

Performances physico-chimiques d'épuration des bassins de stabilisation et du lagunage à haut rendement dans les conditions marocaines

Ahmed RAMI¹ & Bouchaïb EL HAMOURI^{1a}

(Reçu le 18/10 /2000 ; Accepté le 24/01/2001)

نتائج التصفية بواسطة الأحواض ذات المردود العالي مع الأحواض التثبيتية

تهدف هذه الدراسة إلى مقارنة مردود التصفية بواسطة سلاكتين لتطهير المياه المستعملة. الأولى من نوع الأحواض التثبيتية (BDS) وتتكون من حوض لاهوائي، ثلاثة أحواض هوائية-لاهوائية (3BF) وحوضين للنضج (2BM). السلاكة الثانية من نوع أحواض ذات مردود عالي (LHR) وتتكون من حوض لاهوائي، الحوض ذو المردود العالي للطحالب (CAHR) وحوضين للنضج (2BM). تم إنجاز السلاكتين في نفس المكان لتستقبل نفس المياه المستعملة وتتقاسم نفس الطريقة لمرحلة ما قبل التصفية. اعتماداً على مردود التصفية الظاهري تبين أنه لا يوجد فرق واضح على مستوى مردود التصفية بواسطة السلاكتين بما أنهما تنتجان مياه من صنف A حسب ترتيب المنظمة العالمية للصحة. لكن وبإدخال، FSE، الذي يترجم مفا فعالية استعمال المساحة المغطاة بواسطة السلاكة، أبان عن تفوق السلاكة LHR على السلاكة BDS.

الكلمات المفتاحية : مياه مستعملة- تصفية- حوض ذو مردود عالي- أحواض تثبيتية- مواد عضوية- نتروجين- فوسفور- مساحة

Performances physico-chimiques d'épuration des bassins de stabilisation et du lagunage à haut rendement dans les conditions marocaines

Les performances physico-chimiques de deux filières d'épuration des eaux usées ont été comparées. La première, du type bassins de stabilisation (BDS), était composée d'un bassin anaérobie, de trois bassins facultatifs et de deux bassins de maturation. La deuxième filière était du type lagunage à haut rendement (LHR). Elle comportait un bassin anaérobie, un chenal algal à haut rendement (CAHR) et deux bassins de maturation. Les deux filières ont été placées dans le même site. Elles recevaient la même eau usée et partageaient la même unité de pré-traitement. Les rendements d'épuration apparents n'ont pas montré de différences significatives entre les deux filières puisque l'une et l'autre conduisaient à un effluent de catégorie A de l'OMS. Cependant, l'expression des résultats, en termes de flux spécifique éliminé (FSE), qui traduit l'efficacité d'utilisation du m² de terrain couvert, a mis en évidence la supériorité de la LHR sur les BDS.

Mots clés : Eaux usées Épuration - Lagunage à haut rendement - Bassins de stabilisation - Charge organique - Nutriments (N, P) - Flux spécifique éliminé

Physicochemical performance of waste stabilization ponds and high-rate ponds system under Moroccan conditions

Performance of two wastewater treatment units were compared. The first unit consisted of a train of Waste Stabilization Ponds (WSP). It included one anaerobic, three facultative (3FP) and two maturation ponds. The second unit, a high rate ponds system included one anaerobic pond, one high-rate algal pond (HRAP) and two maturation ponds. The two treatment units were placed on the same site ; they were receiving the same sewage and sharing the same preliminary treatment facility. Based on Pollution apparent rates removal there was no significant differences between the two treatment units. Both units produced a WHO-category A effluent. However, the comparison on a Specific Removal Rate (SRR) basis, which gives removal rates per unit of land occupied, showed the superiority of the high rate ponds system over WSP.

