. Chaque campagne durait une journée. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide de flacons en polyéthylène de 250 ml, préalablement lavés à l'eau distillée et transportés dans des glacières portatives (+4 °C). Il n'y a pas eu de prélèvements en période sèche dans le cas des stations correspondant aux zones humides temporaires (ZH1, ZH2, F, ZH3, ZH4 et ZH5).

Analyse physico-chimique de l'eau

Le déterminisme hydrochimique des eaux du CZHM et leur évolution spatio-temporelle ont été réalisés par le suivi et l'analyse de 9 paramètres physiques et chimiques de l'eau au niveau des 9 stations. Cinq de ces variables ont été mesurés sur le terrain : la température, le pH, la salinité, la conductivité et l'oxygène dissous. La demande biologique en oxygène, les nitrates, les sulfates et le phosphore total ont été mesurés au laboratoire d'hydrobiologie de l'Institut Scientifique. Les techniques d'analyse figurent dans le tableau I.

Tableau I. Méthodes d'analyse des différents paramètres physico-chimiques.

Paramètres	Méthodes d'analyse	Unités	Sources
Température	Thermomètre à mercure, précision à 1/10	°C	
pH	pHmètre ORION Research, Ionalyser modèle 607 avec électrode spécifique O ₂ electrode ORION Research modèle 91-05		
Salinité	Salinomètre YSI (modèle 33); S.C.T meter	g/l	
Conductivité	Conductimètre, YSI (modèle 33); S-C-T meter	µS/cm	
Oxygène dissous	Oxymètre, ORION Research, Ionalyser modèle 607, avec électrode spécifique O ₂ electrode ORION Research modèle 91-05	mg/l O ₂	
D.B.O ₅	Méthode par dilution		Norme AFNOR T 90-103
Nitrates	Transformation des nitrates en dérivé nitro-phénol-sulfurique coloré, puis dosage par spectrophotométrie de ce dérivé	mg/l NO ₃ ⁻	Norme AFNOR NF 90-012
Sulfates	Méthode néphélométrique; les sulfates sont précipités en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum. Le précipité obtenu est stabilisé par le "tween20". Les suspensions homogènes sont mesurées au spectrophotomètre	mg/l de SO ₄ ⁻	Rodier (1996)
Phosphore total	Les fractions du phosphore inorganique sont minéralisées sous forme d'orthophosphates. La minéralisation se fait en milieu acide en présence de persulfate de potassium (K ₂ ZH ₂ O ₈) à 120 °C pendant 2 h. Après neutralisation du pH et ajustement à un volume donné, on procède au dosage du phosphore minéralisé comme pour les orthophosphates.	mg/l de Pt	Rodier (1996)

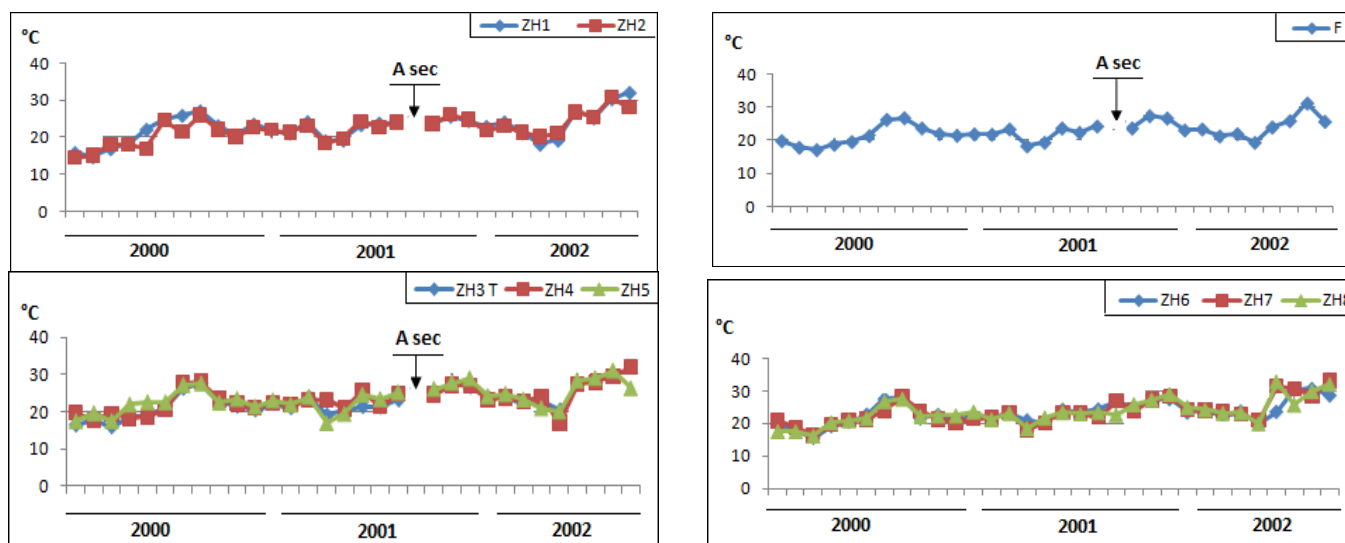


Figure 2. Evolution saisonnière de la température de l'air dans le complexe de zones humides de Mohammedia de janvier 2000 à août 2002.

RESULTATS ET DISCUSSION

Evaluation spatio-temporelle de la qualité des eaux superficielles

Chaque paramètre est représenté par les profils de son évolution spatio-temporelle et ceux de l'évolution de leurs valeurs moyennes (Figs 2 à 21). Ces profils permettent d'effectuer une approche globale et spatiale de la qualité des eaux superficielles de ce complexe.

Température de l'air

L'analyse de l'évolution saisonnière de la température de l'air dans les différentes zones du CZHM pendant la période d'étude (Fig. 2), montre que la moyenne des

températures mensuelles est comprise entre $17 \pm 1,2$ °C (mars 2000) et $27,5 \pm 0,7$ °C (août 2000) (Fig. 3). Les écarts thermiques extrêmes ont été enregistrés en mars 2000 (14,5 °C) et en août 2002 (33,2 °C).

En général, la proximité de l'océan Atlantique confère au complexe un climat tempéré et humide avec un hiver doux et un été rafraîchi.

Les températures moyennes enregistrées pendant les années 2001 et 2002 sont supérieures à celles relevées en 2000 (Fig. 3). La moyenne des températures notées au cours de l'année 2000 est de $21,3 \pm 0,6$ °C, contre $23,4 \pm 0,5$ et $25,1 \pm 0,4$ °C respectivement pour les années 2001 et 2002. Les températures pendant 2001 et 2002 sont plus proches.

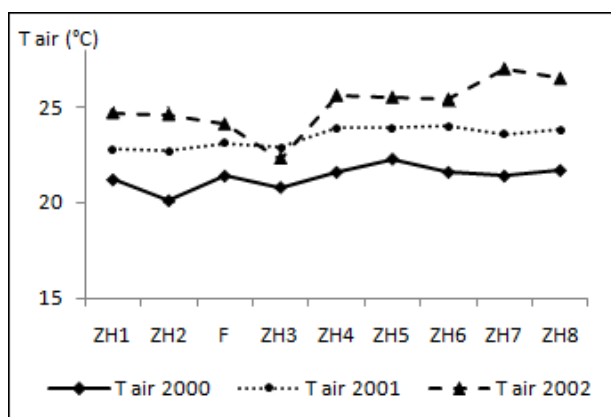


Figure 3. Evolution spatio-temporelle des valeurs moyennes de la température de l'air dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

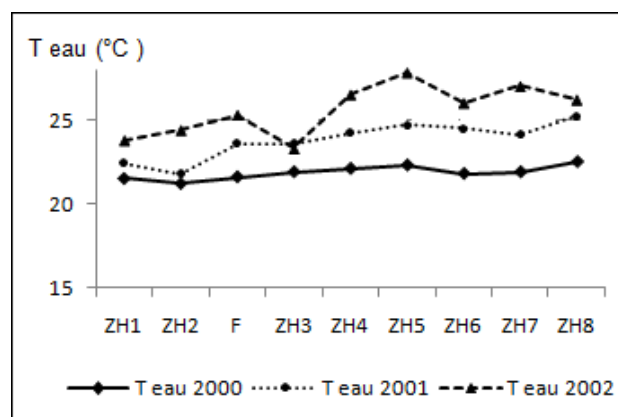


Figure 4. Evolution spatio-temporelle des valeurs moyennes de la température de l'eau dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

