



CONTRIBUTION A L'ETUDE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES DE L'OUED MOULOUYA (MAROC ORIENTAL)

M. MAKHOUKH¹, M. SBAA¹, A. BERRAHOU¹, M. VAN. CLOOSTER²

¹Université Mohammed Premier, Faculté des Sciences, Centre de l'Oriental des Sciences et Technologies de l'Eau, Oujda, Maroc.

²Université Catholique de Louvain, Faculté de Bioingénierie Agronomique et Environnementale, Unité Génie Rurale. Louvain-La-Neuve, Belgique.
makhomed@yahoo.fr

RESUME

L'étude concerne l'analyse des paramètres physico-chimiques (T° , pH, C.E, MES, O_2 , DBO_5 , DCO, Cl^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ et NO_3^-) le long de l'oued Moulouya afin d'établir un diagnostic de l'état de la pollution des eaux de surface de ce fleuve. Ainsi, des prélèvements d'eau ont été effectués au niveau de treize stations d'études en période humide et en période sèche.

Les résultats obtenus montrent qu'au niveau des stations où se déversent les eaux usées des villes de Missouri, Outat El Haj, Tindit et Guercif, on assiste à une augmentation des teneurs en DBO_5 , en PO_4^{3-} , en chlorures, en DCO et une diminution des teneurs en oxygène dissous particulièrement en période sèche. Ailleurs, l'évolution des teneurs en MES et en DCO entre l'amont et l'aval du barrage Hassan II en saison humide, nous confirme l'importance de ce barrage dans la diminution des capacités de l'oued à évacuer les polluants vers la moyenne et la basse Moulouya.

L'interprétation des données, la corrélation existante entre les différents paramètres et la répartition des stations d'étude en groupe selon le degré de contamination sont réalisées par l'analyse en composante principale normée. Par ailleurs, le degré de pollution diffère d'un site à l'autre selon la distance d'éloignement de la source de pollution.

Mots clés : Contamination, Eaux de surface, Eaux usées, Maroc, Paramètres physico-chimiques

ABSTRACT

The study concerns the analysis of physicochemical parameters (T° , pH, E.C, MIS, O₂, DBO₅, DCO, Cl⁻, PO₄³⁻, NH₄⁺ et NO₃⁻) along the river to establish a Moulouya diagnosis of the state of pollution of surface waters of this river. Thus, water withdrawals were made at thirteen stations of studies in the wet season and dry season.

The results show that the stations which discharge wastewater from cities of Missouri, Outat El Haj, Tindit and Guercif, there is an increase in levels of DBO₅, PO₄³⁻, chloride, DCO and decrease in dissolved oxygen especially in dry periods. Moreover, the evolution of the levels of MIS and DCO between upstream and downstream of the dam Hassan II during the wet season, we confirmed the importance of this dam in the diminished capacity of the river to remove the pollutants to the middle and lower Moulouya.

The interpretation of data, the correlation between different parameters and the distribution of study sites in groups according to the degree of contamination are performed by the standardized principal component analysis. Moreover, the degree of pollution varies from one station to another depending on the distance away from the pollution source.

Keywords: Contamination, Surface Water, Wastewater, Morocco, Physico-chemical parameters

INTRODUCTION

L'eau douce renouvelable est une ressource indispensable à la vie. Elle mérite une attention toute particulière, vu qu'elle est très altérée et sérieusement menacée par les activités humaines. En effet, la croissance démographique accompagnée d'une urbanisation rapide qui cause de nombreuses perturbations pour les milieux naturels (Mc Kinney, 2002), l'industrialisation, l'utilisation non rationnelle des engrais et pesticides et le manque de sensibilisation de la population envers la protection de l'environnement, conduisent autant à un déséquilibre de l'écosystème et génèrent des éléments polluants qui peuvent affecter la qualité physico-chimique et biologique des milieux aquatiques récepteurs (Mullis et al., 1997), mais aussi altérer les usages de l'eau (captage de l'eau, baignade, etc.) (Burton et Pitt, 2001).

L'oued Moulouya qui draine la quasi-totalité du Maroc oriental, se trouve particulièrement touché par ce problème du fait de la démographie croissante des centres riverains et du développement continu des secteurs industriel et agricole. En effet, les rejets liquides d'origines domestiques et industrielles générés par les villes de Missouri, Outat El Haj, Tindit et Guercif sont déversés directement dans cet oued d'une façon précaire et sans traitement préalable. En

outre, la région de la haute Moulouya constitue le plus gros district du royaume du Maroc. Mais, après sa fermeture en 1986, ce district a été abandonné avec leurs installations minières et métallurgiques, laissant en surface des matériaux des déchets miniers, des rejets de laverie et des résidus métallurgiques qui peuvent être une source importante de contamination de l'écosystème aquatique.

Ce réseau hydrographique dont les apports moyens s'élèvent à un milliard de m³/an (Prad, 1999) est sujet alors à d'importants risques de pollution qui menacent la qualité des eaux en compromettant les divers usages de l'eau.

Un diagnostic plus complet de la situation actuelle de la pollution et un suivi rigoureux de son évolution, s'avèrent d'une grande nécessité pour la sauvegarde de cet écosystème. C'est dans cette perspective que s'inscrit notre travail qui consiste à étudier de l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux de surface d'oued Moulouya.

MATERIEL ET METHODES

Présentation générale de la zone d'étude

L'oued Moulouya, principal cours d'eau de la région, prend sa source dans la zone de jonction du haut atlas et du moyen Atlas. Il est d'une longueur de 520 km et représente le plus grand fleuve Marocain se jetant dans la Méditerranée avec un bassin versant d'une superficie d'environ 50.000 km².

Ce cours d'eau reçoit trois affluents importants : l'Anzeghmir dans la Haute Moulouya puis successivement, le Melloulou et le Za dans la basse Moulouya. Aussi trois retenues de barrages sont implantées sur cet oued : Hassan II dans la haute Moulouya, Mohamed V et Mechra- Homadi dans la basse Moulouya.

En outre, l'oued Moulouya a une importance socio-économique capitale pour les habitants de son bassin (irrigation, abreuvement, eau potable, industries...), mais, il draine la majorité de la charge polluante générée par les agglomérations avoisinantes et rejetée en permanence sans traitement préalable.

Echantillonnage

Tenant compte des diverses activités recensées dans la zone d'étude (eaux usées domestiques, industrielles et agricoles), treize stations (S1 à S13) réparties le long de l'oued Moulouya (figure 1) ont été retenues de telle sorte qu'elles soient accessibles et reflètent les caractéristiques réelles des eaux de surface de l'oued Moulouya au niveau de la zone d'étude.

