

Recherche**EPURATION EXTENSIVE DES EAUX USEES EN ZONES
TOURISTIQUES MEDITERRANEENNES (NORD-OUEST DU
MAROC)**Abdeslam ENNABILI³Centre Expérimental MHEA ® de M'Diq⁴, Courriel: aennabili@gmail.com**RESUME**

Les techniques naturelles d'épuration des eaux usées présentent, à l'opposé des techniques classiques, un certain nombre d'atouts invoquant leur application au niveau des zones touristiques et rurales du Maroc méditerranéen. Ce travail expose une classification de l'ensemble des techniques naturelles d'une part et les premiers résultats d'une expérimentation menée à M'Diq (Nord-ouest du Maroc) d'autre part. Le suivi d'un dispositif expérimental de 17 bassins plantés ou non et alimenté par des eaux usées urbaines a permis de formuler, en premier temps, une proposition de filières à optimiser pour le traitement des eaux usées sous climat méditerranéen. En se référant à la qualité physico-chimique des eaux traitées, la filière composée des trois écosystèmes (i) aquatique à microphytes, (ii) semi-aquatique à *Typha angustifolia* et (iii) terrestre à *Arundo donax* montre les meilleurs rendements épuratoires.

Mots clé : M'Diq, épuration, eaux usées, écosystème.

Abstract : *Constructed wetlands for wastewater treatment in Mediterranean tourist zones (NW of Morocco).*

Constructed wetlands for wastewater treatment in Mediterranean tourist zones (NW of Morocco). Contrary to classic techniques, constructed wetlands for wastewater treatment present a number of features recommending their application in tourist and farming zones of the Mediterranean Morocco. This paper underlines a classification of natural techniques and shows the preliminary results of an experimentation led in M'Diq (NW of Morocco). According to an experimental system basing on 17 planted or unplanted basins and supplied with urban wastewater we proposed a multistage system to optimise for wastewater treatment under Mediterranean climate. The "lagoon or aquatic ecosystem / *Typha angustifolia* semi-aquatic ecosystem / *Arundo donax* terrestrial ecosystem" multistage system shows the best water quality improvement.

Key words : M'Diq, wastewater treatment, ecosystem.

INTRODUCTION

Au Maroc méditerranéen, les types d'hébergements touristiques sont caractérisés par une forte proportion de villages à faible taille ne dépassant pas les 1 500 à 2 000 lits. De nombreux centres urbains ont une taille ne dépassant pas les 15 000 habitants. En zones rurales, les agglomérations sont de mêmes ordre de grandeur, voire de taille plus petite.

L'application des techniques classiques d'épuration, comme les stations d'épuration à boues activées, à lits bactériens ou à biodisques, à ce type d'agglomérations présente un certain nombre de désavantages. Elles sont coûteuses³ et très mal adaptées aux variations de

³ Ce travail a été effectué dans le cadre du projet de l'Agence de la Francophonie. Convention n° 24/406005 et 17/322012-52/98 ACCT-FUL

⁴ Adresse actuelle : Institut National des Plantes Médicinales et Aromatiques, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, BP 8691 Fès 30 100 Maroc.

débits des eaux usées que connaissent les zones touristiques. Leur forte production de boues constitue une autre contrainte d'application de ces techniques.

Au Maroc méditerranéen, plusieurs stations classiques ou intensives d'épuration des eaux usées se trouvent déjà hors service. Bien que d'autres centres et complexes touristiques côtiers soient pourvus de stations d'épuration à base de boues activées, elles sont très influencées par le caractère saisonnier de l'activité touristique. Un bon nombre d'entre elles ne sont opérationnelles que pendant l'été avec chloration de l'effluent à leurs sorties. Les contraintes économiques, en terme d'investissement et d'exploitation, font donc des technologies intensives des systèmes peu compatibles pour l'épuration des eaux usées au Maroc. En effet, le Maroc ne favorise pas ces technologies et opte pour les technologies extensives, en particulier le lagunage à microphytes.

Les techniques extensives d'épuration des eaux usées présentent par contre un certain nombre d'atouts invoquant leur application au niveau des zones touristiques et rurales du Maroc méditerranéen. Parmi lesquels, il importe de citer (i) leur adaptabilité aux petites agglomérations, et donc, aux fortes variations de charges ; (ii) leur faible coût en terme de construction et de maintenance et (iii) leur faible demande en énergie (VOUILLOT & BOUTIN 1987, RADOUX & KEMP 1988). Le rendement des systèmes de lagunage à microphytes, bien qu'ils soient adaptés aux variations de charges, peut se dégrader en période estivale par la présence des algues en quantités abondantes.

1. TECHNIQUES EXTENSIVES ESSAYEES AU MAROC

A l'opposé des techniques classiques, existant au Maroc depuis plus de 20 ans, les expérimentations des technologies extensives n'ont débuté qu'aux environs de 1985. Mis à part quelques réalisations réelles (lagunage aéré de Nador) ou pilotes (chenal algal de Takaddoum-Rabat, lagunages de Ouarzazat et de Bejaâd-Khouribga, infiltration contrôlée de Ben Sergao, Agadir), les techniques naturelles d'épuration connaissent une intense expérimentation au Maroc. Elles ont été essayées à l'état expérimental, en stations pilotes ou construites en grandeur nature pour le traitement des rejets d'eaux usées urbaines, domestiques ou industrielles. Elles n'ont intéressé que des zones limitées du pays (Marrakech, Ouarzazate, Agadir, Nador, Khouribga et Rabat). Bien que les objectifs de qualité pour la lutte contre la pollution des eaux ne soient pas encore établis à l'échelle nationale, la plupart des travaux avaient comme objectifs principaux (i) l'évaluation de la capacité épuratrice des macrophytes en les comparant au lagunage à microphytes, (ii) la réutilisation des eaux usées en irrigation et en pisciculture et (iii) la recherche de systèmes simples de traitement des eaux usées.

En sus des lagunes à microphytes (anaérobies, aérobies, facultatives, de maturation ou aérées), on a recouru à l'utilisation de plusieurs espèces végétales de *Spermatophyta* telles *Eichornia crassipes*, *Lemna gibba*, *Phragmites australis* et la luzerne (*Medicago sp.*) ; mais le plus souvent, on ne justifie pas le choix de ces espèces. La classification de ces technologies met en évidence trois types de techniques de traitement :

- le lagunage regroupant aussi bien le lagunage à microphytes (traditionnel ou à haut rendement) que le lagunage à macrophytes (*Eichornia*, *Lemna*) ;
- les lits à héliophytes ou autres, désignant tous des systèmes dominés par les plantes semi-aquatiques (en particulier *Phragmites*) ou fourragères (luzernes) ;
- le procédé à infiltration-percolation consistant en des lits de sables placés en aval d'une lagune anaérobie (Tableau 1).