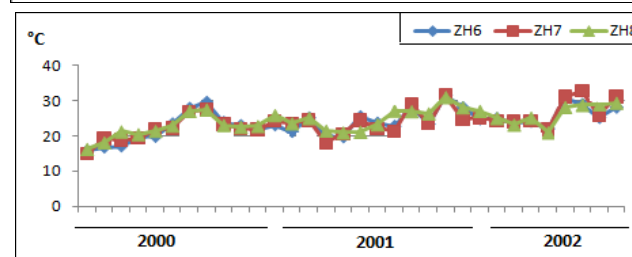
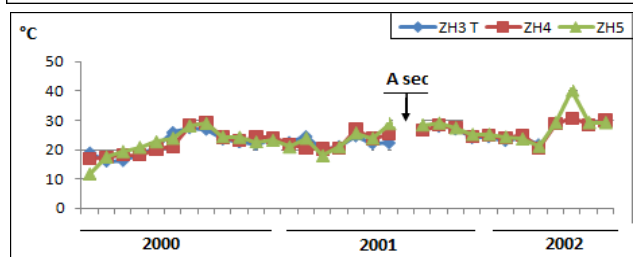
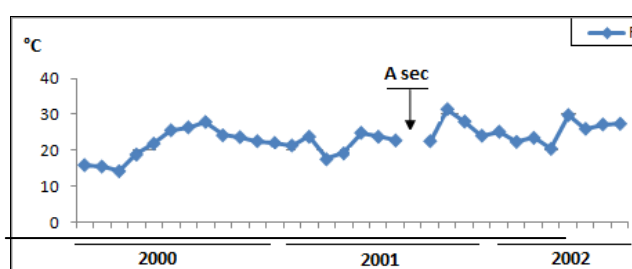
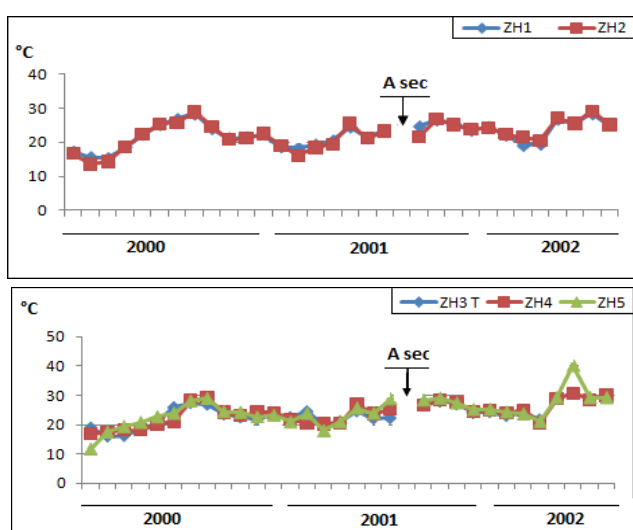


Figure 5. Evolution saisonnière de la température de l'eau dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

Pour une même année, les stations ZH1, ZH2, F et ZH3, situées en aval, ont enregistré des températures moyennes relativement plus basses par rapport aux autres stations. Par exemple, en 2002, nous avons noté une température moyenne de $24,6 \pm 3,8$ °C à ZH2, et $27,0 \pm 4,6$ °C à ZH7. L'emplacement des zones d'étude du complexe par rapport aux influences océaniques serait à l'origine de cette différence de température enregistrée dans les stations.

Température de l'eau

L'analyse des moyennes des températures annuelles de l'eau dans les différentes zones du CZHM, montre qu'au même titre que les températures moyennes de l'air, l'année 2000 a enregistré les températures les plus basses par rapport aux autres années d'étude (Fig. 4), particulièrement pendant la période janvier-février-mars (Fig. 5). La température moyenne annuelle pour l'année 2000 a été de $21,9 \pm 0,4$ °C, celles des années 2001, 2002 sont respectivement de $23,8 \pm 1,1$ et de $25,6 \pm 1,5$ °C. La température la plus faible de 13,6 °C a été enregistrée pendant le mois de février 2000 et la température maximale de 32,8 °C a été relevée au mois de juin 2002 (Fig. 5).

Les résultats obtenus montrent aussi que les stations ZH1, ZH2, F et ZH3, situées en aval, ont enregistré les températures les plus faibles par rapport aux autres stations du complexe, particulièrement pendant les années 2001 et 2002 où l'écart entre les zones a atteint environ 3°C en moyenne.

Cependant, la variation spatio-temporelle des températures moyennes oscille entre $23,3 \pm 1,8$ °C enregistrées au niveau de ZH2 et $25,9 \pm 3,1$ °C relevées à ZH5. On note alors une différence de température entre l'aval et l'amont peu significative, qui pourrait être insuffisante pour modifier radicalement la nature des processus chimiques et biologiques entre les différentes zones humides. Aussi, la température ne subit pas de grands changements sous la surface de l'eau. Ainsi, plusieurs facteurs jouent un rôle important dans le déterminisme thermique de ce complexe (morphologie, hydrologie, température ambiante, couvert végétal, etc...).

En l'absence de précipitations, et durant la période sèche, les stations ZH6, ZH7 et ZH8 sont restés humides (zones humides permanentes) grâce à une alimentation souterraine à partir de la nappe.

pH

Le suivi et l'analyse de ce paramètre au cours des trois années d'étude montrent que les eaux du CZHM sont faiblement acides à légèrement alcalines (Fig. 6), avec des moyennes annuelles de $6,7 \pm 0,6$; $7,3 \pm 0,5$ et $7,3 \pm 0,3$ °C respectivement en 2000, 2001 et 2002. Dans l'ensemble du complexe, les zones humides présentent un pH moyen ($< 7,8 \pm 0,2$) favorable à la vie des principales espèces aquatiques animales et végétales.

L'acidité des eaux enregistrée pendant l'année 2000 est certainement liée à l'action des pluies dont les valeurs des précipitations relevées étaient nettement supérieures à celles des années 2001 et 2002 (M.E.M. 2002). Nous avons noté un pH de 5,5 pendant le mois de décembre 2000 qui a enregistré les précipitations les plus élevées de l'année (194 mm) (M.E.M 2002).

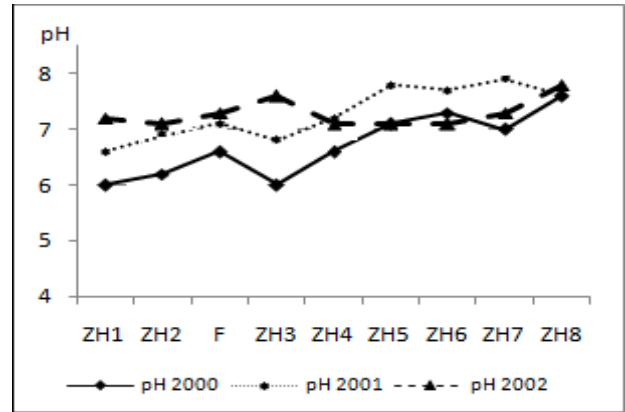


Figure 6. Evolution spatio-temporelle des valeurs moyennes du pH de l'eau dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

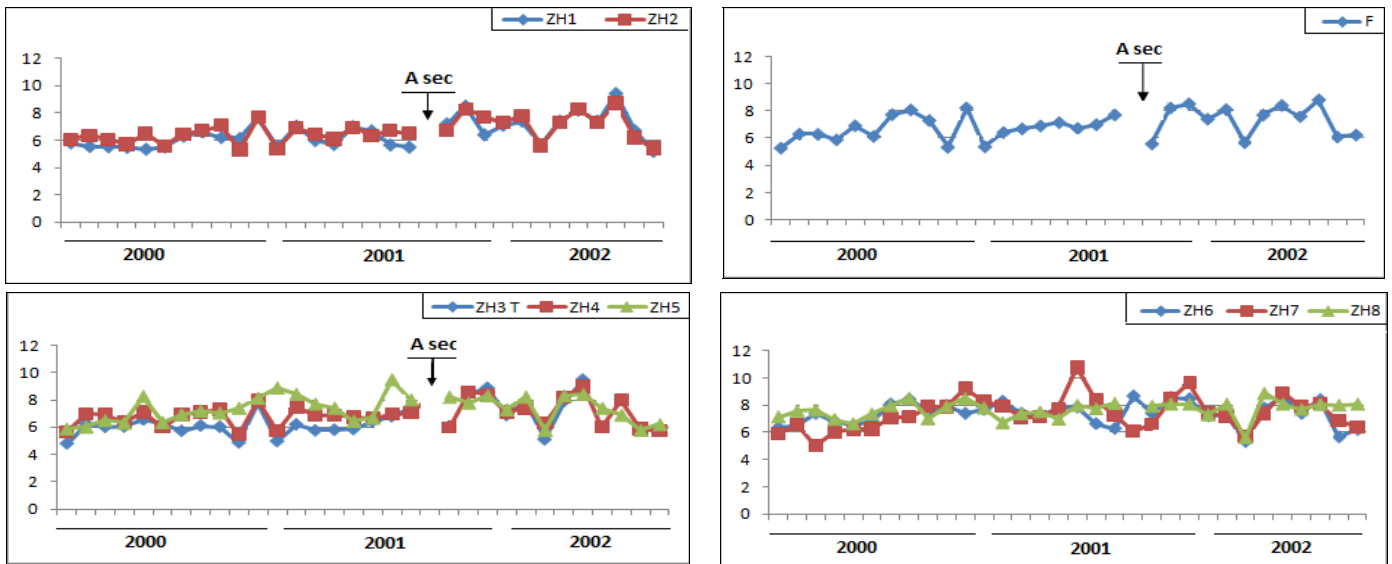


Figure 7. Evolution saisonnière du pH de l'eau dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

D'après Giller (2002), le pH des eaux de pluie est normalement de 5,64, valeur due à la dissolution du dioxyde de carbone dans les gouttes d'eau.