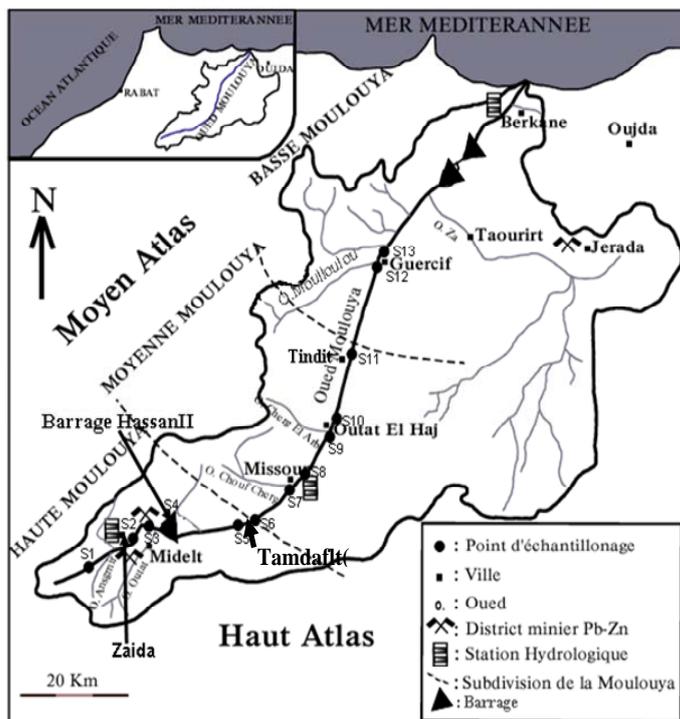


Figure 1 : Situation géographique des sites de prélèvements au niveau de l'Oued Moulouya

Prélèvement des eaux et mesure des paramètres physico-chimiques

Le long de l'oued Moulouya et sur toute la région étudiée, les échantillons d'eau ont été prélevés en période humide (mois de février-2006), cette période montre une pluie intense et une crue violente (de S1 à S3 et de S12 à S13), et en période sèche (mois de juillet-2007).

A chaque prélèvement, la température de l'eau, la température de l'air, la conductivité électrique, le pH et l'oxygène dissous ont été mesurés in situ.

Les échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide de bouteilles en plastique, préalablement rincées avec l'eau de la station. Ils ont été ensuite conservés à 4°C pendant le transport au laboratoire, puis ont été analysés dans les 24 heures qui suivent. Les méthodes d'analyses sont celles préconisées par les normes AFNOR (1997) et par Rodier (1996).

Les orthophosphates, les ions ammoniums et les nitrates ont été dosés par spectrophotométrie. La demande chimique en oxygène est déterminée en adoptant la méthode normalisée AFNOR (T90-101). La demande biochimique a été mesurée à l'aide d'un DBO-mètre. Les chlorures ont été dosés par nitration (Rodier, 1996). Le dosage de l'oxygène dissous a été réalisé aussi au laboratoire

après fixation de l'oxygène de l'échantillon par la méthode de titrage de Winkler. Les matières en suspension sont déterminées par filtration d'un volume d'eau sur filtre cellulosique de 0,45µm selon Rodier (1996).

RESULTAS ET DISCUSSION

Température de l'eau

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

Dans la zone d'étude, les températures enregistrées (figure 2) oscillent entre 10°C (station S6) et 15 °C (stations S8 et S11) en période humide, et entre 24°C (stations S4) et 29°C (stations S9, S12 et S13) en période sèche. Ces variations de température suivent celles du climat de la région.

Les températures mesurées dans les eaux de l'oued Moulouya appartiennent donc à la classe moyenne à excellente (N.M, 2002).

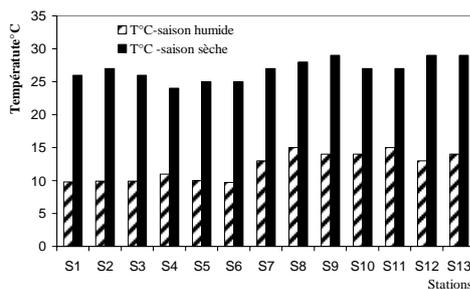


Figure 2 : Variation Spatio-temporelle de la température

Potentiel hydrogène (pH)

Le pH de l'eau mesure la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonate (Ezzaouaq, 1991; El Blidi et al., 2003; Himmi et al., 2003).

Les valeurs observées révèlent que le pH est légèrement neutre à alcalin dans toutes les stations de l'oued Moulouya, aussi bien en période de pluie qu'en période sèche. En effet, le pH varie entre 7,04 dans la station S4 (février 2006 et juillet 2007) et 7,89 dans la station S5 (février 2006). Ceci est dû à la présence

de carbonates qui permettent de tamponner les eaux qui s'écoulent vers l'oued Moulouya, en ruisselant et en s'infiltrant dans la couverture marno-dolomitique et calcaire.

La variation du pH entre les deux campagnes ne dépasse pas en général une unité du pH et l'allure des courbes (figure 3) est très variable et ne suit pas une loi régulière. En effet, le pH a tendance à augmenter de l'amont vers la station S3 puis il diminue pour atteindre sa valeur minimale dans la station S4 pour les deux périodes. Ce qui peut être expliqué par la dilution de l'eau au niveau du barrage Hassan II. Par suite, le pH reprend immédiatement les valeurs acquises en amont du barrage avec des variations faibles d'une station à l'autre et d'une saison à l'autre tout enregistrant une augmentation en période de pluie.

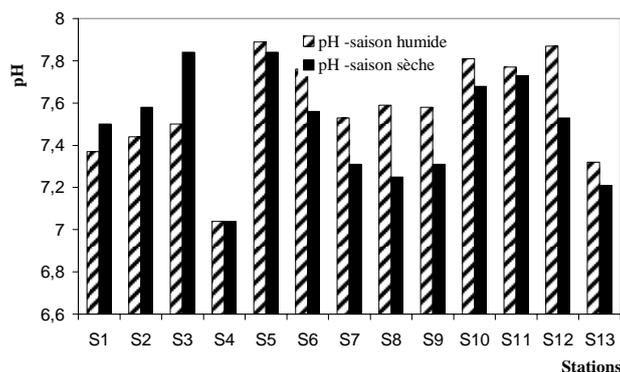


Figure 3 : Variation Spatio-temporelle des valeurs du pH

Matières en suspension

Les matières en suspension, représentent l'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux. Elles sont fonction de la nature des terrains traversés, de la saison, de la pluviométrie, de régime d'écoulement des eaux, de la nature des rejets, etc. (Rodier, 1984). Les teneurs élevées en matières en suspension peuvent être considérées comme une forme de pollution. 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 et Légare, 2000).