Il apparaît donc qu'au Maroc, on a porté beaucoup plus d'intérêt au lagunage à microphytes y compris le lagunage aéré, et à la technique d'infiltration - percolation. Les procédés à hélophytes y sont beaucoup moins maîtrisés et on ne connaît pas encore d'applications de systèmes intégrés incluant plusieurs types d'écosystèmes artificiels. Les grandes réalisations correspondent aux stations soit à base de lagunage à microphytes complet, traditionnel ou aéré, soit d'infiltration-percolation. Ces filières engendrent des rendements meilleurs pour des agglomérations atteignant 50 000 EH (équivalent-habitant). Le lagunage aéré de Nador a été rénové pour 100 000 EH, tandis que la station pilote d'infiltration-percolation de Ben Sergao a été testée pour 15 000 EH.

Pour la désinfection, les divers procédés montrent un rendement efficace (Tableau 1). Cependant, l'élimination des polluants *via* ces techniques reste tributaire de plusieurs facteurs dont le temps de séjour, le type de média, l'objectif de qualité du traitement, l'apport en énergie artificielle (aération des lagunes) (BENNANI *ET AL.* 1991, MANDI *ET AL.* 1993 b). La variation des rendements indiqués sur le Tableau 1 dépend aussi de la fréquence d'échantillonnage (une fois par semaine à une fois par mois) et de la durée du suivi scientifique (5 j pour l'infiltration - percolation sur colonne au laboratoire à 2 ans pour le lagunage à microphytes).

Tableau 1. Caractéristiques générales des techniques extensives d'épuration essayées au Maroc.

Paramètres	Lagunage	Lits à hélophytes ou autres	Infiltration - Percolation
Critères de dimensionnement			
Charge totale (EH)	50 000-100 000	-	15 000
Superficie totale (ha)	0.0024-16	-	0.75
Longueur/largeur des bassins	-	1-2.5	-
Profondeur des bassins (m)	0.3-3	-	2*
Norme (m ² /EH)	1-4	1-4	1-4
Charge hydraulique (m ³ /j)	0.003-2 500	-	750 (0.17m ³ /m ² j)
Type de flux	superficiel	superficiel	superficiel et vertical
Temps de séjour (j)	7-50	-	-
Charge polluante	400 kg DCO/ha j	240 kg DBO ₅ /ha j	-
Rendements			
Matières en suspension (MES)	27.0-98.0	74.0-98.0	90.0-100.0
Demande chimique en oxygène (DCO)	50.0-95.0	36.0-95.0	80.0-95.0
Demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	52.0-82.0	43.0-90.0	95.0-97.0
Azote global (NG)	-	-	19.0-85.0
Azote total kjeldhal (NTK)	41.0	-	76.0-100.0
Ammonium (NH ₄ ⁺)	23.0-78.0	<0.0-98.0	86.0
Phosphore total (PT)	33.0	<0.0-30.0	43.0-94.0
Ortophosphates (PO ₄ ³⁻)	26.0-72.0	<0.0	-
Germes pathogènes	-	-	100.0
Coliformes fécaux (Col. f.)	94.2-100.0	44.7-99.9	-
Streptocoques fécaux (Strept. f.)	99.2-99.7	-	-
Parasites (oeufs, kystes)	100.0	-	100.0
Helminthes (oeufs)	85.5-100.0	100.0	-
Nématodes (oeufs, larves)	86.0-100.0	-	-
Cestodes (oeufs)	100.0	-	-
Matières extraites au chloroforme	65.0	-	-
Hydrocarbures saturés	67.0	-	-
Hydrocarbures aromatiques	22.0	-	-

Corpus : Fsm (1987), Cse (1990), Bennani et al. (1991), Karioun et al. (1991), Khallaayoune et al. (1991), Bouarab et al. (1993), El Hammouri et al. (1993), Geanah & Nrhira (1993), Mandi et al. (1992, 1993), Bousselhaj & Ouazzani (1994), El Boukfaoui Knidiri et al. (1994), Mam (1994), Mandi (1994), Cle-Etudes & Darley, Sogea & Gtgc. * hauteur de sable filtrant.

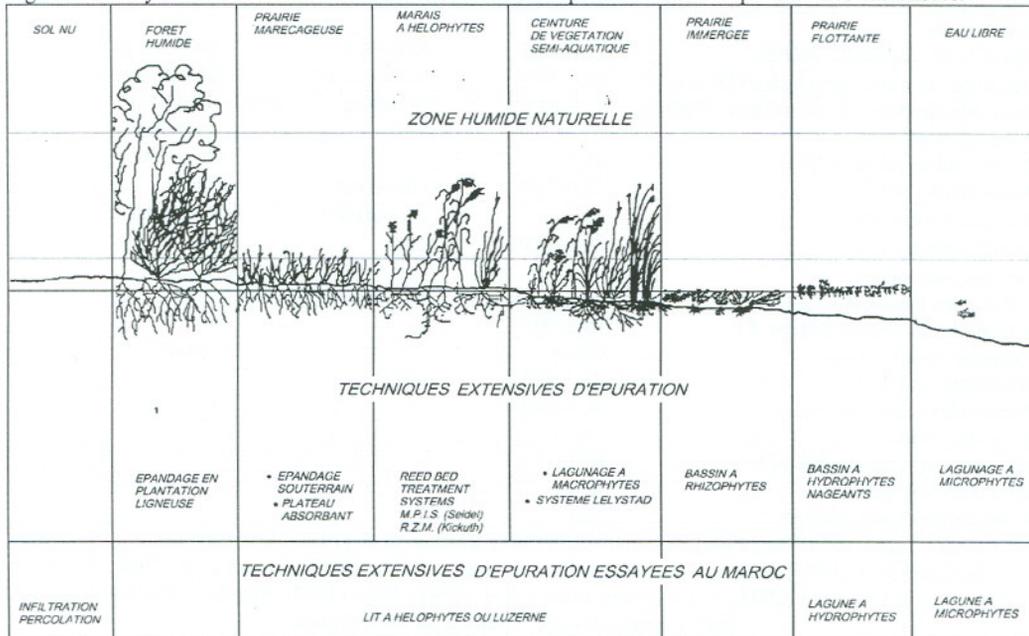
Cependant, ces techniques douces ou naturelles d'épuration présentent plusieurs limites d'application telles la grande emprise au sol, le problème de nuisances (odeurs,

moustiques), la production de biohydrocarbures, le développement des algues durant la saison chaude, l'éventualité du relargage des formes minérales dont le phosphore au niveau des lits de sable, la forte transpiration de certains macrophytes (ABOUZEID 1991, MANDI ET AL. 1993 a). Une expérimentation comparative sous les mêmes conditions locales des divers systèmes extensifs d'épuration en vue d'optimiser des techniques ou filières de traitement des eaux usées paraît donc être nécessaire.