Le suivi et l'analyse de ce paramètre au niveau des 9 sites d'étude montrent une alcalinisation progressive des eaux vers l'amont du complexe. Les valeurs moyennes des différentes stations pour les années d'étude oscillent entre $6,8 \pm 0,7$ au niveau de ZH1 située en aval, et $7,8 \pm 0,2$ au niveau de ZH8 située en amont. Un minimum de 5,5 a été relevé dans ZH1 pendant le mois de mars 2000, et le maximum a été enregistré dans la station ZH7 avec un pH de 9,6 pendant le mois de novembre 2001 (Fig. 7).

La légère alcalinité des eaux peut être due au fait que ce complexe est situé sur un substrat contenant carbonate et bicarbonates, comme ceci a été démontré par l'étude géochimique réalisée au niveau de ce complexe (Serghini 2003) et par conséquent ses eaux constituent un système tampon favorable à la vie de la faune et la flore.

De même, les différences importantes dans les valeurs de pH selon les stations d'étude seraient dues aux émissions de gaz d'origine industrielle ou urbaine.

Le pH de l'eau reflète également l'activité biologique du milieu. Une alcalinisation du milieu peut être causée par une hausse de l'activité photosynthétique dans le complexe. Les organismes puisent les ions H_3O^+ lors de la photosynthèse, ainsi que du carbone et de l'eau, en présence de lumière pour fabriquer de la matière organique (Westlake & Ladle 1995). A l'opposé, une dégradation de la matière organique ou une forte activité respiratoire peuvent entraîner une acidification de l'eau.

Les eaux de surface du CZHM, très faiblement acides à alcalines, abritent un très grand nombre d'espèces végétales et animales et sont également des sources trophiques pour de nombreuses espèces, notamment les oiseaux (Rihane & Aouinty 2006, El Hamoumi & Qninba 2008).

Salinité

D'après l'analyse spatio-temporelle de la salinité au niveau des différentes stations du CZHM, une variabilité interannuelle de la salinité est marquée (Fig. 8) :

- la salinité a été moins importante durant l'année 2000 avec une valeur moyenne de $15,0 \pm 5,2$ g/l ;
- le taux de salure et la variabilité saisonnière ont été importants notamment durant les années 2001, 2002 pendant lesquelles les conditions climatiques étaient plus sévères (fortes températures et faibles précipitations) (M.E.M 2002) ; les valeurs moyennes sont de $43,2 \pm 26,9$ et $33,9 \pm 19,3$ g/l pendant 2001 et 2002 respectivement.

Cependant, on relève des caractéristiques et des processus d'évolution similaires pendant les trois années

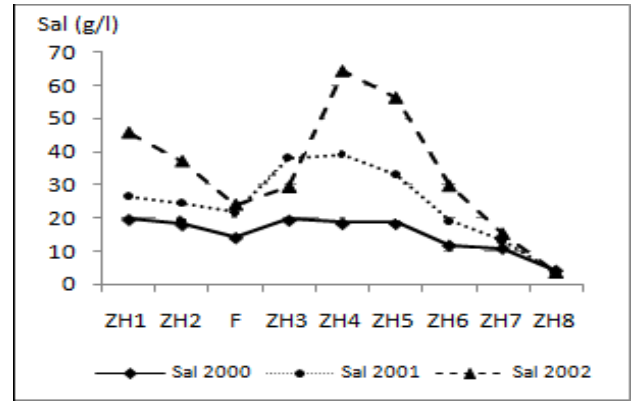


Figure 8. Evolution spatio-temporelle des valeurs moyennes de la salinité de l'eau dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

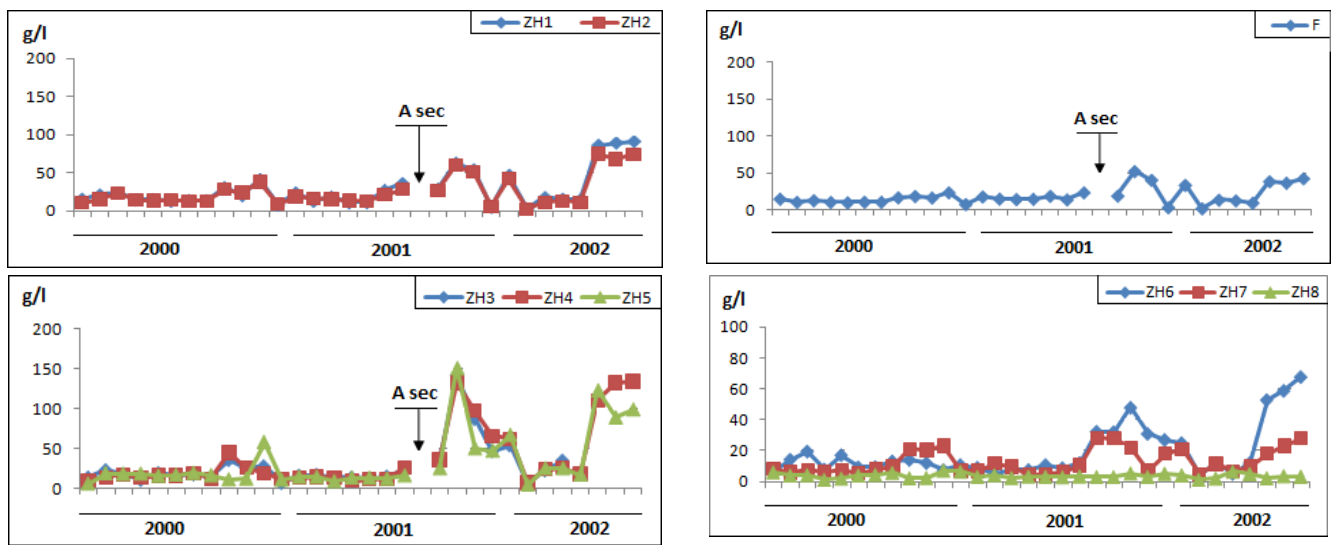


Figure 9. Evolution saisonnière de la salinité de l'eau dans le complexe zones humides de Mohammedia de janvier 2000 à août 2002

d'étude. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées pendant la période sèche (juin-juillet-août) de chaque année et les valeurs les plus faibles pendant la période pluvieuse (janvier-février-mars) (Fig. 9). En effet, pendant l'année 2002 dans la station ZH4, des valeurs de l'ordre de 110, 132 et 134 g/l ont été observées durant l'été (respectivement juin, juillet et août), et des valeurs de l'ordre de 62 ; 7,2 et 24 g/l ont été notées durant l'hiver (respectivement janvier, février et mars) de cette année.

Ainsi, durant la saison pluvieuse a lieu un phénomène de dilution par les apports pluviométriques ; par contre, il y a une concentration importante des sels durant la saison sèche à cause des fortes évaporations des plans d'eau.

De l'aval vers l'amont du complexe, les concentrations moyennes de la salinité pendant la période d'étude, passent de valeurs moyennes au niveau des stations ZH1, ZH2 et F (respectivement de $34,4 \pm 13,4$; $30,4 \pm 10,7$ et $22,4 \pm 7,7$ g/l) vers des valeurs maximales au niveau des stations ZH4 et ZH5 (respectivement de $42,0 \pm 30,9$ et $55,1 \pm 33,1$ g/l) pour rechuter vers des valeurs faibles au niveau des stations ZH6, ZH7 et ZH8 (respectivement de $25,3 \pm 12,0$; $15,0 \pm 4,0$ et $4,0 \pm 0,4$ g/l).