Pour les deux saisons humide et sèche, les valeurs des MES enregistrées oscillent entre 123 mg/l (S1) et 2730 mg/l (S2).

L'évolution spatio-temporelle des teneurs en matières en suspension (MES) (figure 4) dans l'oued Moulouya montre deux périodes bien distinctes :

- Une période hivernale, où les fortes charges exceptionnellement (210 à 2730 mg/l) enregistrées dans les Stations S1, S2, S3, S12 et S13. Ces teneurs élevées peuvent être le résultat d'une manifestation hydrologique brutale (crue), dont la charge en MES peut être attribuée à une intense érosion du bassin versant, suite

à des pluies orageuses brutales qui occasionnent une augmentation des matières en suspension. Ces valeurs diminuent immédiatement en aval du barrage Hassan II et atteignent des valeurs admissibles avec un enrichissement dans les stations qui sont exposées aux différents types de rejets, à savoir S6, S8 et S10.

- Une période estivale, où la variation des concentrations de la MES garde la même allure avec des valeurs moins élevées dans toutes les stations à l'exception des stations S6, S8 et S10 qui montrent des teneurs légèrement élevées. Ceci est vraisemblablement dû aux rejets liquides générés par les centres riverains (Missour et Outat El Haj) ainsi qu'aux déchets solides déposés aléatoirement sur les rives de l'oued pour les stations S8 et S10 et à l'unité de production de Ghassoul (argile saponifère) installée en amont de la station S6.

En général, les valeurs obtenues en période hivernale (crue) sont supérieures à celles mesurées en période estivale. Cette remarque est en accord avec plusieurs travaux effectués au niveau des oueds (Rohatgi *et al.*, 1975; Azzaoui, 1999).

Par ailleurs, la comparaison des teneurs en matières en suspension dans l'oued Moulouya avec la Norme marocaine fixée à 1000 mg/l place ces eaux dans la grille moyenne à très mauvaise.

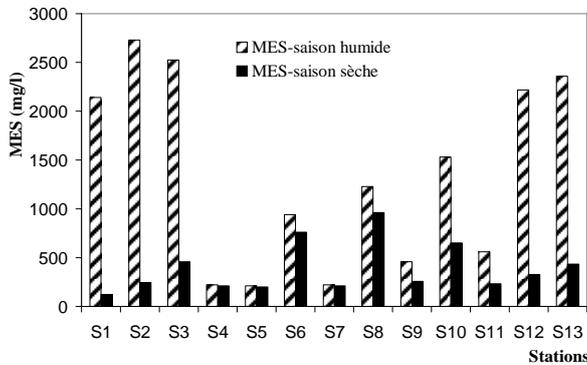


Figure 4 : Variation Spatio-temporelle des matières en suspension

Conductivité électrique

La mesure de la conductivité constitue une bonne appréciation du degré de minéralisation d'une eau où chaque ion agit par sa concentration et sa conductivité spécifique. Les valeurs moyennes enregistrées, montrent des variations importantes. Elles fluctuent entre 219 μ s/cm à la station S4 en période humide et 3920 μ s/cm à la station S8 en période sèche dans les eaux de surface de l'oued Moulouya dépassant la norme marocaine des eaux de surface (2700 μ s/cm) (N.M, 2002), indiquant une minéralisation excessive attribuée aux eaux usées des villes avoisinantes : Missour (S8) et Outat El Haj (S10).

La répartition temporelle de la conductivité électrique des eaux étudiées montre une diminution pendant la période pluvieuse (figure 5). L'explication de cette diminution réside dans la dilution des eaux par l'apport des eaux pluviales.

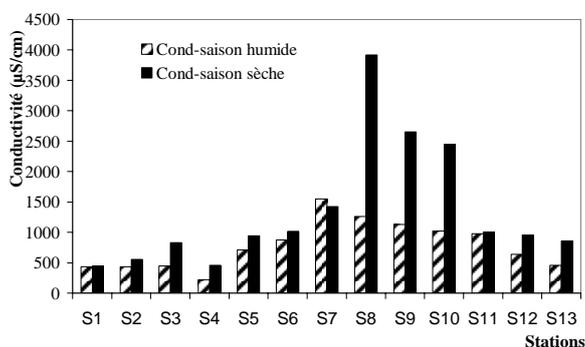


Figure 5 : Variation Spatio-temporelle de la conductivité

Chlorures

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Ils ont une influence sur la faune et la flore aquatique ainsi que sur la croissance des végétaux.

Les concentrations en ions chlorures relevées dans les eaux de l'oued Moulouya (figure 6) s'échelonnent entre 154 mg/l (S4) et 1168 mg/l (S13) en période humide et entre 111mg/l (S1) et 1733 mg/l (S13) en période sèche. Les valeurs minimales sont enregistrées dans la partie amont de l'oued (figure 6) et les valeurs maximales sont observées au niveau des stations S8, S10, S11 et S13 localisées respectivement en aval des villes de Missouri, Outat El haj, Tindit et Guercif. Cette évolution indique la contribution d'un apport anthropique qui peut être d'origine urbaine aussi bien qu'industrielle.

L'évolution temporelle est marquée par un léger abaissement des teneurs en chlorures pendant la saison humide par rapport à la saison sèche résultant de la dilution par les précipitations pendant la première campagne.

Pour les deux périodes d'étude, les chlorures enregistrent des teneurs qui dépassent les normes marocaines fixées à 750 mg/l (N.M, 2002). Ce qui permet de classer ces eaux dans la grille bonne (S1 à S7) à très mauvaise (S8 à S13) des eaux de surface.

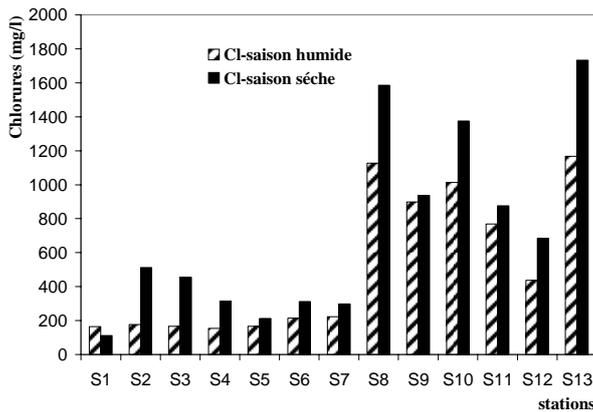


Figure 6 : Variation Spatio-temporelle des chlorures

Oxygène dissous

L'oxygène est l'un des paramètres particulièrement utile pour l'eau et constitue un excellent indicateur de sa qualité. C'est un des paramètres les plus sensibles à la pollution. Sa valeur nous renseigne sur le degré de pollution et par conséquent sur le degré de l'auto-épuration d'un cours d'eau.