1.1. Optimisation de filières d'épuration naturelle: Mosaïque Hiérarchisée d'Ecosystèmes Artificiels (MHEA)

Les diverses techniques extensives actuelles d'épuration existant de par le monde ont été classées en de grands ensembles par RADOUX (1996) tout en établissant au moins leur lien de fonctionnement avec les différents écosystèmes de la zone humide naturelle (Figure 1). Le même auteur souligne que pour un traitement des eaux usées, ces technologies d'épuration présentent bien d'avantages et d'inconvénients ; d'autant plus, elles sont incomparables si on se limite aux résultats acquis de manière sporadique et non standardisée (conditions non contrôlées). Depuis 1977, cet auteur a mené une recherche comparative et systématique de diverses technologies extensives. Ces recherches ont débouché sur les principales conclusions suivantes : (i) aucune technologie ne surpasse les autres pour tout paramètre de pollution et en toute saison ; (ii) des rendements épuratoires conformes aux normes de l'Union Européenne peuvent être atteints en appliquant une filière d'épuration performante constituée d'écosystèmes artificiels optimisés ; (iii) l'ensemble des étapes expérimentales de comparaison systématique ainsi que d'amélioration progressive en vue d'optimiser les filières d'épuration constitue la Mosaïque Hiérarchisée d'Ecosystèmes Artificiels (MHEA) ; (iv) toute filière d'épuration demeure étroitement dépendante des conditions locales (macroclimat, type des eaux usées, contexte socio-économique) et son transfert dans un autre contexte climatique et socio-économique est à déconseiller (RADOUX 1996).

Figure 1 : Ecosystèmes de la zone humide naturelle et techniques extensives d'épuration des eaux usées.



Source : Radoux (1996), Ennabili (1999).

Une filière d'épuration MHEA optimisée, développée sous climat tempéré atlantique, est actuellement constituée d'une succession d'"eau libre-marais artificiel-épandage souterrain mixte planté d'espèces ligneuses", mettant en jeu les trois types d'écosystèmes de la zone humide naturelle : aquatique, semi-aquatique et terrestre. Cette filière optimisée a été appliquée à petite comme à grande échelle (4 EH et 15 000 EH) et engendre des rendements épuratoires respectant les normes les plus sévères pour l'épuration primaire, secondaire, tertiaire (en particulier l'azote) et quaternaire ou désinfection (RADOUX 1996).

Le présent travail décrit l'expérimentation relative à la méthodologie de recherche MHEA en zones touristiques méditerranéennes et présente les premiers résultats obtenus.

2. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE SOUS CLIMAT

MEDITERRANEEN A M'DIQ

Etant convaincu au moins à l'échelle du Maroc méditerranéen de l'incompatibilité des techniques classiques ou compactes aux petites et moyennes communautés (centres et complexes touristiques, agglomérations rurales), l'application des systèmes naturels ou extensifs s'impose promptement.

En intégrant les divers aspects étudiés de la végétation hygrophile du Maroc méditerranéen, trois types d'espèces potentiellement utiles en épuration des eaux usées ont été retenus à partir de 221 hygrophytes identifiés (ENNABILI ET AL. 1996, 1998, 2000, 2005) :

- *Lemna gibba* pour les écosystèmes aquatiques ;
- *Phragmites australis*, *Typha angustifolia* et *Sparganium erectum* pour les écosystèmes semi-aquatiques ;
- *Arundo donax*, *Tamarix gallica*, *Populus euphratica* et *Salix purpurea* pour les écosystèmes terrestres.

Les essais d'expérimentation de ces espèces en traitement des eaux usées ont eu lieu au Centre Expérimental de M'Diq (Nord-ouest du Maroc), projet financé par la Région wallonne de Belgique au travers l'Agence de la Francophonie et en réalisation par la Fondation Universitaire Luxembourgeoise (Belgique) en étroite collaboration avec l'Université Abdelmalek Essaâdi de Tétouan, le Centre National de Coordination et de Planification de la Recherche Scientifique et Techniques de Rabat et la Régie Intercommunale de Distribution d'Eau et d'Electricité de la Wilaya de Tétouan. En effet, 17 bassins expérimentaux - répartis en trois niveaux de traitement et correspondant à huit filières miniatures- ont été mis au point pour cette fin (Figures 2 et 3).

2.1. Campagnes d'échantillonnage et analyses

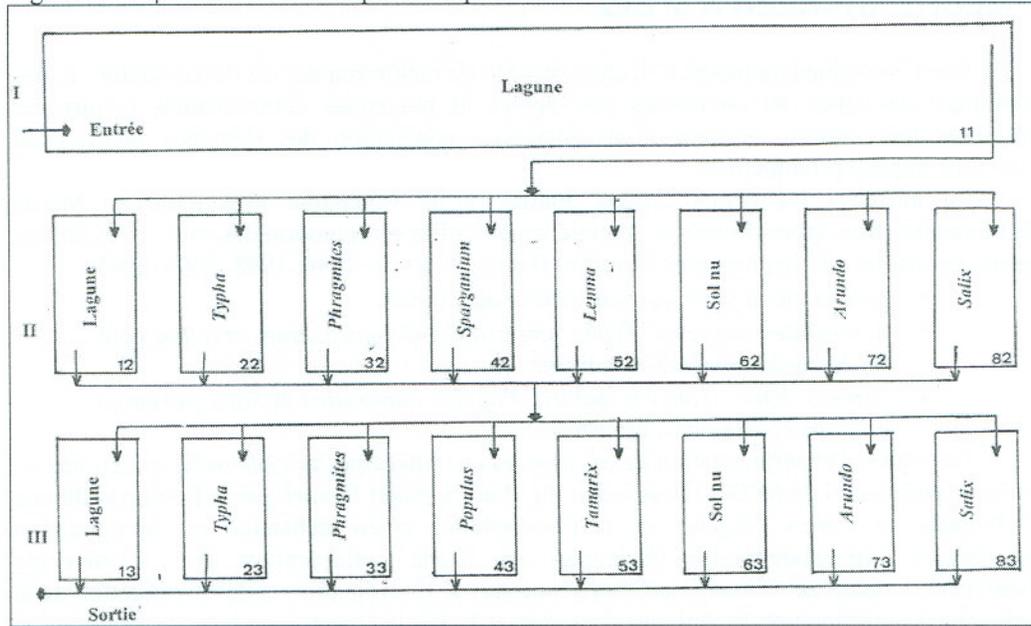
Dix-huit campagnes d'échantillonnage instantané des eaux usées à l'entrée et à la - sortie de chaque écosystème et à chaque niveau (soit 19 échantillons au total pour chaque campagne) ont été menées tous les 14 jours en vue d'évaluer, dans un premier temps, le rendement épuratoire de ces systèmes d'épuration.