Les valeurs moyennes des zones moyennement et fortement chargées connaissent des fluctuations importantes entre la période sèche et la période pluvieuse, et d'une année à l'autre. Par contre, les stations faiblement chargées (ZH6, ZH7 et ZH8) montrent généralement des variations plus stables au cours des années d'étude. Ceci s'explique par l'éloignement de ces dernières des influences marines (marée et intrusions salines) et par l'impact des eaux souterraines qui affleurent à leur niveau permettant ainsi de maintenir continuellement un degré de salinité stable.

Conductivité électrique

D'après l'analyse des résultats de l'évolution de la conductivité électrique dans le CZHM, apparaissent des variations spatio-temporelles de ce facteur similaires à celles de la salinité (Figs 10 et 11). On peut éventuellement déduire qu'au niveau de chaque station la conductivité suit d'une façon similaire les mêmes fluctuations que la salinité. Ses valeurs sont moyennes au niveau des stations ZH1, ZH2 et F (respectivement $38,2 \pm 12,9$; $33,7 \pm 7,9$ et $24,8 \pm 3,3$ $\mu\text{S/cm}$), maximales au niveau de ZH3, ZH4 et ZH5 (respectivement $49,2 \pm 38,9$; $67,4 \pm 33,8$ et $54,7 \pm 25,3$ $\mu\text{S/cm}$),

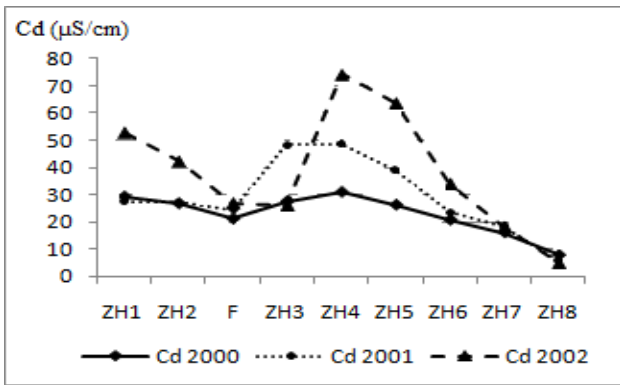


Figure 10. Evolution spatio-temporelle des valeurs moyennes de la conductivité électrique de l'eau dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

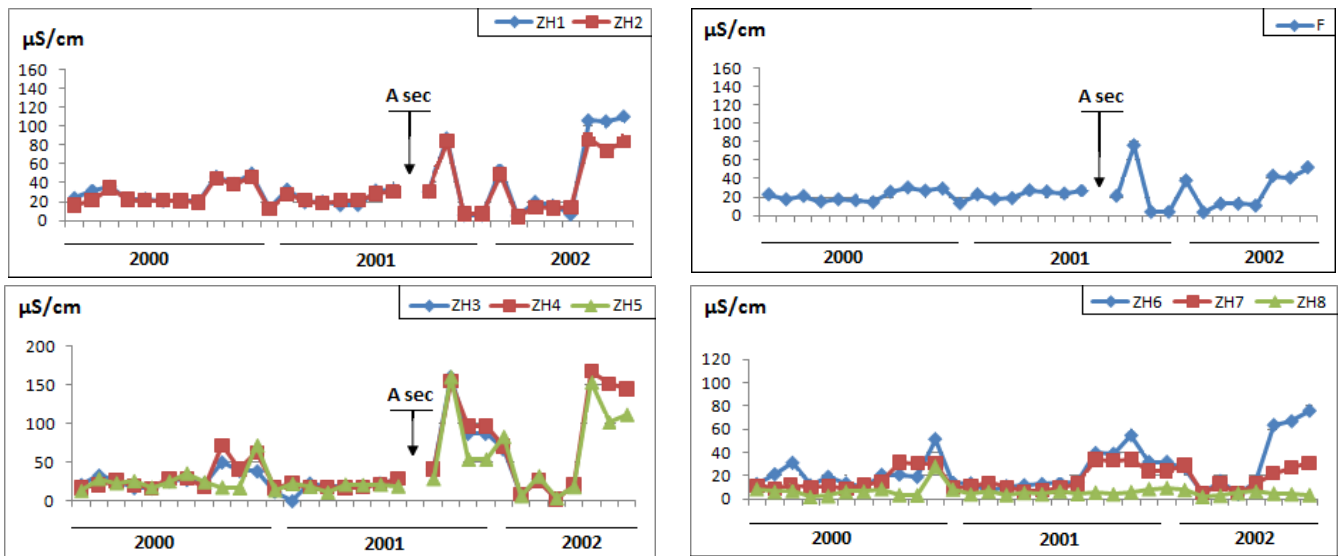


Figure 11. Evolution saisonnière de la conductivité de l'eau dans le complexe zones humides de Mohammedia de janvier 2000 à août 2002.

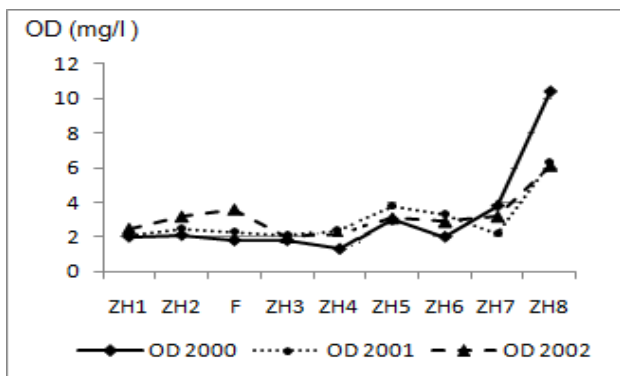


Figure 12. Evolution des valeurs moyennes de l'oxygène dissous de l'eau dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

Oxygène dissous

L'analyse du profil de l'oxygène dissous au niveau des différents sites d'étude fait apparaître que l'évolution temporelle de ce paramètre est très variable d'une station à l'autre. La valeur moyenne au sein des différentes stations oscille entre $1,5 \pm 0,8$ mg/l au niveau de ZH3 et $7,1 \pm 2,9$ mg/l au niveau de ZH8 (Fig. 12). On note un maximum de 16,4 mg/l dans ZH8 pendant le mois de juin 2000 et un

puis faibles au niveau de ZH6, ZH7 et ZH8 (respectivement $31,4 \pm 9,7$; $21,0 \pm 6,9$; et $6,6 \pm 1,6$ µS/cm).

Les valeurs faibles enregistrées dans les zones ZH6, ZH7 et ZH8 seraient liées à la nature du substrat acide ou au sous-sol siliceux comme ceci a été démontré par l'étude géochimique réalisée au niveau de ce complexe (Serghini 2003). Se rajoute à cela leur éloignement des influences marines et la dilution par les eaux souterraines.

Au niveau des zones ZH1, ZH2 et F, à conductivité moyenne, l'apport des eaux marines et la nature du sol riche en chlorures et en sulfates sont la cause probable de l'importante minéralisation.

minimum de 0,18 mg/l dans ZH2 pendant le mois de février 2001 (Fig. 13).

Les variations spatio-temporelles permettent de distinguer trois groupes de stations, avec une évolution similaire à l'intérieur de chaque groupe : le groupe I avec les stations ZH1, ZH2 et F ; le groupe II avec les stations ZH3, ZH4 et ZH5 et le groupe III avec les stations ZH6, ZH7 et ZH8.

Dans le groupe I (ZH1, ZH2 et F), situé en aval, les variations en oxygène dissous sont moins accentuées, voire stables. Une large augmentation des teneurs en oxygène dissous a été notée au cours de 2002 par rapport à 2000 et 2001. Les valeurs moyennes de ces stations varient entre $2,6 \pm 0,7$ et $2,9 \pm 1$ mg/l.

Le groupe II (ZH3, ZH4 et ZH5) s'est caractérisé par des variations plus accentuées durant les années d'étude. On enregistre plusieurs pics au cours d'une année et d'une année à l'autre. Le maximum est de 12,1 mg/l noté dans ZH5 pendant le mois de novembre 2000 et le minimum est de 0,2 mg/l marqué au niveau de la même station pendant les mois de juin, août, septembre et octobre 2000. Les valeurs moyennes dans ces zones varient entre $1,5 \pm 0,8$ et $3,1 \pm 0,1$ mg/l.