Dans notre étude, l'évolution saisonnière de l'oxygène dissous montre des concentrations plus élevées en période humide que celles en période sèche. En effet, les teneurs enregistrées (figure 7) varient entre 6,12 mg/l (S8) et 9,02 mg/l (S1) et entre 3,23mg/l (S8) et 6,14 (S4) respectivement en période humide et en période sèche. Ceci est essentiellement dû à la diminution de la température de l'eau; car une eau froide contient une plus grande quantité d'oxygène dissous qu'une eau chaude (Hébert et Légaré, 2000), et aux fortes vitesses des vents qui engendrent un brassage continue de la masse d'eau et par conséquent un enrichissement de la phase dissoute en oxygène dissous pendant la saison hivernale. Le débit important enregistré durant la période de pluie peut aussi augmenter l'échange de l'oxygène avec l'atmosphère et faciliter ainsi et la circulation de l'air et par la suite influencer la concentration en oxygène dissous. En effet, les valeurs élevées sont enregistrées dans les stations (S1, S2, S3, S4, S12 et S13) qui ont connu la crue pendant la campagne de février 2006. Cependant, pendant la saison estivale, le réchauffement de l'eau et le faible débit de l'oued provoquent une diminution de la dissolution de l'oxygène dissous, aggravée par une augmentation de la consommation de l'oxygène par les organismes vivants dans l'oued et une chute de la vitesse des vents.

Les faibles teneurs en oxygène dissous observées en période sèche aux stations (S8) et (S10) sont dues à la charge organique des rejets urbains émanant des villes de Missouri et d'Outat EL Haj sans aucun traitement préalable. L'oxygène

dissous se réduit par l'activité des bactéries en décomposant la matière organique présente (Fekhaoui et Patee., 1993).

Globalement, le régime de l'oxygène dissous dans le secteur étudié est non déficitaire; le phénomène d'auto-épuration a lieu ce qui permet d'enrichir le taux d'oxygène dissous. Ces résultats montrent que les eaux de l'oued Moulouya sont de qualité moyenne à excellente (N.M, 2002).

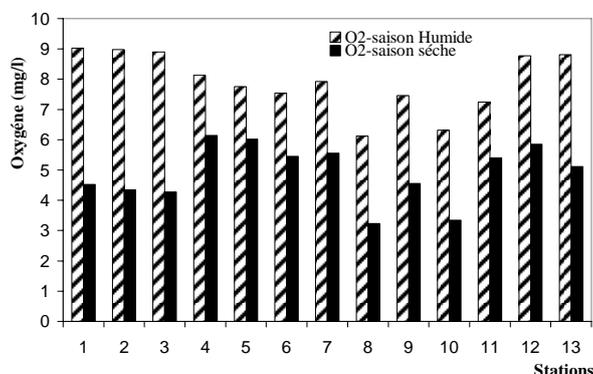


Figure 7 : Variation Spatio-temporelle de l'oxygène dissous

Demande biochimique en oxygène

La DBO₅ (demande biochimique en oxygène), c'est la quantité d'oxygène dissous consommée par les micro-organismes, à l'obscurité à 20 °C pendant 5 jours. Il permet l'évaluation des matières organiques biodégradables.

La figure 8 montre une augmentation de la DBO₅ des eaux de l'oued Moulouya de l'amont vers l'aval notamment en période sèche. En effet, les valeurs moyennes de DBO₅ varient entre 5 mg/l (S1) et 19 mg/l (S8) en période hivernale et entre 8 mg/l (S4) et 37 mg/l (S8) en période sèche. La partie aval de la zone d'étude reçoit alors les eaux usées brutes riches en matières organiques et en substances nutritives provenant des agglomérations urbaines: Missouri, Outat El haj, Tindit et Guercif. Ce qui provoque un accroissement considérable de la charge organique des eaux superficielles dans un espace restreint. Cependant les autres stations qui sont en général loin de toutes influences externes présentent encore des eaux de qualité acceptable.

L'augmentation des teneurs en DBO₅ en période sèche peut être expliquée par l'instauration des conditions de dégradation de la matière organique par les microorganismes dont l'activité s'intensifie avec la diminution de la vitesse d'écoulement et avec le réchauffement des eaux. Cette activité, consommatrice d'oxygène, est à l'origine de l'autoépuration des eaux (Bremond et Perrodon, 1979). Cependant en période humide les eaux de pluie contribuent à la dilution de la charge organique émanant des eaux usées des villes riveraines à l'exception des stations situées plus en aval (S8, S10 et S13) qui montrent

encore des teneurs assez élevées liées à la charge organique importante générée par les villes de Missour , Outat El haj et Guercif.

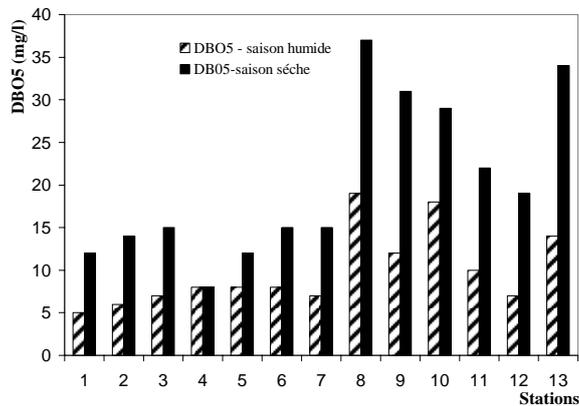


Figure 8 : Variation Spatio-temporelle de la demande biochimique en oxygène

Demande chimique en oxygène

La demande chimique en oxygène représente la quantité d'oxygène consommée par les matières oxydables chimiquement contenues dans l'eau. Elle est représentative de la majeure partie des composés organiques mais également des sels minéraux oxydables (sulfures, chlorures.etc).

Les teneurs en DCO enregistrées au niveau des eaux étudiées sont comprises entre 15 mg/l (S1) et 43 mg/l (S3) en période humide et entre 17 mg/l (S1) et 47 mg/l (S13) en période sèche (figure 9).