Les méthodes analytiques des eaux sont conformes au *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA-AWWA-WEF 1995). En effet, cinq paramètres ont été suivis :

- Matières en suspension (MES) : un système de filtration sous vide est utilisé pour leur estimation sur base de 100 ml par échantillon. Le poids des MES s'obtient en ôtant le poids initial du filtre préalablement séché de son poids final après filtration et séchage à 105°C.

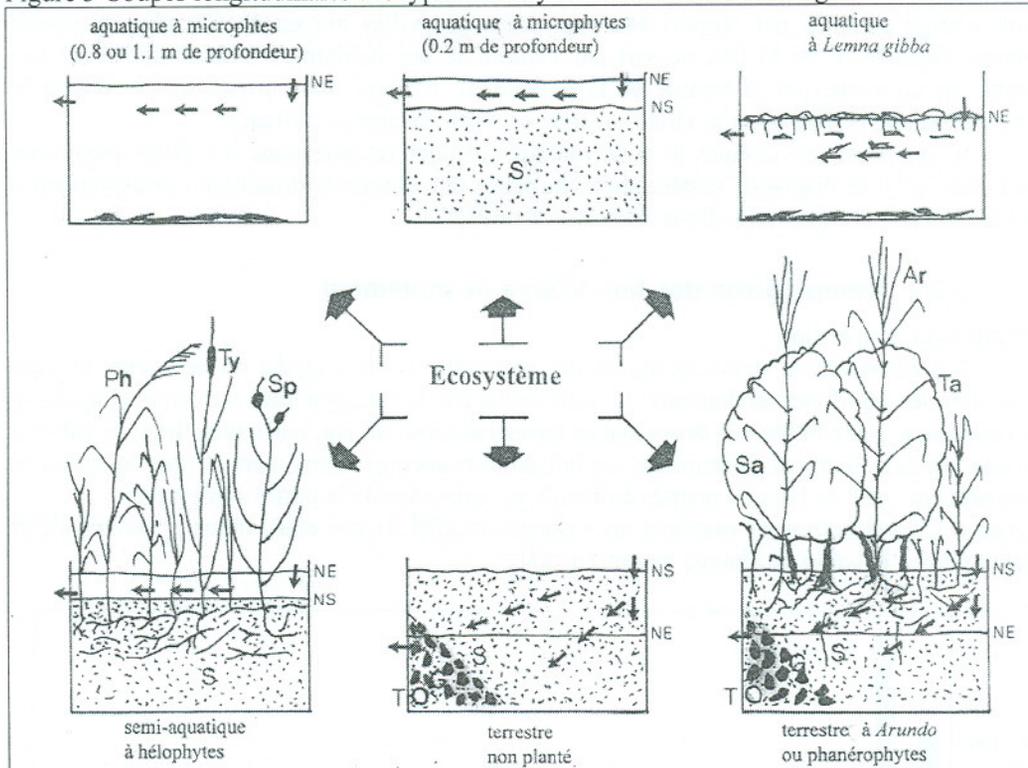
- Demande chimique en oxygène (DCO) : elle a été évaluée selon les méthodes d'analyses APHA-AWWA-WEF (1995). La DCO est déterminée selon une oxydation à chaud (120°C) par le bichromate de potassium en milieu acide pendant 2 heures. La lecture des échantillons a été faite au spectrophotomètre DR4000. La valeur de la DCO correspondant à chaque échantillon est lue directement en $\text{mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$.
- Demande biologique en oxygène pendant 5 jours (DBO_5) : en fonction de la DCO, un volume bien déterminé pour chaque échantillon est introduit dans une bouteille DBO_5 équipée pour lecture automatique (WTW, 1996). L'incubation des bouteilles DBO_5 préparées se fait dans une enceinte thermostatée à 20°C.

Figure 2 Vue d'ensemble du dispositif expérimental.



Légende : Les chiffres romains dénotent le niveau de traitement. Les chiffres arabes indiquent les numéros des bassins (premier chiffre) et le niveau de traitement (deuxième chiffre).

Figure 3 Coupes longitudinales des types d'écosystèmes artificiels aménagés.



Abréviations : G, galets ; NE, niveau de la nappe ; NS, niveau du sol ; S, sable ; T, tuyau de drainage ; les flèches simulent le sens de la circulation de l'eau (flux). Plantations : Ar, Arundo donax ; Ph, Phragmites australis ; Sa, Salix purpurea ; Sp, Sparganium erectum ; Ta, Tamarix gallica ; Ty, Typha angustifolia.

- Azote global (NG) et phosphore total (PT) : ces deux paramètres ont été déterminés en utilisant les méthodes d'analyses HACH (1997). La lecture des résultats, en mg N.l^{-1} ou mg P.l^{-1} , a été effectuée au niveau du spectrophotomètre DR4000.

2.2. Résultats et discussion

2.2.1. Caractéristiques des eaux usées de M'Diq

Les eaux usées qui alimentent le dispositif expérimental sont refoulées à partir d'une station de pompage située au sein de l'agglomération urbaine de M'Diq. Selon la classification retenue par le Ministère de la Population, cette ville fait partie des villes moyennes dont la population est comprise entre 20 000 et 100 000 habitants. Ce type d'agglomérations générerait une charge polluante de DBO₅ (demande biologique en oxygène)/DCO (demande chimique en oxygène)/MES (matières en suspension) de l'ordre de 350 $\text{mgO}_2.\text{l}^{-1}$ /950 $\text{mgO}_2.\text{l}^{-1}$ /400 mg.l^{-1} . La dose unitaire de rejet est estimée à 70 $\text{l.hab}^{-1}.\text{j}^{-1}$ (ONEP & GTZ 1998).