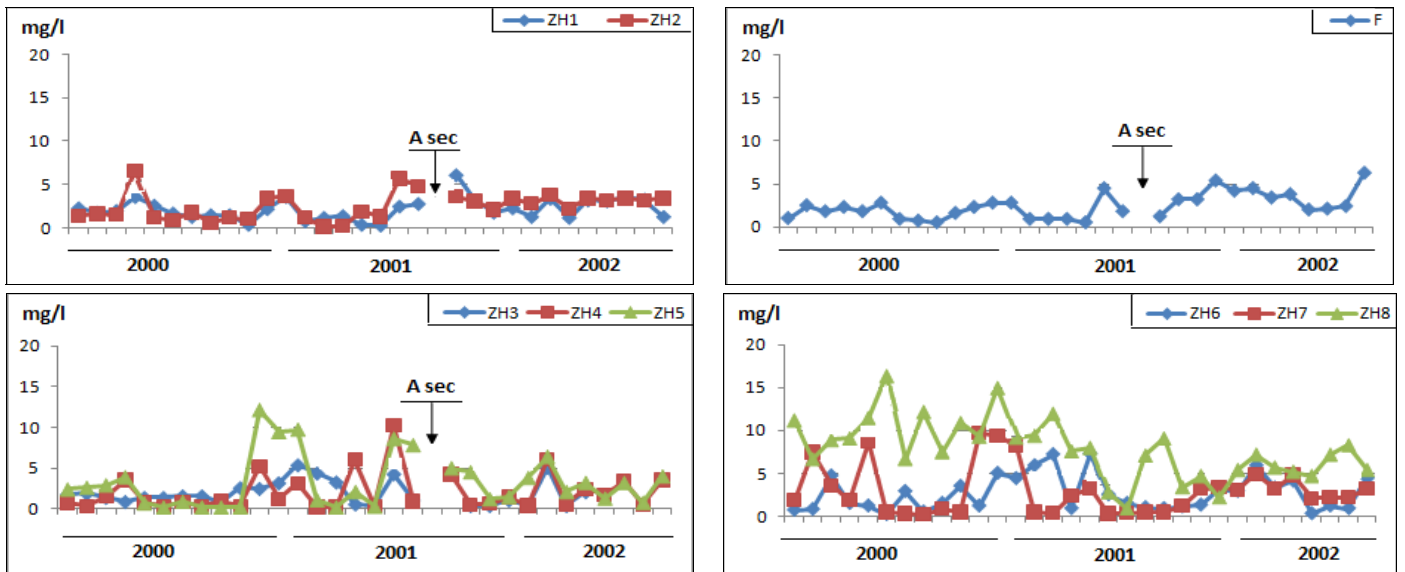


Figure 13. Evolution saisonnière de l'oxygène dissous de l'eau dans le complexe zones humides de Mohammédia de janvier 2000 à août 2002.

Le groupe III, composé des stations permanentes ZH6, ZH7 et ZH8, montre une évolution marquée par une certaine stabilité générale de la teneur en oxygène, à l'exception de la station ZH8 qui a enregistré une assez forte élévation de la quantité d'oxygène dissous. Les valeurs moyennes dans ces zones varient entre $12,2 \pm 0,7$ et $7,1 \pm 2,9$ mg/l.

La variation de l'oxygène dans ces stations serait liée à plusieurs facteurs tels que la position géographique par rapport aux apports marins et souterrains et du confinement.

Le groupe I, dont la teneur en oxygène dissous dépend de sa position géographique, est caractérisé par les influences marines en aval et les crues en amont riches en matière organique. Les apports des précipitations en saison humide caractérisent également ce groupe.

Le groupe II, le plus confiné, présente des conditions instables du fait de l'évaporation très accentuée et de l'absence d'influences externes.

Dans les milieux à faible taux de renouvellement, la teneur en oxygène dissous tend à diminuer lorsque la température s'élève, mais aussi à cause de la consommation accrue par les êtres vivants, y compris les bactéries, qui se multiplient. La transformation des nitrates en nitrites et des sulfates en sulfures peut être ainsi favorisée (Pourriot & Meybeck 1995).

Enfin, le groupe III où les apports en eau souterraine sont importants et permanents, particulièrement pendant la période sèche, favorisent son oxygénation qui compense les quantités consommées pour l'oxydation et la dégradation de la matière organique.

La superposition de l'évolution temporelle de l'oxygène dissous avec celles de la salinité, de la température de l'eau et de l'air dans la plupart des stations étudiées, montre une évolution inverse qui témoigne de l'interdépendance de ces paramètres.

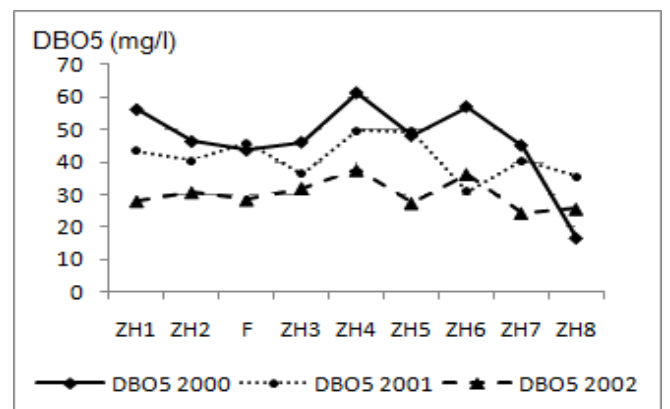


Figure 14. Evolution spatio-temporelle des valeurs moyennes de la demande biologique en oxygène dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

DBO₅

L'analyse des résultats montre que l'évolution de la demande biologique en oxygène dans le CZHM rappelle celle observée pour l'oxygène dissous mais dans le sens opposé (Fig. 14). En outre, les mêmes groupes de stations s'individualisent

On enregistre un maximum de 140 mg/l pendant le mois de janvier 2000 dans ZH6, et un minimum d'environ 4,3 mg/l au niveau de la station ZH8 pendant le mois de décembre 2000 (Fig. 15). Les valeurs moyennes varient entre $34,9 \pm 9,6$ mg/l au niveau de ZH8 et $48,9 \pm 11,9$ mg/l à ZH4. Généralement, le groupe II apparaît plus chargé en matière organique. La majorité des relevés appartenant à ce groupe dépassent 50 mg/l de DBO₅, à l'inverse des relevés des groupes I et III, dont quelques points seulement dépassent cette valeur.

En effet, les stations du groupe II sont situées dans un milieu confiné, riche en couvert végétal dense, qui abrite une faune très diversifiée (El Hamoumi & Hammada 2003).

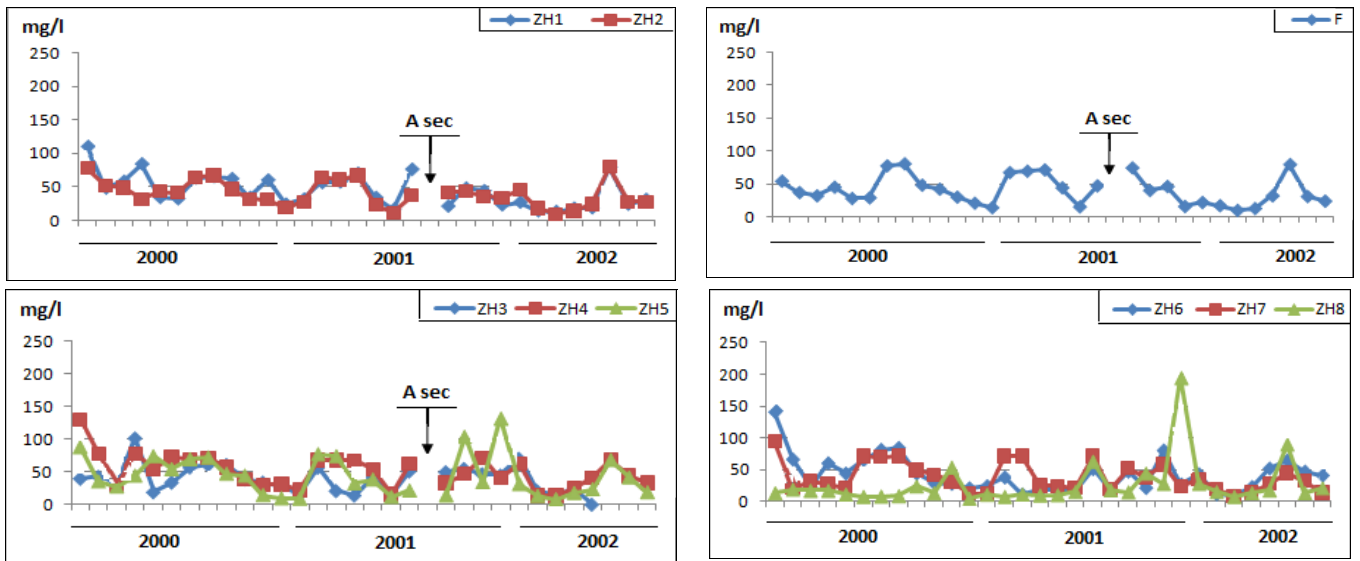


Figure 15. Evolution saisonnière de la demande biologique en oxygène de l'eau dans le complexe zones humides de Mohammedia de janvier 2000 à août 2002.