A l'exception de la station S3 qui montre une teneur maximale de 43 mg/l, les concentrations observées dans les autres stations en période humide sont nettement faibles. L'augmentation de la DCO en S3 peut être expliquée par le lessivage des résidus miniers de l'ancienne mine qui contient des différents éléments inorganiques. Or, la mise en place du barrage Hassan II sur l'oued Moulouya a toute fois limité les apports en eaux fluviales et par conséquent diminué son pouvoir d'évacuation des polluants émanant des sites miniers de la haute Moulouya vers la zone avale. Par ailleurs, en période sèche les teneurs enregistrées dans les stations situées en aval des agglomérations avoisinantes de la Moulouya (S8, S10 et S13) dépassent la norme marocaine fixée à 40 mg /l (N.M, 2002). La grille des normes marocaines permet alors de classer ces eaux d'excellente (S1, S2, S4, S5, S6, S7, S11 et S12), à moyenne (S9)) à mauvaise qualité (S3, S8, S10 et S13).

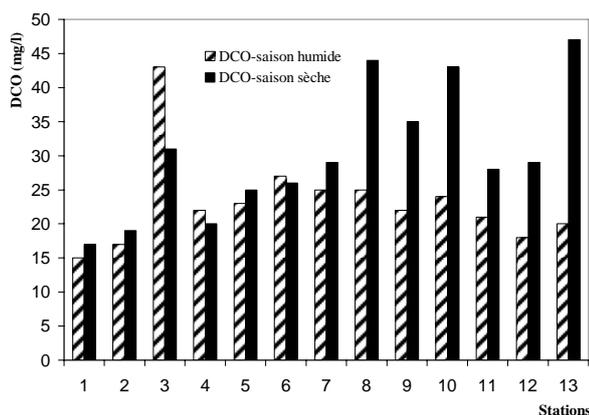


Figure 9 : Variation Spatio-temporelle de la demande chimique en oxygène

Orthophosphates

Le phosphore, l'un des nutriments importants, peut se trouver sous différentes formes oxydées. C'est un élément de base des acides nucléiques ADN et ARN. Il participe à la distribution de l'énergie dans le corps humain (Claude et al., 1998), et représente un élément biogène indispensable à la croissance des algues. Les teneurs élevées de cet élément dans les eaux de surface peuvent entraîner leur eutrophisation. Cependant, ils ont un effet bénéfique en jouant un rôle régulateur : ils favorisent tous les phénomènes de fécondation, la mise à fruit et la maturité des organes végétatifs (Vilain, 1989).

L'analyse des résultats (figure 10) montre que la concentration en orthophosphates dans les eaux de surface d'oued Moulouya varie entre 0,02 mg/l(S1) et 0,65 mg /l (S8) en saison humide et entre 0,02 mg/l (S4) et 1,48 mg/l (S13) en saison sèche.

Au niveau du secteur amont (de S1 à S6), les teneurs en orthophosphates sont faibles et sont inférieures à 1 mg /l pour les deux saisons. Cependant au niveau du secteur aval (de S7 à S13), les orthophosphates suivent une variation spatiale marquée relativement par une tendance à l'augmentation en période sèche. Cette disponibilité des orthophosphates peut être expliquée par les rejets urbains des agglomérations avoisinantes et relargage du phosphore piégé en grande quantité dans les sédiments. Selon Holden Martin (1980), les agents atmosphériques, vent et pluie, représentent aussi des sources de phosphates surtout quand le débit fluvial est faible.

Comme pour la saison estivale, un enrichissement a été noté aussi en saison hivernale dans le secteur aval (S7 à S10), mais ces concentrations restent inférieures à la norme marocaine fixée à 1mg/l. Ces valeurs permettent alors de classer ces eaux dans la classe moyenne (S1 à S7) à mauvaise qualité (S8 à S13) (NM, 2002).

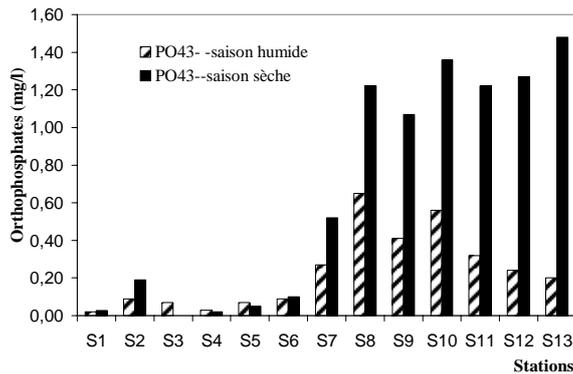


Figure 10 : Variation Spatio-temporelle des valeurs des orthophosphates

Les composés azotés

L'azote est un élément indispensable à l'édification de la cellule vivante. Il est utilisé comme indicateur majeur de la pollution organique. Il se présente sous deux formes : organique (protéines, acides aminés, etc.) et minéral (ammonium, nitrites, nitrates, etc.)

Les formes d'azote étudiées sont : l'azote ammoniacal (NH_4^+) et les nitrates (NO_3^-).

Azote ammoniacal

L'azote ammoniacal constitue un des maillons du cycle complexe de l'azote dans son état primitif. C'est un gaz soluble dans l'eau. Il existe en faible proportion, inférieure à 0,1mg/l d'azote ammoniacal dans les eaux naturelles. Il constitue un bon indicateur de la pollution des cours d'eau par les effluents urbains. Dans les eaux superficielles, il provient de la matière organique azotée et des échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère (Chapman et al, 1996).

L'analyse du profil de l'ammonium (figure 11), montre que les teneurs varient entre 0,01 mg /l (S4) et 0,22 mg /l (S8) en période de pluie et entre 0,03 mg/l (S1) et 2,12 mg/l (S8) en période sèche. Les valeurs d'ammonium trouvées en période humide sont nettement très inférieures à celles de la période sèche notamment en aval de la zone d'étude, traduisant ainsi l'effet de la dilution et témoigne d'une bonne oxygénation des eaux entraînant ainsi l'oxydation de l'azote en période hivernale. Les teneurs relativement élevées enregistrées de la station S8 à S13 en période sèche traduisent le processus de dégradation incomplète de la matière organique.

Les valeurs relevées en ions ammonium dans les eaux de l'oued Moulouya permettent de placer ces eaux dans la classe excellente (S1 à S7) à moyenne qualité (S8 à S13) selon la grille de qualité des eaux de surface marocaine.

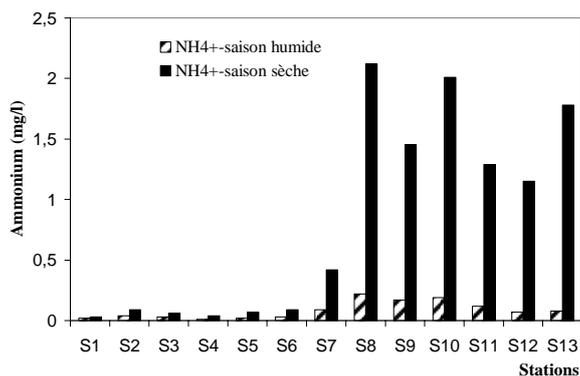


Figure 11 : Variation Spatio-temporelle des valeurs de l’ammonium

Nitrates

Les nitrates constituent le stade final de l’oxydation de l’azote, et représentent la forme d’azote au degré d’oxydation le plus élevé présent dans l’eau. Leurs concentrations dans les eaux naturelles sont comprises entre 1 et 10 mg/l. Cependant leurs teneurs dans les eaux usées non traitées sont faibles (UNEP/MAP/MEDPOL, 2004).