En se basant sur les premières analyses que nous avons effectuées, les eaux usées de M'Diq sont faiblement chargées à l'entrée du dispositif expérimental. En terme du phosphore total (PT), elles sont moins chargées que la moyenne nationale. Dans notre cas, le rapport DBO₅/PT est égal à 29, contre 26 rapporté par ONEP & GTZ (1998). Pour la DBO₅, elles font partie des types d'eaux usées caractérisant les villes moyennes (ONEP & GTZ 1998,

ENNABILI 1999). La station de pompage des eaux usées située en amont du dispositif expérimental constituerait alors un ouvrage de prétraitement ; ce qui expliquerait leur relative faible charge en MES par rapport aux eaux usées des villes moyennes. De plus, le réseau unitaire d'égouttage de M'Diq ne sert pas l'ensemble des habitants ; L'alimentation en eau potable ne concerne pas la totalité de la population. Il serait donc erroné de considérer le centre urbain de M'Diq comme ville moyenne en terme de charge polluante.

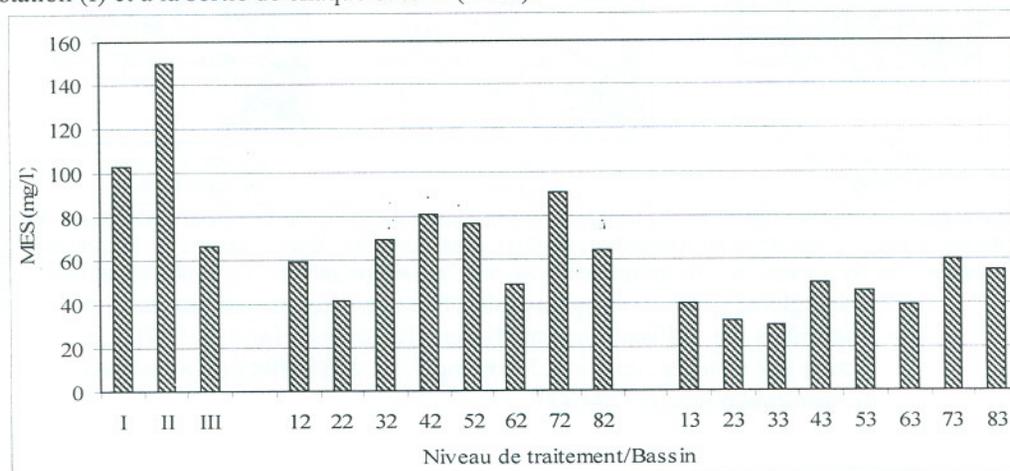
Si on prend en compte la dose unitaire de rejet retenue pour les villes moyennes ($70 \text{ l. hab.}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$), le dispositif expérimental traiterait une charge hydraulique correspondant à 18 EH, soit une charge hydraulique d'environ $3 \text{ m}^2 \cdot \text{EH}^{-1}$.

2.2.2. Comparaison des huit filières de traitement

- Matières en suspension :

Les écosystèmes semi-aquatiques (en particulier celui à *Typha* du deuxième niveau) présentent les meilleurs rendements. Ils sont suivis par les écosystèmes terrestres (Figure 4). Le rendement assez faible des écosystèmes terrestres serait dû aux particules fines du substrat qui passent dans le tuyau de drainage. Ce fait serait beaucoup moins marqué pour le sol nu en comparaison avec les bassins plantés du fait de la croissance de la partie souterraine.

Figure 4 Concentration en matières en suspensions (MES) des eaux usées à l'entrée de la station (I) et à la sortie de chaque bassin. (n=17).



- Demandes biologique et chimique en oxygène :

Leur rétention est efficace au niveau des écosystèmes terrestres du deuxième et troisième niveaux. Pour les semi-aquatiques, le bassin à *Typha* du deuxième niveau montre les meilleurs rendements épuratoires (Figures 5 et 6).

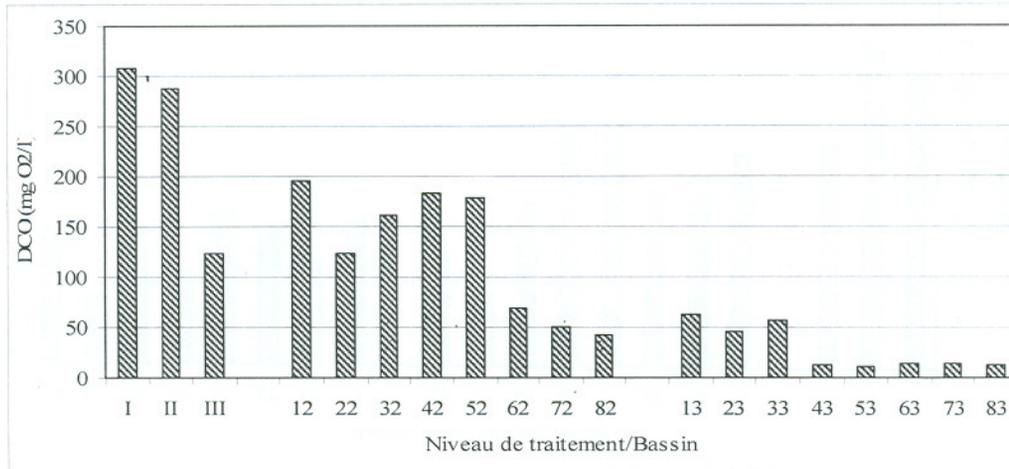
- Azote global :

Son rabattement par rapport à l'entrée est plus important au niveau des écosystèmes terrestres surtout celui à *Arundo*. Parmi les écosystèmes semi-aquatiques du deuxième niveau, les bassins à *Typha* ou *Phragmites* éliminent plus d'azote (Figure 7).

- Phosphore total :

Les rendements épuratoires des écosystèmes terrestres en général et celui à *Arundo* du deuxième niveau sont plus élevés. Ils sont suivis par l'écosystème aquatique à *Lemna* du deuxième niveau et l'écosystème semi-aquatique à *Phragmites* du troisième niveau (Figure 8).

Figure 5 Demande chimique en oxygène (DCO) à l'entrée de la station (I) et à la sortie de chaque bassin. n=17.