Key words : Wastewater - Treatment - High-rate ponds system - Waste stabilization ponds - Organic load - Nutrients (N, P) - Specific removal rate

¹ Unité d'épuration et de la réutilisation des eaux usées. Département de Biochimie et Biologie moléculaire, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, B.P. 6202-Instituts, 10101 Rabat, Maroc

^a Auteur correspondant, courriel : b.elhamouri@iav.ac.ma

INTRODUCTION

Les systèmes d'épuration des eaux usées de type extensif sont de plus en plus recommandés pour les pays en voie de développement, notamment pour ceux où la disponibilité de l'eau pose problème (Shuval, 1986). Ces systèmes ont un double intérêt. D'une part, les investissements requis sont réduits et les frais de fonctionnement occasionnés sont raisonnables. D'autre part, la qualité hygiénique de l'effluent produit par ces systèmes autorise son utilisation pour l'irrigation sans risque sanitaire notable.

Parmi les systèmes extensifs les plus recommandés, on peut citer les bassins de stabilisation (BDS) qui représentent la version moderne du lagunage naturel. Il s'agit d'une série de bassins où l'eau séjourne une vingtaine de jours. Généralement, une filière BDS comprend 3 catégories de bassins : les bassins anaérobies, les bassins facultatifs et les bassins de maturation (Marais, 1961 et 1966 ; Gloyna, 1971 ; Arthur, 1983 ; Mara & Pearson, 1987).

Les BDS ont généralement une section trapézoïdale et une profondeur allant de 3 à 1 m selon le type de bassin. Le Chenal algal à haut rendement (CAHR) décrit par Oswald & Golueke en 1968 est une variante encore plus évoluée du lagunage naturel. Il est basé, à l'instar des bassins, sur une association à bénéfice mutuel entre les algues microscopiques et les bactéries. Le CAHR consiste en un bassin de faible profondeur (0,3 à 0,6 m) de section rectangulaire ayant la forme d'une piste de course où l'eau est maintenue en circuit fermé grâce à l'action d'une roue à palettes. Celle-ci permet à l'eau en surface d'atteindre une vitesse de 0,2 m/s environ.

Pendant longtemps, le CAHR a été utilisé comme élément d'épuration orienté vers la production de la biomasse algale pour l'exploitation de celle-ci en tant que source de protéines d'organismes unicellulaires (McGary & Tongasame, 1971 ; Azov & Shelef, 1982) d'où le peu de travaux consacrés à son intégration en tant qu'élément d'une série de bassins capables de produire un effluent utilisable en irrigation (El Hamouri *et al.*, 1994b ; 1995).

Cet article tente de comparer les performances physico-chimiques d'épuration de deux filières d'épuration apparentées au lagunage : une filière LHR et une filière BDS. L'objectif de la comparaison est de déterminer la filière la plus

efficace, puis, dans un deuxième temps, de cerner les facteurs à l'origine d'une supériorité éventuelle de l'une des filières sur l'autre.

MATÉRIEL & MÉTHODES

1. Climat de la station

La ville d'Ouarzazate est située au sud du Maroc. Sa latitude est de 30°56'N et son altitude moyenne est de 1160 m. Le climat d'Ouarzazate est de type pré-saharien à hiver frais. La température moyenne est de l'ordre de 19°C avec 6,4°C comme moyenne des minima et 31,2°C comme moyenne des maxima. L'humidité de l'air atteint 21% au mois de juillet et 57% au mois de décembre. Les précipitations annuelles ne dépassent pas une moyenne de 108 mm.

2. Systèmes d'épuration des eaux usées

Les installations de traitement des eaux usées de la station d'Ouarzazate comprennent une unité de pré-traitement consistant en un dégrillage, un dessablage et un dégraissage. Le traitement biologique comprend trois filières : deux filières BDS n°1 et BDS n°2 et une filière LHR.

La figure 1 montre la configuration des 3 filières et les tableaux 1 et 2 regroupent les dimensions et les temps de rétention hydraulique des filières comparées (LHR et BDS n°2). Le bassin anaérobie, A₁ placé en tête des deux filières BDS reçoit un débit de 345 m³/j. À la sortie de ce dernier, le débit est divisé en deux parts équivalentes de 172 m³/j. La première part alimente la filière BDS n°1 et la seconde alimente la filière BDS n°2 (Figure 1).