L’histogramme des teneurs en nitrates dans les eaux d’oued Moulouya (figure 12), montre une légère variation de ces teneurs qui oscillent entre 0,25 mg/l (S4) et 5,47 mg/l (S7) et entre 0,20 mg/l (S1 et S4) et 1,62 mg/l (S13) respectivement en période humide et en période sèche.

L’augmentation des teneurs en nitrates dans les eaux d’oued Moulouya (station S7) pendant la période pluvieuse par rapport à la période sèche peut être due au lessivage des fertilisants utilisés dans les sols agricoles situés sur les bords de l’oued. Cependant les valeurs faibles relevées pendant la saison sèche pourraient être attribuées aux rejets d’eaux usées qui n’ont fait l’objet d’aucun traitement préalable particulièrement dans les stations S8 et S10 qui sont devenus un réceptacle des rejets provenant respectivement des villes de Missouri et d’Outat El Haj et aux faibles taux d’oxygène dissous et, puisque les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l’azote, peuvent jouer en période de faible oxygénation le rôle de donneur d’oxygène, évitant ainsi l’anaérobiose.

On peut conclure que les teneurs en nitrates enregistrées dans les eaux de surface de la Moulouya sont inférieures à la teneur suggérée par les normes marocaines et internationales (50 mg/l). Ce qui indique que les eaux étudiées ne sont pas assujetties à un risque de pollution par les nitrates.

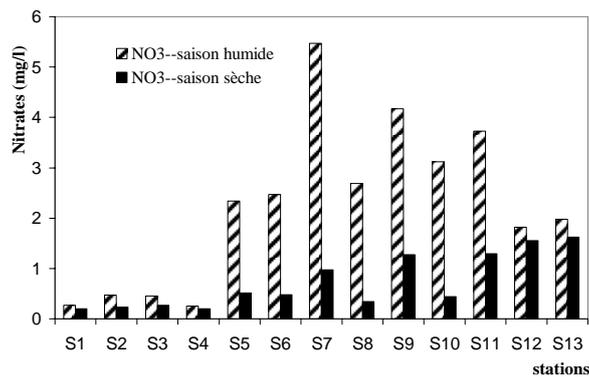


Figure 12 : Variation Spatio-temporelle des valeurs des nitrates

TYOLOGIE SPATIO-TEMPORELLE ET RYTHME SAISONNIER DU MILIEU

Dans le but d'établir une relation entre les différents paramètres physico-chimiques et pour mieux évaluer l'effet des activités anthropiques sur la qualité des eaux superficielles de l'oued Moulouya, un traitement statistique ACPN (analyse en composantes principales Normée) a été appliqué à l'ensemble des paramètres en période humide et en période sèche.

Cette méthode statistique permet de transformer les variables quantitatives initiales, toutes plus ou moins corrélés entre elles, en nouvelles variables quantitatives, non corrélées, appelées composantes principales (Davis, 1984). Cette méthode est largement utilisée pour interpréter les données hydrochimiques (Fekhaoui, 1990; Bennasser, 1997; EL Amrani-Pazza et al., 1994; Ezzaouaq, 1991; Jadal, 2002; El Blidi et al., 2006 ; El Morhit et al., 2008).

L'ACP a été effectuée sur une matrice de données constituée de 13 prélèvements (13 stations x 1 campagne humide) et 13 prélèvements (13 stations x 1 campagne sèche).

Au cours desquels les 11 variables (température de l'eau, pH, conductivité, matière en suspension, oxygène dissous, demande biochimique en oxygène, demande chimique en oxygène, chlorures, orthophosphates, Ammonium et nitrates) ont été mesurés.

Dans le plan Factoriel F1x F2

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (figure 13A, figure 13B, Tableau I) donnant 68,91 % de l'information totale montre, selon l'axe F1 (54,57 %), d'une part les eaux fortement minéralisées riches en chlorures et les eaux faiblement minéralisées et d'autre part il est associé des variables telles

DBO₅, NH₄⁺ et PO₄³⁻ qui sont des indicateurs de pollution domestique au posé à l'oxygène dissous. Cet axe définit alors un gradient de minéralisation et de pollution organique en allant de la gauche vers la droite de la composante 1.

La position de l'oxygène dissous sur la partie négative de la composante 1 pourrait justifier par le fait que les eaux de l'oued Moulouya sont plus oxygénées dans la partie amont loin de l'impact des effluents urbains situés en aval du cours d'eau.

L'axe 2 (14,34 %) quant à lui, est associé à des variables telles que MES. Il définit un axe de pollution par les particules organiques et minérales naturelles charriées par le cours d'eau lors de la période de crue.

En ce qui concerne la représentation des stations (figure 14), on observe que la prise en compte des variables minérales et organiques se traduit essentiellement par des observations suivantes :

- Impact des rejets urbains qui est une caractéristique de la composante 1 apparaît nettement pour la station S8 (impact de la ville de Missouri) et la station S10 (impact de la ville d'Outat El Haj)

- Impact de l'augmentation de pluie sur les caractéristiques des eaux est essentiellement, traduit par le drainage des matières organiques naturelles du bassin versant vers l'oued Moulouya et surtout dans la partie amont de la zone d'étude (S1 à S4) et dans la partie aval (S12 et S13) où on a observé une crue drainée par l'oued Meloullou affluent de l'oued Moulouya en temps de pluie.

- Le barrage Hassan II a un rôle important dans l'amélioration de la qualité de l'eau dans la moyenne et la basse Moulouya par la dilution des concentrations provenant de l'amont du cours d'eau. En effet, l'évolution longitudinale de concentrations de MES et DCO se caractérise par un net gradient croissant jusqu'à la station S3 où ses teneurs sont anormalement élevées. Plus en aval la situation s'améliore progressivement grâce à la retenue du barrage qui réduit les teneurs en DCO, les quantités des matières en suspension et toutes les particules minérales en provenance des sites miniers. Mais, la situation se détériore de nouveau suite aux rejets urbains générés par les villes avoisinantes de l'oued (Missouri, Outat El Haj et Guercif) et à l'impact de l'unité de production de Ghassoul en station S6. Par ailleurs, le phénomène d'autoépuration a lieu dans les stations qui sont situées entre stations aval des rejets urbains.