En terme de la DCO et de la DBO₅, les sorties des huit filières répondent aux normes de rejet prescrites par la directive européenne 91/271/CEE pour les agglomérations de 10 000 à 100 000 EH (35 mg.l⁻¹ de MES, 125 mg.l⁻¹ de DCO, 25 mg.l⁻¹ de DBO₅, 15 mg.l⁻¹ de NG et 2 mg.l⁻¹ de PT) et celles recommandées pour la Wilaya de Tétouan en 2000 (30 mg.l⁻¹ de MES et 30 mg.l⁻¹ de DBO₅) ou en 2015 (20 mg.l⁻¹ de DBO₅). Pour ces paramètres, les sorties des écosystèmes terrestres (sauf celle de l'écosystème à *Populus* pour la DBO₅) correspondent à une qualité excellente des eaux superficielles (BRYLLER-ISKANE-SHELADIA 1992, DGH 1998). Mis à part l'écosystème à *Populus*, les concentrations en azote global à la sortie de toutes les filières respectent les normes de rejet définies par la directive européenne précitée. Pour le phosphore total, les sorties des écosystèmes terrestres sont conformes à ladite directive.

Les concentrations en MES à la sortie des écosystèmes terrestres sont plus élevées que les normes recommandées pour la Wilaya de Tétouan. Ce paramètre ne peut servir de référence pour juger l'efficacité épuratrice des écosystèmes terrestres dans notre cas, vu l'inconvénient technique que nous avons susmentionné.

Figure 6 Demande biologique en oxygène (DBO₅) à l'entrée de la station (I) et à la sortie de chaque bassin. n=8.

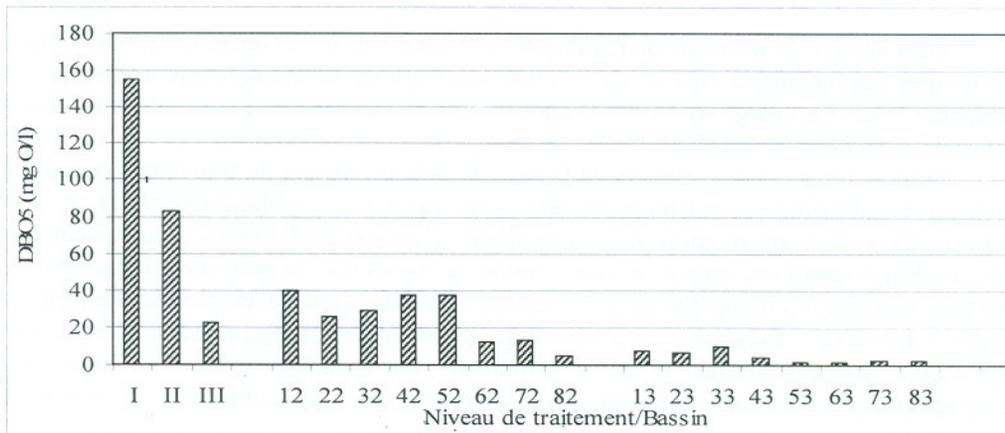


Figure 7 Teneur en azote global (NG) des eaux usées à l'entrée de la station (I) et à la sortie de chaque bassin. n=17.

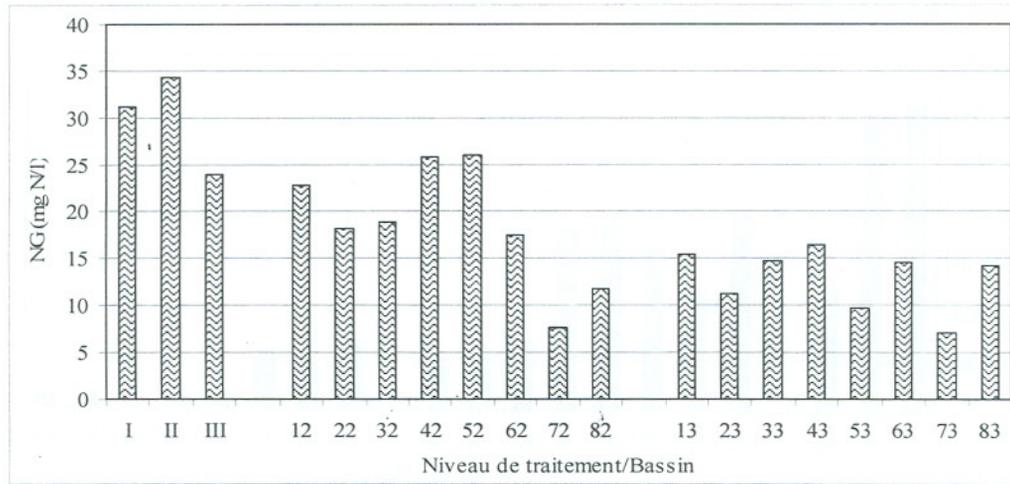
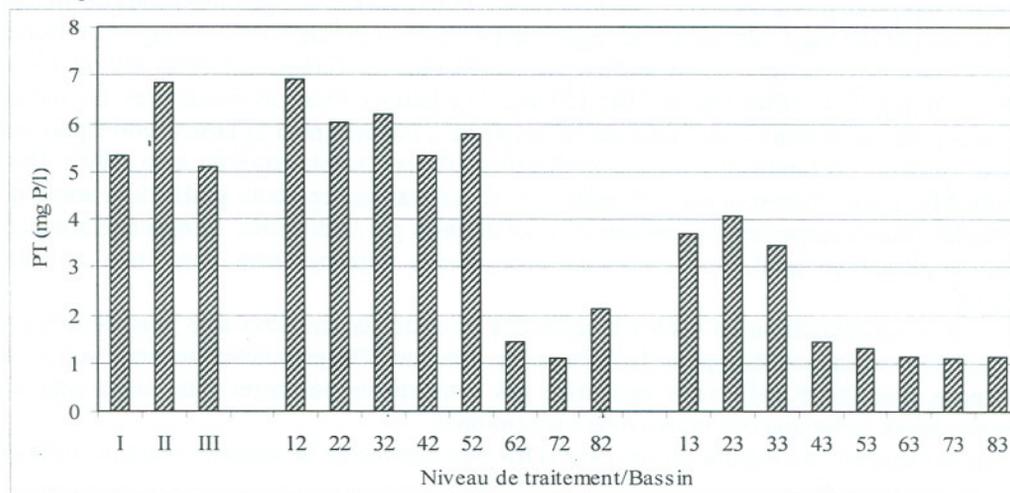


Figure 8 Teneur en phosphore total (PT) des eaux usées à l'entrée de la station (I) et à la sortie de chaque bassin. n=17.