C'est la particularité qui fait de ce milieu soit très productif en matière organique.

A cette production endogène s'ajoute l'apport par moments d'une charge polluante organique en provenance des rejets industriels avoisinants. L'oxydation et la biodégradation de cette matière organique par les micro-organismes, dont l'activité s'intensifie avec le réchauffement des eaux particulièrement pendant la saison estivale, et les besoins physiologiques en oxygène de la macrofaune et la macroflore de ce milieu humide, sont à l'origine de la chute importante en oxygène et la présence d'éléments nutritifs issus de cette dégradation.

Nitrates

Concernant les nitrates, aucune distribution géographique n'est observée. Les teneurs moyennes sont comprises entre $3,4 \pm 0,6$ et $6,7 \pm 1,2$ mg/l sauf pour ZH8 dont la concentration est forte avec $8 \pm 3,3$ mg/l (Fig. 16). Globalement, les teneurs sont moyennes, avec un léger enrichissement en nitrates dans ZH8 dont la valeur maximale peut atteindre 14 mg/l. Cette élévation témoigne d'une auto-épuration plus active facilitée par une bonne oxygénation et un apport en eau supplémentaire par la nappe. Cependant, les valeurs relevées restent inférieures à la valeur maximale admissible dans les eaux de surface (Beau 1998).

Le suivi de la concentration en nitrates au cours de la période d'étude montre que ce paramètre est très variable aussi bien d'une année à l'autre qu'au cours de la même saison.

Les plus faibles valeurs ont été relevées au cours de 2000 avec une moyenne annuelle de $3,8 \pm 1,7$ mg/l, par rapport à celles obtenues en 2001, 2002, qui sont de $4,5 \pm 1$ et $4,6 \pm 1,1$ mg/l respectivement. Ces faibles teneurs seraient liées aux importantes précipitations avec 397 mm enregistrées pendant l'année 2000 contre 287 et 153 mm notées respectivement pendant les années 2001 et 2002 (M.M.E. 2002).

En saison sèche (Fig. 17) nous avons noté une diminution très nette des teneurs en NO_3^- dans la plupart des stations, avec par exemple 8,1 et 0,25 mg/l notées respectivement en janvier et août 2001 dans la station ZH6. Elle pourrait être due au fait que pour lutter contre l'eutrophisation et l'anaérobiose en plus de l'assimilation végétale, le milieu utilise les nitrates comme source d'oxygène pour sa minéralisation et son auto-épuration et par conséquent son équilibre écologique.

Selon Burt & Pinay (2005), les zones humides bordant les cours d'eau peuvent réduire de façon significative les flux d'azote et de phosphore les traversant.

Haycock *et al.* (1993) rapportent que le cycle de l'azote dans les zones humides est caractérisé principalement par deux processus: l'absorption par les végétaux et la dénitrification. Parmi ces deux processus, seule la dénitrification permet d'éliminer définitivement les nitrates en les transformant en N_2 . L'azote prélevé par la végétation est, quant à lui, relargué lors de la minéralisation de la litière et ne constitue donc qu'un processus temporaire de rétention. Ces processus varient dans le temps et l'espace.

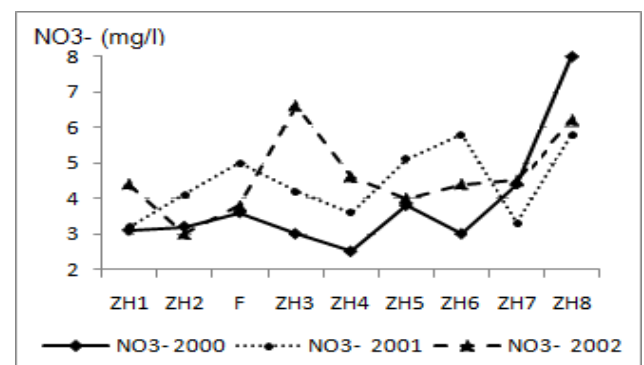


Figure 16. Evolution spatio-temporelle des valeurs moyennes des nitrates dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

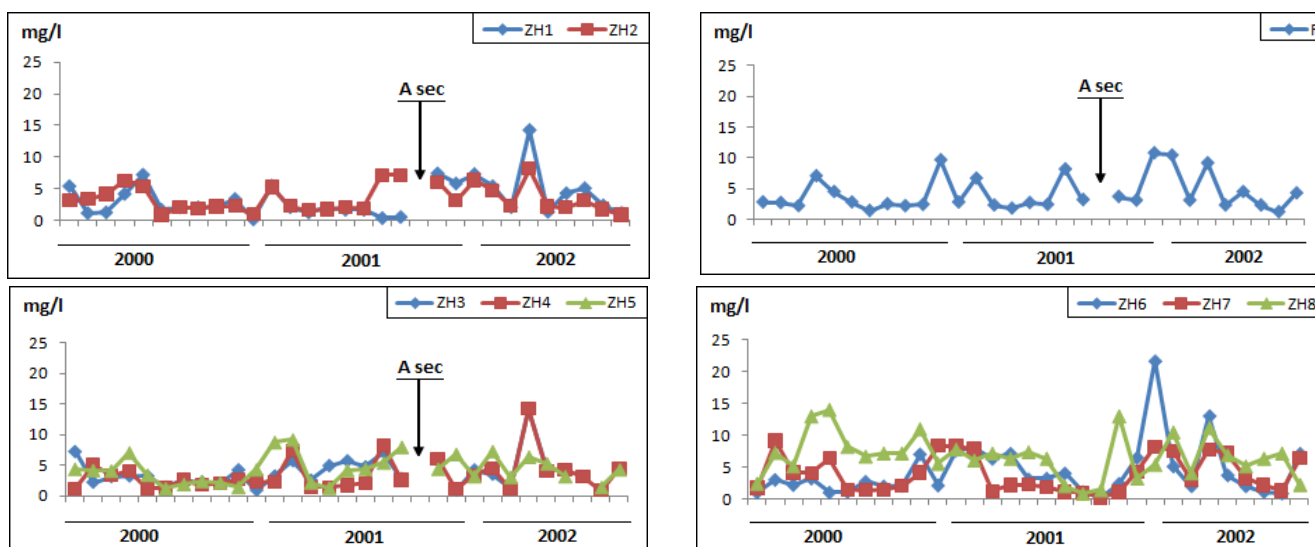


Figure 17. Evolution saisonnière des nitrates de l'eau dans le complexe zones humides de Mohammédia de janvier 2000 à août 2002

Sulfates

D'une manière générale, le suivi des sulfates au niveau du CZHM permet de relever une présence importante, voire excessive, de ces éléments dans ces zones humides. Leurs valeurs moyennes varient entre 1074 ± 517 mg/l et 5501 ± 1352 mg/l à ZH3 (Fig. 18).

Les valeurs moyennes annuelles enregistrées montrent que pendant l'année 2000, avec 2257 ± 1061 mg/l en moyenne, le complexe est resté moins chargé en sulfate qu'au cours des années 2001 et 2002, avec respectivement 3711 ± 1571 et 3684 ± 1747 mg/l, valeurs très proches.

La variation spatiale montre des différences importantes, avec l'apparition de trois groupes de stations : le groupe I (ZH1, ZH2 et F, ZH6 et ZH7), moyennement chargé en sulfates, avec des valeurs moyennes variant de 2161 ± 355 à 3025 ± 960 mg/l ; le groupe II (ZH3, ZH4 et ZH5), fortement chargé, avec des valeurs moyennes allant de 3702 ± 1043 à 5501 ± 1358 mg/l ; et le groupe III, avec ZH8, à faible teneur en sulfates, de 1074 ± 517 mg/l.

Les fortes teneurs en sulfates relevées au niveau des zones du groupe II pourraient être expliquées par l'activité industrielle avoisinante caractérisée par l'émanation du soufre dans l'atmosphère. Ces mêmes zones montrent d'importantes valeurs durant les mois pluvieux (septembre-octobre-novembre-décembre-janvier-février) par rapport à celles obtenues durant la période sec (juin-juillet-août) (Fig. 19).

Delmas & Baudet (2010), ont signalé que le soufre peut précipiter de l'atmosphère vers le sol sous l'effet des pluies.

Les faibles teneurs en sulfates enregistrées au niveau de ZH8 pourraient être expliquées par une activité biologique intense (couvert végétal important, activité planctonique et microbienne considérable).