Les bassins anaérobies, A₁ et A₂, et les bassins de maturation M₁ et M₂ ont les mêmes caractéristiques géométriques et assurent des rendements d'épuration équivalents de sorte que les différences de performances obtenues entre les deux filières puissent être attribuées au seul remplacement des trois bassins facultatifs par le CAHR. Un système anti-odeur a été mis en place et utilisé uniquement en saison chaude quand les émanations des mauvaises odeurs devenaient importantes. Il consiste à recycler 86,4 m³/j provenant de la sortie de la filière LHR, vers les 2 bassins A₁ et A₂ (Figure 1). Les calculs de performances ne tiennent pas compte de ce recyclage qui n'affecte pas le comportement des filières comparées.

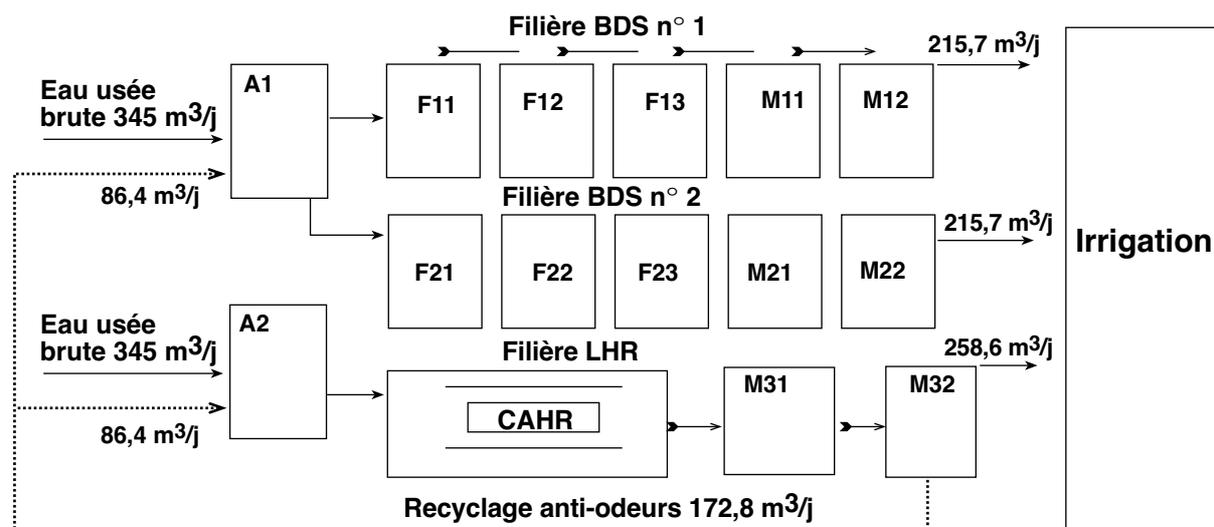


Figure 1. Circuit hydraulique de la station d'épuration d'Ouarzazate montrant les deux filières comparées (BDS n°2 et LHR)

A_1 : bassin anaérobie 1 ; F_{11} : bassin facultatif n°1 de la filière n°1 ; M_{22} : bassin de maturation n°2 de la filière n°2 ; LHR : filière lagunage à haut rendement ; BDS : bassins de stabilisation ; CAHR : chenal algal à haut rendement.

Tableau 1. Composition, dimensions et temps de rétention hydraulique de la filière de LHR d'Ouarzazate

Composantes	Superficie (m ²)	Profondeur (m)	Volume (m ³)	TS (jour)
Anaérobie, A_2	887	3,0	1826	4,2
CAHR	3023	0,4	1209	2,8
Maturation M_1	400	1,0	400	0,9
Maturation M_2	400	1,0	400	0,9
Total Maturation	800	-	800	1,8
Total global	4710	-	3835	8,8

La filière de LHR traite un débit moyen de 345 m³/j

Tableau 2. Composition, dimensions et temps de rétention hydraulique de la filière BDS n° 2