Déjà au deuxième niveau de traitement, tous les écosystèmes terrestres sont conformes aux normes sus-indiquées, sauf le sol nu pour l'azote global et l'écosystème à *Salix* pour le phosphore total. La charge hydraulique dans ce cas est de l'ordre de $2 \text{ m}^2 \cdot \text{EH}^{-1}$, au lieu de $3 \text{ m}^2 \cdot \text{EH}^{-1}$ si on inclut le troisième niveau de traitement.

D'après les premiers résultats, la lagune du premier niveau de traitement devrait être suivie en deuxième niveau par un écosystème semi-aquatique à *Typha angustifolia* en cas de propositions pour la construction de stations pilotes. L'utilisation d'un écosystème aquatique à *Lemna gibba* pourrait être utile si on veut éliminer le phosphore ; le prélèvement régulier de la biomasse produite, au moins toutes les semaines, serait nécessaire. L'emploi des écosystèmes terrestres à ce niveau causerait sans doute des problèmes de colmatage puisque les eaux usées sont encore chargées surtout en charge particulaire. Au troisième niveau, les écosystèmes terrestres en particulier celui à *Arundo donax* générerait des rejets conformes aux normes les plus sévères.

2.2.3. Contribution potentielle des macrophytes dans le processus de traitement

Les macrophytes accumulent d'énormes quantités d'azote et du phosphore au niveau de leurs tissus grâce à leur système de nutrition et/ou de fixation. Appliqués au traitement des eaux usées, ils pourraient jouer un rôle crucial dans l'élimination de ces deux éléments caractérisant l'épuration tertiaire à condition de couper et/ou collecter régulièrement les biomasses exportables (RADOUX 1987). Chez *Phragmites australis* par exemple, le phosphore accumulé dans les parties jeunes (feuilles, bourgeons) se restitue aux rhizomes à la fructification (*in* BLACKKE & DUBOIS 1982). D'où l'intérêt du prélèvement des biomasses aériennes juste après la floraison.

En plus de l'assimilation directe des nutriments, les macrophytes présentent plusieurs avantages en traitement des eaux usées. La contribution potentielle indirecte des macrophytes dans l'amélioration de la qualité des eaux usées se note à plusieurs niveaux :

- Au niveau des parties submergées, ils offrent la surface pour la fixation du périphyton et des bactéries qui transforment les polluants et réduisent leurs concentrations.
- Ils permettent une oxygénation des rhizosphères et/ou de la nappe d'eau, favorisant ainsi les microorganismes aérobies.
- Ils développent un réseau racinaire qui constitue, à côté des tiges immergées, une barrière physique accélérant la décantation des matières en suspension et stabilisant la surface du sol.
- Les macrophytes enracinés favorisent une infiltration élevée grâce à leur système souterrain et évitent par suite le colmatage des bassins.
- La profondeur d'enracinement augmente le volume de la rhizosphère par surface.
- Ils génèrent le carbone nécessaire pour les bactéries responsables de la transformation d'azote.
- Par l'effet d'ombrage, les macrophytes empêchent le développement des algues qui dégradent parfois le rendement en charge particulaire.
- Certains macrophytes présentent une nutrition hétéro-autotrophe.
- Les exsudats racinaires des macrophytes peuvent avoir un effet bactéricide.

CONCLUSION

Les techniques extensives d'épuration constituent l'unique voie socio-économiquement adaptable pour dépolluer les eaux usées des petites et moyennes agglomération du Maroc méditerranéen. Ces techniques présentent tellement de limites et d'imperfections en terme d'exploitation. Leur expérimentation sur place en développant la méthodologie MHEA (Mosaïque Hiérarchisée d'Ecosystèmes Artificiels) s'avère nécessaire. Une telle expérimentation repose, entre autres, sur des éléments de la zone humide naturelle, et se fonde sur deux étapes : la comparaison et l'optimisation de l'efficacité épuratrice des écosystèmes reconstitués ou artificiels d'épuration des eaux usées.

Avec une charge hydraulique des eaux usées de $3 \text{ m}^2 \text{ EH}^{-1}$, appliquée à la station expérimentale de M'Diq, la filière "écosystème aquatique à microphytes / écosystème semi-aquatique à *Typha angustifolia* / écosystème terrestre à *Arundo donax*" donne les meilleurs résultats en terme de rendement épuratoire. Elle respecte les normes de pollution physico-chimique recommandées à l'échelle locale jusqu'au l'an 2015. Cependant, ces résultats ne concernent que la première étape de la phase comparative suivant la méthodologie MHEA. La finalisation de cette phase permettrait l'optimisation d'une ou des filières d'épuration des eaux usées adaptées à l'échelle régionale.