L'analyse globale permet de définir une typologie dominée par l'individualisation de trois groupes de stations GI, GII et GIII (Figure 14).

Le groupe GI comprend les stations situées en aval de la zone d'étude (S8 à S13) caractérisées par une pollution domestique importante particulièrement pendant la période sèche où les stations se trouvent plus chargées en polluants organiques conduisant à des concentrations faibles en oxygène dissous notamment en S8 et S10.

Le groupe GII est représenté par les stations situées en amont du barrage (S1 à S3), dénotant une qualité des eaux moyenne. Cette zone connaît des pluies orageuses et des vents violents que ce soit en été ou en hiver (Ngadi, 1995), Ce qui favorise le phénomène de dispersion et de transport éolien des particules

finies dans l'environnement voisin du centre minier, transportant des polluants susceptibles d'altérer la qualité des ressources en eau.

Le groupe GIII est représenté par les stations (S4 à S7). Cette zone est protégée par le barrage Hassan II qui limite l'entraînement des polluants provenant de la haute Moulouya vers la partie aval.

Tableau 1 : Répartition de l'inertie entre les deux axes (F1x F2) en période hivernale

	F1	F2
Valeur propre	12,007	3,154
% variance	54,57	14,34
% cumulé	54,57	68,91

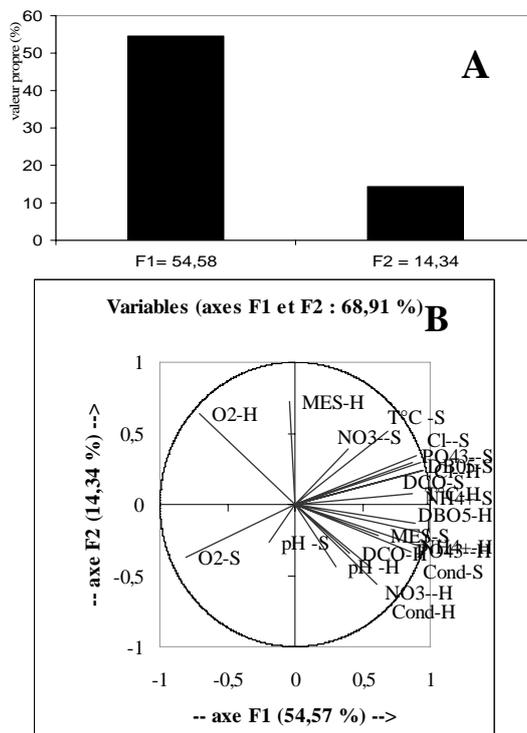


Figure 13 : Approche graphique de l'ACP des paramètres physico-Chimiques dans l'eau en selon le plan F1x F2. A, répartition de l'inertie entre les axes ; B, carte factorielle des variables

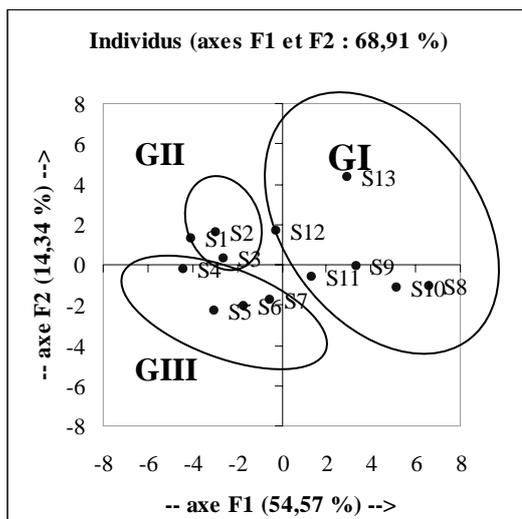


Figure 14 : Approche graphique de l'ACP des paramètres physico-chimiques dans l'eau en selon le plan F1x F2.
C, carte factorielle des stations.

CONCLUSION

A la lumière des résultats obtenus au niveau des paramètres physicochimiques mesurés au niveau des eaux superficielles de l'oued Moulouya, on constate une dégradation de la qualité de l'eau particulièrement au niveau de la zone soumise aux rejets d'eaux usées provenant des villes de Missouri, Outat El Haj et Guercif respectivement au niveau des stations S8, S10 et S13. Néanmoins cette contamination a tendance à diminuer aux stations situées loin des rejets urbains. Cette diminution pourrait être liée au phénomène d'autoépuration.

La comparaison de la contamination physicochimique de l'oued Moulouya avec d'autres cours d'eau marocains (Sebou) et mondiaux (seine), montre que celle-ci reste dans les limites tolérables en relation avec le faible développement socio-économique des villes installées sur le bassin versant de l'oued Moulouya.

L'Analyse en Composantes Principales Normées des données physicochimiques nous a permis de faire ressortir la corrélation existante entre les différents paramètres et de différencier une zonalité de la qualité de l'eau dans la région étudiée.

Les concentrations en MES et en DCO sont assez élevées en période pluvieuse dans la station S3 située en aval du centre minier mais la mise en place du barrage Hassan II a diminué les capacités de l'oued à évacuer les polluants émanant de la haute Moulouya vers l'aval car la dynamique fluviale est devenue

très faible et, contribue par conséquent à l'amélioration de la qualité des eaux dans la moyenne et la basse Moulouya.

L'ensemble des résultats montre que les eaux de surface de la Moulouya présentent des signes de dégradation, puisque la majorité des analyses ont révélé des teneurs qui dépassent les normes marocaines, notamment en val des agglomérations urbaines qui génèrent des quantités importantes des eaux usées sans aucun traitement préalable et des déchets solides qui sont éparpillés sur les rives du cours d'eau. De ce fait, la préservation des ressources hydriques devient donc impérative devant la dégradation de ces écosystèmes aquatiques et exige la mise en place des stations d'épuration et des décharges contrôlées pour les villes de Missour, Outat El Haj et Guercif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR, (1997). Qualité de l'eau. Recueil des Normes Françaises Environnement. Tomes 1, 2, 3 et 4. 1372 p.
- AZZAOUI S. (1999). Métaux lourds dans le bassin versant du Sebou, Géochimie, source de pollution et impact sur la qualité des eaux de surface. Thèse de Doctorat national, université Ibn Tofail, Kénitra, Maroc, 130p.
- BENNASSER L. (1997). Diagnose de l'état de l'environnement dans la plaine du Gharb: suivi de la macro-pollution et ses incidences sur la qualité hydrochimique et biologique du bas Sebou. Thèse de doctorat d'état Es Science. Univ. Ibn Tofail; Kenitra, Maroc, 157p.
- BREMOND R., PERRODON C. (1979). Paramètres de la qualité des eaux. Ministère de l'environnement et cadre de vie. Prévention des pollutions. 2ème ed: 259 p.
- BURTON G.A.JR., PITT R.E. (2001). Stormwater effects handbook, a toolbox for watershed managers, scientists, and engineers. CRC/ Lewis Publishers, 875p.
- CHAPMAN D., KIMSTACH V. (1996). Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E and FN Spon, London, pp. 59-126.
- CLAUDE, F., CHRISTIANNE, F., PAUL M., JEAN, D. (1998). Ecologie : Approche scientifique et pratique, 4ème Edition, Lavoisier TEC and DOC, Paris.
- DAVIS J.C. (1984). Statistics and data analysis in geology. 2e édition, WILEY (éditeur), New-york, états-unis, 550 p.
- DELWICHE C.C. (1973). The nitrogen cycle, chemistry in the environment, C.L.Hamilton (dir.de publ.)W.H Freeman et Co., San Fransisco, CA, p: 42.
- DUSSART G.B.J. (1966). Limnologie : l'étude des eaux courantes. Ed. Herman, Paris, 250p.