D'après Yamane (1969), la réduction des teneurs en sulfates en certains points et par moments a lieu probablement par les micro-organismes qui interviennent en anaérobiose dans les sols submergés après 3 à 4 semaines à partir du début de la submersion, et notamment par des

processus d'oxydation et de formation d'éléments hydrosolubles tels que CaSO_4 et MgSO_4 .

Phosphore total

D'une manière générale, le suivi du phosphore total au niveau du CZHM, permet de relever la présence importante de cet élément, dont les valeurs moyennes annuelles sont de $0,9 \pm 0,1$; $1,0 \pm 0,2$ et $1,5 \pm 0,5$ mg/l, respectivement pendant les années 2000, 2001 et 2002 (Fig. 20).

Le minimum de $0,01$ mg/l a été enregistré au niveau des stations ZH1 pendant les mois de janvier 2001 et février 2002, et le maximum de $6,40$ mg/l à ZH7 en juin 2002 (Fig. 21). Les moyennes spatiales fluctuent entre $0,9 \pm 0,3$ mg/l à ZH2 et $0,9 \pm 0,4$ à ZH3, et $1,5 \pm 0,5$ mg/l au niveau de ZH4. Ces concentrations sont donc supérieures à la limite admissible de $0,5$ mg/l (S.E.E. 2007).

L'augmentation du phosphore total durant ces périodes pourrait provenir de l'activité biologique, notamment de la décomposition et l'accumulation de la matière vivante en période estivale et au moment de la forte productivité automnale et printanière.

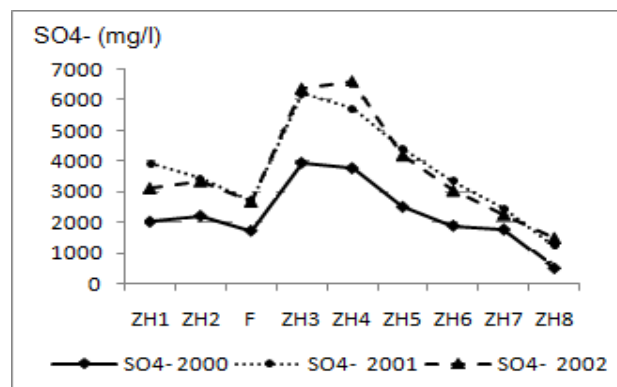


Figure 18. Evolution spatio-temporelle des valeurs moyennes des sulfates dans le CZHM de janvier 2000 à août 2002.

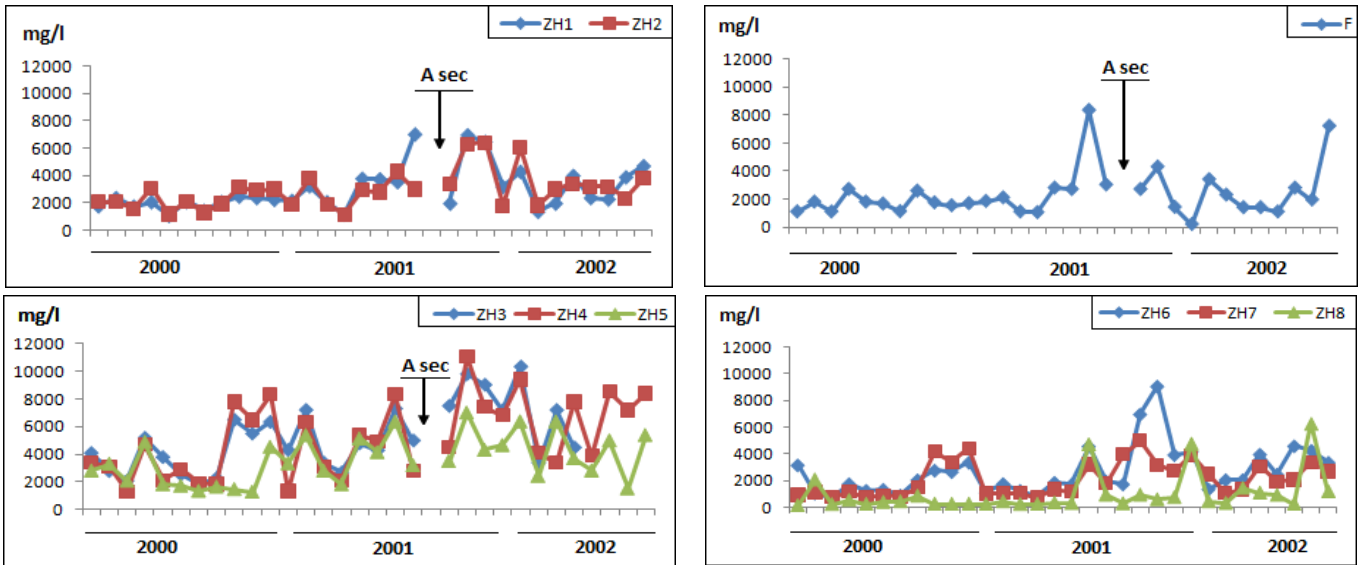


Figure 19. Evolution saisonnière des sulfates de l'eau dans le complexe zones humides de Mohammedia de janvier 2000 à août 2002.

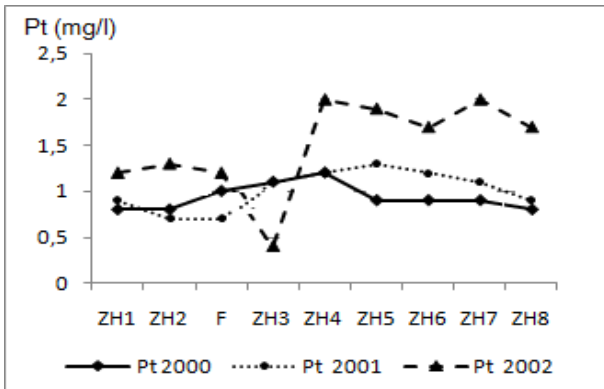


Figure 20. Evolution spatio-temporelle des valeurs moyennes du phosphore total dans l'eau du CZHM de janvier 2000 à août 2002.

Par ailleurs, l'apport de phosphore total à partir des sédiments par relargage pourrait être une autre source de cet élément dans le milieu. En effet, l'étude géochimique réalisée dans ce site confirme la faiblesse de la présence de cet élément dans les sédiments et que les conditions hydrologiques et physicochimiques relevés favorisent sa solubilisation et sa biodisponibilité en phase aqueuse (Serghini 2003).

Span *et al.* (1990) ont démontré l'importance du relargage du phosphore total à partir du sédiment en conditions d'anaérobiose. C'est le cas de la majorité des stations d'étude particulièrement en période estivale. En condition d'anaérobiose, le fer ferrique des complexes $\text{Fe}(\text{OOH})\div\text{P}$ est réduit en fer ferreux libérant ainsi le phosphore (Matejka & Feuillade 1992). Ce processus est

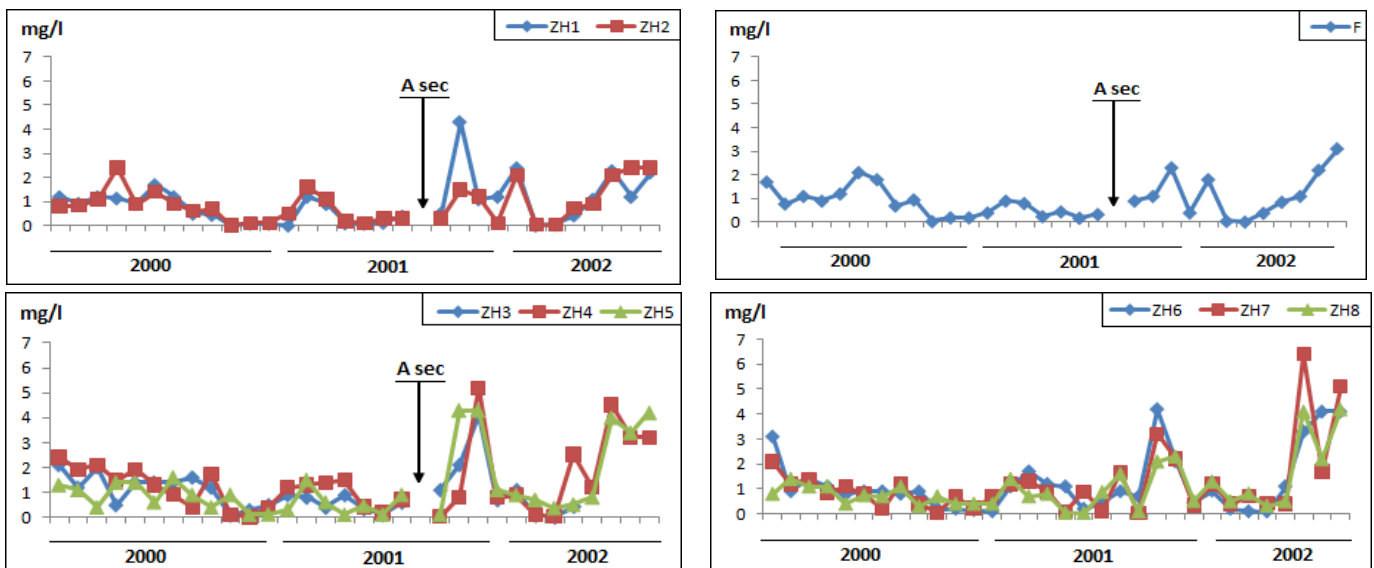


Figure 21. Evolution saisonnière du phosphore total de l'eau dans le complexe zones humides de Mohammedia de janvier 2000 à août 2002.