BIBLIOGRAPHIE

- ABOUZEID H. 1991. L'état de l'expérimentation et de la recherche en matière de réutilisation des eaux usées au Maroc. *Eau & Développement Maroc*, 10 pp : 6-11.
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) & WEF (Water Environment Federation) 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA, USA.
- BENNANI M., LARY J., NRHIRA A., RAZOUKI L., BIZE J., NIVAUULT N. 1991. Une première au Maghreb : traitement des eaux usées urbaines par lagunage anaérobie, Station d'épuration de Ben Sergao (Agadir). *Eau et Développement Maroc*, 11 pp : 20-24.
- BLACKIE G., DUBOIS J.P. 1982. *Epuration des eaux : Rôles des macrophytes aquatiques dans l'élimination des éléments minéraux*. In "J.J. Symoens & P. Compère (ed.): *Studies on Aquatic Vascular Plants*", Roy. Bot. Soc. of Belgium, pp : 315-323.
- BOUARAB L., AIT YASSINE, LAAKARI, LOUDIKI M. 1993. Etude préliminaire du fonctionnement d'un écosystème artificiel traitant une eau usée. Le lagunage naturel de la ville de Ouarzazate. Séminaire "La Recherche nationale dans le Domaine Eau et Environnement", Casablanca, pp : 409-418.
- BOUSSELHAJ K., OUZZANI N. 1994. *Etude expérimentale sur le traitement des eaux usées par infiltration - percolation : Elimination de la pollution carbonée, azotée et phosphorée*. Colloque "Ecologie et Stratégies de Développement des villes intérieures". Université S. Md. B. Abdellah, Fès.
- BRYLER-ISKANE-SHELADIA (Groupement d'Etude) 1992. *Etude du schéma directeur d'assainissement liquide de la ville de Tétouan*. Synthèse de la mission A, Municipalité de Tétouan.
- CLE-ETUDES & Darley J. *Pour une épuration naturelle des eaux usées au Maroc*. Marcel Brunel, Rabat.
- CSE 1990. *Préservation du patrimoine hydraulique. Protection de la qualité des eaux contre la pollution*. Rapport du Conseil Supérieur de l'Eau, Maroc, 5^e Session.
- DGH (Direction Générale de l'Hydraulique). 1998. *Etat de qualité des ressources en eau au Maroc*. 1995-1996. Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau. Maroc.
- EL BOUKFAOUI KNIDIRI N., BITAR H., MILLE G. 1994. Contribution à l'étude des teneurs en hydrocarbures des eaux de surface des lagunes expérimentales de la ville de Marrakech (Maroc). *Revue de la Faculté des Sciences, Marrakech*, 8 pp : 59-69.
- EL HAMMOURI B., MEKRANE M., KHALLAAYOUNE K., MERZOUKI M., EL MAAROUFY M. 1993. Performances des bassins de stabilisation de la station Ouarzazate. Séminaire "La Recherche nationale dans le Domaine Eau et Environnement", Casablanca, pp : 261-268.
- ENNABILI A., A TER M. & RADOUX M. 2000. Biomasse et accumulation des NPK chez *Scirpus litoralis* et *Scirpus maritimus* aux marais Smir-Negro (NW Maroc). *Acta Bot. Barc.*, 46:5-16.
- ENNABILI A., ATER M. & RADOUX M. 1998. Biomass production and NPK-retention in macrophytes from wetlands of Tingitan Peninsula. *Aquatic Botany*, 62 pp : 45-56.
- ENNABILI, A. & M. ATER. 1996. Flore (*Pteridophyta* et *Spermatophyta*) des zones humides du Maroc méditerranéen: Inventaire et écologie. *Acta Botanica Malacitana*, 21 pp : 221-239.
- ENNABILI A., M. ATER 2005. Diversité floristique et production de biomasse des macrophytes des marais Smir. *Trav. Insti. Sci. Rabat, série générale* 4 pp : 17-25
- ENNABILI, A. 1993. *Epuration des eaux usées de petites agglomérations par Mosaïque Hiérarchisée d'Ecosystèmes artificiels. Possibilités d'application sous climat méditerranéen*. Rapport DES, Arlon-Belgique.
- ENNABILI, A. 1999. *Végétation hygrophile du Maroc méditerranéen: écologie, socio-économie et rôle potentiel dans l'épuration des eaux usées*. PhD. Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Arlon-Belgique.

- ENNABILI, A., NABIL, L. & M. ATER. 1996. Importance socio-économique des hygrophytes au Nord-ouest du Maroc. *Al Biruniya, Rev. Mar. Pharm.*, 12 (2) pp : 95-120.
- FSM (Faculté des Sciences de Marrakech) 1987. *Le lagunage expérimental à Marrakech*. Compte rendu des activités scientifiques.
- GEANAH M., NRHIRA A. 1993. Epuration des eaux usées par infiltration percolation dans les sables dunaires. Station prototype de Bensergao. Séminaire "La Recherche nationale dans le Domaine Eau et Environnement", Casablanca, pp : 241-254.
- HACH 1997. Spectrophotomètre DR 14 000. Méthodes d'analyses – HACH Company – USA.
- KARIOUN, MARA, MILLS, GHACHTOUL 1991. *Appropriate wastewater treatment and reuse in Morocco. Boujad, a case study*. VII^e Congrès Mondial des Ressources en Eau "Gestion des Ressources en Eau", Rabat.
- KHALLAAYOUNE K., CHALABI M, AGOUMI A., EL HAMMOURI B. 1991. Qualité parasitologique des eaux usées domestiques de Rabat après épuration dans un chenal algal à haut rendement. VII^e Congrès Mondial des Ressources en Eau "Gestion des Ressources en Eau", Rabat.
- MAM (Ministère de l'Agriculture et de la Mise en Valeur agricole, Maroc) 1994. *Réutilisation des eaux usées à des fins agricoles*. Projet MOR 86/018, PNUD/FAO/OMS, Administration Génie rural.
- MANDI L. 1994. Marrakesh wastewater purification experiment using vascular aquatic plants. *Eichhornia crassipes* and *Lemna gibba*. *Water Science & Technology*, 29 (4) pp : 283-287.
- MANDI L., DARLEY J., BARBE J., BALEUX 1992. Essai d'épuration des eaux usées de Marrakech par la jacinthe d'eau (charges organique, bactérienne et parasitologique). *Revue des Sciences de l'Eau*, 5 : 313-333.
- MANDI L., OUZZANI N., BOUHOUM K., BOUSSAID A. 1993a. Wastewater treatment by stabilisation ponds with and without Macrophytes under arid climate. *Water Science & Technology*, 28 (10) pp : 177-181.
- MANDI, L., N. OUZZANI, KH. BOUHOUM & B. IMZILN. 1993b. *Expérimentation sur l'épuration des eaux usées de Marrakech pour différents types de systèmes extensifs*. Séminaire "La Recherche nationale dans le Domaine Eau et Environnement", Casablanca, pp : 255-260.
- ONEP & GTZ (Office Nationale de l'Eau Potable & Deutsche, Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit). 1998. *Approche de la typologie des eaux usées urbaines au Maroc*. Coopération Technique Maroco-Allemande.
- RADOUX M. 1987. Epuration des eaux usées domestiques par hydrosères reconstituées sous climat tempéré. Hypothèses d'application sous climat sahélien. *Trib. Cebedeau*, 518 (40) pp : 11-20.
- RADOUX M. 1996. *L'utilisation rationnelle de l'épuration par voie naturelle des eaux usées urbaines dans les pays du sud*. Forum des Chercheurs du Sud "L'eau et les Hommes", Louvain la neuve.
- RADOUX M., KEMP D. 1988. Epuration comparée des eaux usées domestiques par trois plantations héliophytiques et par un lagunage à microphytes sous un même climat tempéré. *Acta Oecol. App.* 9 (1) pp : 25-38.
- SOGEA & GTGC (Groupement d'entreprises). *Station d'épuration des eaux usées de la ville de Nador*. Municipalité de Nador, Maroc.
- VOUILLOT M., BOUTIN C. 1987. Les systèmes rustiques d'épuration : aspects de l'expérience française ; possibilités d'application aux pays en voie de développement. *Trib. Cebedeau*, 518 (40) pp : 21-31.
- WTW 1996. Systèmes de mesures de DBO manométrique intégrés en enceinte thermostatique. Wissenschaftlich – Technische Werskstätten – Gmbtt, Weilheim, Germany.