- EL AMRANI-PAAZA N., BENAVENTE J., CRUZ-SANJULIAN J.J. (1994). Aplicación del análisis de componentes principales al estudio de las características físico-químicas de las aguas del delta del río Adra (Almería, España). *Bol. Geol. Min.*, 3, 478-484.
- EL BLIDI S., FEKHAOUI M. (2003). Hydrologie et dynamique marégraphique de l'estuaire du Sebou (Gharb, Maroc). *Bull. Inst. Sci.*, 25 : 57-65.
- EL BLIDI S., FEKHAOUI M., EL ABIDI A., IDRISSE L., BENAZZOU T., (2006). Contamination des rizières de la plaine du Gharb (Maroc) par des métaux traces. *Vecteur environnement*, janvier, 46-53.
- EL MORHIT M., FEKHAOUI M., SERGHINI A., EL BLIDI S., EL ABIDI A., BENNAKAM R., YAHYAOUY 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). *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, n°30, 39-47.
- EZZAOUAQ M. (1991). Caractérisation hydrodynamique, physico-chimique et bactériologique des eaux superficielles de l'estuaire du Bouregreg (Maroc) soumis aux rejets des villes de Rabat-Salé. Thèse D.E.S. Fac. Sci. Rabat, 140 p.
- FEKHAOUI M. (1990). Recherche hydro biologiques sur le moyen Sebou soumis aux rejets de la ville de Fès: suivi d'une macropollution et évaluation de ces incidences sur les composantes physiques, chimiques et biologiques de l'écosystème. Thèse Doctorat d'Etat Fac. Sci. Rabat, Maroc, 165 p.
- FEKHAOUI M., PATTEE E. (1993). Impact de la ville de Fés sur l'oued Sebou : étude physico-chimique. *Bull. Ins.Sci.(Rabat)*, 17, 1-12.
- HEBERT S., LEGRE 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.
- HIMMI N., FEKHAOUI M., FOUTLANE A., BOURCHIC H., EL MMAROUFY M., BENAZZOUT T., HASNAOUI M. (2003). Relazione plankton-parametri fisici chimici in un bacino dimaturazione (laguna mista Beni Slimane – Morocco. *Rivista Di Idrobiologia*. Università degli studi di Perugia, Dipartimento di Biologia Animale ed Ecologia laboratorio Di Idrobiologia "G.B. Grassi", 110-111p.
- JADAL M., EL AYOUCHE M., BENNASSER L. (2002). Qualité des eaux de l'estuaire de l'oued Om Rbiâ (Maroc) et influence de la dynamique marégraphique. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, 256 : 59-66.
- LEYNAUD G. (1968). Les pollutions thermiques, influence de la température sur la vie aquatique. *B.T.I. Ministère de l'agriculture*, 224-881.
- LUEBS R.E., LAAG A.E. (1973). Ammonia and related gases emanating from a large dairy area, *Calcif. Agric.*; 27 (2), 10.
- MARTIN J.M. (1980). Cycle des éléments chimiques dans les estuaires. *Océanis* 5 (fasc.hors série) : 517 – 520.
- Mc KINNEY M.L. (2002). Urbanization, biodiversity and conservation. *Biosci.*, 52, 883-890.

- MULLISS R.M, REVITT D.M., SHUTES R.B.E. (1997). The impacts of discharges from two combined sewer overflows on the water quality of an urban watercourse. *Water Sci. Technol.*, 36, 195-199.
- NGADI M. (1995). Précipitations et écoulements dans le bassin versant de la Moulouya(Maroc). Thèse, Univ. Montpellier III, France, 333p.
- N.M. (2002). Norme Marocaine de qualité des eaux. Arrêté conjoint du Ministre de l'équipement et du Ministre chargé de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement n° 1275-01 du 10 chaabane 1423 (17 -10-2002) définissant la grille de qualité des eaux de surface. *Bull. Off.* n°5062.du 30 ramadan 1423(5-12-2002).
- NGADI M. (1995). Précipitations et écoulements dans le bassin versant de la Moulouya(Maroc). Thèse, Univ. Montpellier III, France, 333p.
- PRAD, (1999). Projet de Développement et d'Aménagement Régional de l'Oriental. Rapport de prospective. Ministère chargé de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement, de l'Urbanisme et de l'Habitat (Maroc), partie I, 264p.
- RODIER J. (1984) Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 7^{ème} édition, Dunot, Paris.
- RODIER J. (1996). L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eau de mer, 8^{ème} Edition, Dénod, Paris, 1383 p.
- RODIER J., BAZIN C., BROUTIN J.P., CHAMBON P., CHAMPSAUR H., RODI L. (1996). L'analyse de l'eau, 8^{ème} édition. DUNOD (Editeur), Paris, France.
- ROHATGI N., Chen.K.Y. (1975).Transport of trace metals by suspended particulates on mixing with seawater.*J.W.P.C.F.*, Vol.47, n°9, p2298-2316.
- 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, *Marine Pollution Bulletin*, 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. *Journal of Cleaner Production*, 15: 1559–1567.
- UNEP/MAP/MEDPOL. (2004) Guidelines on environmental inspection systems for mediterranean region. MAP technical reports series N° 149.
- VILAIN M. (1989). La production végétale. Vol 2: la maitrise de technique de la production. ED. Lavoisier (ed.J. Baillié).Paris- France.
- W.H.O. (1987). Global pollution and health results of related environmental monitoring. Global Environment Monitoring system, WHO, UNEP.