Composantes	Superficie (m ²)	Profondeur (m)	Volume (m ³)	TS (jour)
Anaérobie, A_1^*	443	3,0	913	4,2
Facultatif F_1	661	1,5	994	4,6
Facultatif F_2	436	1,5	444	2,0
Facultatif F_3	1530	1,5	1820	8,4
Total facultatif	2627	-	3258	15,0
Maturation M_1	300	1,0	300	0,9
Maturation M_2	300	1,0	300	0,9
Total Maturation	600	-	600	1,8
Total global	3670	-	4771	21

La filière BDSn°2 traite un débit moyen de 173 m³/j

TS : Temps de séjour

* Ces dimensions représentent la moitié des dimensions de A_1 , lequel alimente les deux filières BDS n°1 et n°2 (Figure 1).

D'un autre côté, les superficies des deux filières BDS (n°1, n°2) différaient d'environ 15%, soit 3115 m² pour la filière BDS n°1 contre 3670 m² pour la filière BDS n°2. Logiquement, la filière LHR devait être comparée à la filière BDS n°1, qui couvre la superficie la plus faible, pour ne pas désavantager le système BDS. Mais, la filière BDS n°1 connaissait une baisse de performances en saison chaude qui se manifestait par l'apparition des eaux rouges d'où le choix de la filière BDS n°2.

3. Méthodologie d'analyses

Les caractéristiques physico-chimiques sont déterminées à partir de prélèvements bimensuels effectués sur 24 heures. Ces derniers servent à confectionner des échantillons composites. Avant de subir les analyses physico-chimiques, les échantillons sont partiellement débarrassés des algues par centrifugation à 1500 g pendant 10 mn. La DCO est déterminée selon la méthode au dichromate de potassium, Norme AFNOR (T90-101). Un DCO-mètre type Geber 14, modèle 2202, est utilisé pour l'attaque acide à chaud. La DBO₅ est déterminée selon la méthode de dilution décrite dans Standards Methods (APHA, 1985).

L'azote ammoniacal, N-NH₄⁺ et le phosphore sous forme d'orthophosphates, P-PO₄³⁻ sont déterminés suivant les méthodes décrites dans Standards Methods (APHA, 1985). L'oxygène dissous est mesuré, *in situ*, à l'aide d'un oxymètre portatif type Jenway modèle 3100. La valeur moyenne

présentée correspond à la moyenne des mesures effectuées à 15 heures pendant trois jours consécutifs.

Le pH est également mesuré, *in situ*, à l'aide d'un pH-mètre type Jenway modèle 3100. La valeur moyenne présentée correspond à la moyenne des mesures effectuées à 15 heures pendant trois jours consécutifs.

La chlorophylle-a (Chl-a) est déterminée, après extraction au méthanol chaud à 90%, selon la technique décrite par Pearson *et al.* (1987).

L'identification des espèces algales est réalisée grâce à un microscope photonique à l'aide de la clé de détermination (Bourrelley, 1966). Le dénombrement des cellules algales est effectué sur un hématimètre (cellule de Thomas). Le nombre de cellules algales par ml de l'échantillon (N) est calculé selon la formule :

$$N = (X/64) \cdot 10^6$$

X est le nombre de cellules algales comptées sur l'hématimètre. La concentration relative d'une espèce algale (CR en %) est le nombre d'individus de cette espèce présents dans l'échantillon (N_e) par rapport au nombre total d'individus (N) :

$$CR (\%) = (N_e/N) \cdot 100.$$

RÉSULTATS

1. Taux d'abattement apparents et qualité des effluents des deux filières

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux usées à l'entrée et à la sortie des deux filières comparées ainsi que les taux d'abattement des principaux paramètres physico-chimiques obtenus sont regroupées dans les tableaux 3 & 4. Les valeurs de pH, les concentrations en oxygène dissous et en chlorophylle-a enregistrées dans la filière LHR sont supérieures à celles de la filière BDS. La concentration en chlorophylle-a dans la

Tableau 3. Moyennes annuelles des principales caractéristiques physico-chimiques des eaux usées brutes à l'entrée et de l'eau épurée à la sortie de chacune des trois composantes de la filière bassins de stabilisation n°2 (BDS n°2)