d'autant plus actif en présence des bactéries. L'accumulation de la matière organique dans les sédiments accélère le processus de relargage à partir de $\text{Fe}(\text{OOH})\cdot\text{P}$ par l'installation des conditions d'anaérobie (Rhallabi 2004).

Un équilibre existe entre la phase adsorbée aux particules du sol et la phase dissoute dans l'eau du phosphore. Quand la concentration en phosphore dissous diminue, le phosphore accroché aux éléments du sol est relargué dans l'eau et profite à nouveau à des organismes vivants, ou sort de la zone humide pour aboutir dans le cours d'eau, lacs et finalement la mer.

La décomposition partielle de la matière organique provoque une baisse du pH responsable de la dissolution du phosphore lié aux carbonates ($\text{CaCO}_3\cdot\text{P}$). Néanmoins, l'origine anthropique du phosphore dans ce milieu n'est pas à exclure du fait du charriage des eaux riches en éléments dissous notamment du phosphore par l'Oued El Maleh et les effluents des unités industrielles.

L'accroissement des flux de phosphore dans les eaux de surface résulte de l'intensification de la pression démographique et des activités agricoles dans les bassins versants (Pourrio & Meybeck 1995).

Les fortes concentrations en phosphore relevées témoignent d'une pollution organique d'origine anthropique et industrielle et illustrent bien à quel point l'écosystème se défend par l'autoépuration pour lutter contre l'eutrophisation. Ce paramètre qui provoque une croissance végétale surtout la prolifération algale, peut en absence d'oxygène provoquer l'eutrophisation au niveau de tous les plans d'eau riches en matière organique dont l'origine est double ; endogène assurée par la faune et la flore, et exogène par les activités anthropiques ; rejets domestiques, activités agro-alimentaires, etc.

CONCLUSION

L'analyse et le traitement de l'ensemble des données hydrochimiques, hydrologiques et tenant compte des influences et des processus majeurs qui conditionnent le fonctionnement de ce système, ont permis de définir une typologie spatiale marquée par l'individualisation de trois secteurs d'influences différentes :

- un secteur (ZH1, ZH2 et F) d'influences conjuguées marines et continentales (vents, embruns, marées, apports amont ...) ;
- un secteur (ZH3, ZH4 et ZH5) sous influences climatiques strictes (précipitations, crues ...) ;
- un secteur (ZH6, ZH7 et ZH8) de mise en eau permanente, soumis essentiellement aux influences souterraines.

Cependant, le fonctionnement de ces hydrosystèmes se trouve parfois confronté à des changements instantanés capables de causer de profondes modifications de la stabilité physique, chimique et biologique de ce complexe humide, à grande importance écologique. Le cas des inondations 2001-2002, qu'a connu la région, est à l'origine de dégâts économiques importants.

S'ajoutent à ces contraintes naturelles, d'autres d'origine anthropique, tels que les remblaiements des marais, les constructions d'unités urbaines et industrielles et les rejets des eaux usées à effet toxique.

Remerciements. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut Scientifique et l'Institut d'Hygiène (Rabat). Les auteurs remercient le lecteur anonyme pour les remarques et commentaires qui ont permis d'améliorer le manuscrit.

Références

- AFNOR 1971. Détermination de la demande biochimique en oxygène (D.B.O). Norme T 90-103. A.F.N.O.R., Paris, 5 p.
- AFNOR. 1952. Dosage colorimétrique des ions nitrates. Norme T 90-012. A.F.N.O.R., Paris, 2 p.
- Beau J-F. 1998. *L'environnement. Repères pratiques*. Nathan, 160 p.
- Burt T. & Pinay G. 2005. Linking hydrology and biogeochemistry in complex landscapes. *Progress in Physical Geography*, 29, 297-316.
- Delmas R., Baudet J. & Servant J. 2010. Mise en évidence des sources naturelles de sulfate en milieu tropical humide. *Inter Science*, 30, 2, 158-168.
- El Hamoumi R., Hammada S., Himmi O. & Fekhaoui M. 2003. Fiche des 'Zones humides de l'oued Al Maleh'. Projet d'Inscription de nouveaux sites marocains sur la Liste Ramsar des Zones Humides d'Importance Internationale. WWF International – HCEFLCD – Inst. Sci., Rabat, Projet n° 9E0702.01.
- El Hamoumi R. & Qninba A. 2008. Nidification du Héron cendré *Ardea cinerea* Linnaeus, 1758 (Ciconiiformes, Ardeidae) à Mohammedia (côte atlantique marocaine) en 2007 et 2008. *Bull. Inst. Scient.*, Rabat, sect. Sci. Vie, 30, 51-52.
- Giller P-S. & Malmqvist B. 2002. *The Biology of Streams and Rivers*. Oxford University Press, 296 p
- Haycock N-E., Pinay G. & Walker C. 1993. Nitrogen retention in rivers corridors: European perspective. *Ambio*, 22, 340-346.
- Matejka G., Feuillade G., Heulot I., Lemehaute P. & Mazet M. 1992. Les échanges de phosphore à l'interface eau-sédiments – Etudes et mémoires. *Tribune de l'Eau*, Mars/Avril, 556, 2, 19-25.
- M.E.M (Ministère de l'Équipement du Maroc). 2002. Direction de l'hydraulique. Ressources en eau souterraine, note de synthèse, rapport définitif, 166 p.
- Pourriot R. & Meybeck M. 1995. *Limnologie générale*. Masson, Paris, 956 p.
- Rhallabi N., El Hafiane F., El Hammouri B & Ettalibi M. 2004. Impact du sédiment des bassins de maturation sur les performances d'abattement des coliformes fécaux. *Actes. Inst. Agron. Vet.*, 24, 3-4, 91-97.
- Rihane A. & Aouinty B. 2006. Contribution à l'étude de la reproduction de la Glaréole à collier *Glareola pratincola* dans la zone humide de Mohammedia (Maroc). *Go-South Bull.*, 3, 1-3.
- Rodier J. 1996. *L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires et eaux de mer*. 7^{ème} Ed. Dunod.
- S.E.E.E. (Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement). 2007. Norme de qualité des eaux de surface, Grille de qualité.
- S.G.M. (Service Géologique du Maroc). 1975. Ressources en eau du Maroc et bassins du Maroc Atlantique. *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc*, n°231.

- Span D., Arbouille D., Howa H. & Vernet J-P. 1990. Variation of nutrient stocks in the superficial sediments of lake Geneva from 1978-1988. *Hydrobiologia*, 207, 161-166.
- Serghini A., El Abidi A., Bouissi M., Zaid E-H., Tahri L. & Fekhaoui M. 2003. Contamination métallique des eaux souterraines de la ville de Mohammedia – Maroc. *Cahiers de Santé*, 13, 1-7.
- Serghini A. 2003. *Diagnose du complexe zones humides de Mohammedia : étude qualitative et quantitative des composantes physique (eau – sédiment) et biologique de l'écosystème*. Thèse de Doctorat d'Etat Es-Sciences, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, N°2155, 178 p.
- Yamane I. 1969. Reduction of nitrate and sulphate in submerged soils with special reference to redox potential and water soluble sugar content of soils. *Soil. Sci. Plant. Nutr.*, 15, 4, 139-148.
- Westlake D.F. & Ladle M. 1995. River and stream ecosystems of Great Britain. *In* : Cushing C-E., Cummins K-W. & Minshall G-W. (eds) - *Ecosystems of the world*. 22. River and stream ecosystems. Elsevier, Amsterdam, 343- 388.

Manuscrit reçu le 2 juillet 2010

Version modifiée acceptée le 22 novembre 2010