Unités	Entrée eaux usées	Sortie A ₁		Sortie du 3 ^{ème} bassin facultatif		Sortie du 2 ^{ème} bassin de maturation	
		Valeur	TA*	Valeur	TA*	Valeur	TA*
Température °C	23,1	21,6		20,3		21,4	
pH	7,57	7,7		8,5		8,6	
Oxygène dissous mg/l	0	0		5,1		7,6	
Chlorophylle-a mg/l	0	0		0,85		1,15	
DCO mg/l	500	210	58	160	68	156	69
DBO ₅ mg/l	340	152	55	122	64	115	66
N-NH ₄ ⁺ mg/l	37,4	32,8	12	24,8	34	19,6	48
P-PO ₄ ³⁻ mg/l	20,2	16,4	19	11,8	42	11,3	44

* : taux d'abattement cumulé (en %) ; A₁ = bassin anaérobie

Tableau 4. Moyennes annuelles des principales caractéristiques physico-chimiques des eaux usées brutes à l'entrée et de l'eau épurée à la sortie de chacune des trois composantes de la filière lagunage à haut rendement (LHR)

Unités	Entrée eaux usées	Sortie A ₂		Sortie du 3 ^{ème} bassin facultatif		Sortie du 2 ^{ème} bassin de maturation LHR	
		Valeur	TA*	Valeur	TA*	Valeur	TA*
Température °C	23,1	21,6		20,3		21,4	
pH	7,57	7,68		9,28		9,2	
Oxygène dissous mg/l	0	0		20,3		16,2	
Chlorophylle-a mg/l	0	0		4,9		3,9	
DCO mg/l	500	220	56	173	65	170	66
DBO ₅ mg/l	340	155	55	118	65	115	66
N-NH ₄ ⁺ mg/l	37,4	34	09	19,4	48	15	60
P-PO ₄ ³⁻ mg/l	20,2	15,2	25	9,2	54	8,8	56

* : taux d'abattement cumulé (en %) ; A₂ = bassin anaérobie

filière LHR est de 4 à 5 fois celle enregistrée dans la filière BDS. Les bassins anaérobies placés en tête des deux filières présentent des résultats identiques. Chacun élimine environ 50% de DCO, 20% de P-PO₄³⁻ et 10% de N-NH₄⁺. Le taux global d'élimination de la DCO des deux filières est d'environ 70%.

La concentration finale de l'ammonium (N-NH₄⁺) atteint 15 mg/l et celle des orthophosphates (P-PO₄³⁻) 8,8 mg/l dans le cas de la filière LHR contre 19,6 mg/l pour N-NH₄⁺ et 11,3 mg/l pour P-PO₄³⁻ dans la filière BDS. Les taux d'abattement de l'ammonium atteint 66% et celui des orthophosphates 60% dans la filière LHR contre 48% pour N-NH₄⁺ et 44% pour P-PO₄³⁻ dans la filière BDS, soit une différence d'environ 25% en faveur de la filière LHR (Tableaux 3 & 4).

2. Flux spécifiques éliminés (FSE)

L'expression des rendements d'épuration en termes de taux d'abattement permet de donner des informations sur la capacité d'une filière d'épuration à absorber la pollution admise sans évaluer l'efficacité d'utilisation la capacité de la superficie de terrain qu'elle couvre. En fait, lors du calcul du taux d'abattement ($[(C_e - C_s)/C_e] \cdot 100$) on ne tient compte ni du débit quotidien traité, ni de la superficie occupée par les divers bassins des filières.

Pour comparer valablement les deux filières sur la base de l'efficacité d'utilisation de terrain, il est nécessaire d'exprimer les performances d'épuration en termes de quantité de pollution éliminée par jour (Équation 1) :

$$Y = Q_e C_e - Q_s C_s \quad [1]$$

Y est exprimé en g/j

C_e : concentration en g/m³ de l'élément polluant à l'entrée de la filière

C_s : concentration en g/m³ de l'élément polluant à la sortie de la filière ou de chacun des bassins qui les composent.

Q_e : débit à l'entrée en m³/j

Q_s : débit à la sortie en m³/j

L'équation 1 se base sur le bilan massique de la pollution qui transite à travers les deux filières, en admettant que la quantité de pollution admise est égale à la somme des quantités de pollution retrouvée à la sortie et de celle éliminée par le système. Par ailleurs, l'élimination des polluants lors de l'épuration biologique suit une cinétique de premier ordre. Par conséquent, la quantité de

polluant éliminée est proportionnelle à la concentration de la pollution admise dans les bassins comme indiqué par l'équation 2.

$$dC/dt = -kC \quad [2]$$

C : concentration du polluant à l'entrée au temps t

k : constante cinétique de premier ordre de dégradation du polluant considéré

La comparaison entre la filière BDS et la filière LHR est possible puisque les concentrations (C_e) à l'entrée des deux filières sont identiques car elles reçoivent la même eau usée. On peut également procéder à la comparaison entre le seul bassin CAHR (isolé de sa filière LHR) et les trois bassins facultatifs, également isolés de leur filière BDS étant donné qu'ils reçoivent les effluents provenant des bassins anaérobies, A₁ et A₂, qui ont une composition quasi identique (la différence ne dépasse pas 4,7% pour la DCO et 3% pour la DBO₅) (Tableaux 3 & 4). Par ailleurs et comme les unités à comparer occupent des superficies différentes, il est nécessaire de recourir au flux spécifique éliminé (FSE). Celui-ci exprime les performances en termes de quantité de pollution éliminée (Y) par unité de surface (S) occupée par chacune des unités comparées (équation 3) :

$$FSE = (Q_e C_e - Q_s C_s) / S \quad [3]$$

FSE s'exprime en g/m².j et S en m².

L'examen des FSE montre une supériorité de la filière LHR sur la filière BDS. En effet, le FSE de la DCO est de 24,1 g/m².j pour le LHR contre 16,1 g/m².j pour les BDS. Le FSE du N-NH₄⁺ est de 1,6 g/m².j pour le LHR contre 0,8 g/m².j pour les BDS. Le FSE des P-PO₄³⁻ est de 0,8 g/m².j pour le LHR contre 0,4 g/m².j pour les BDS (Figure 2). Selon le paramètre considéré, le LHR améliore le FSR de 150 à 200% environ. La figure 2 montre, par ailleurs, que les facteurs climatiques liés aux changements des saisons ont un impact plus important sur les BDS que sur le LHR. Quand on considère le passage de la saison chaude, favorable, à la saison froide, on constate que le FSE de N-NH₄⁺ diminue de 28% pour les BDS contre seulement 10% pour le LHR et que le FSE des orthophosphates diminue de 46% pour les BDS contre 18% pour le LHR.

3. Origine de la supériorité du LHR

La supériorité des FSE du LHR montrée dans la figure 2 pose la question de savoir la ou les raisons qui conduisent cette filière à dominer les BDS. Or, les deux filières possèdent des unités identiques (un bassin anaérobie et deux bassins de matura-

tion pour chacune d'elles). Le seul élément qui les distingue est la présence du CAHR dans la filière LHR et son absence dans la filière BDS (remplacé par trois bassins facultatifs). Il devient donc utile de comparer sur la base de l'équation 3 des FSE du seul CAHR isolé de sa filière à ceux des trois facultatifs également isolés de leur filière BDS. La figure 3 montre que les valeurs de 4,57 g/m².j pour la DCO, 1,53 g/m².j pour N-NH₄⁺ et de 0,82 g/m².j pour P-PO₄³⁻ sont obtenues dans le CAHR contre 3,43 g/m².j pour la DCO, 0,48 g/m².j pour N-NH₄⁺ et 0,32 g/m².j pour P-PO₄³⁻ dans les trois bassins facultatifs. Le CAHR améliore donc les FSE de 33% pour la DCO, de 218% pour N-NH₄⁺ et de 156% pour P-PO₄³⁻. Ceci montre clairement que la supériorité constatée des FSE globaux de la filière LHR sur la filière BDS est due à la présence du CAHR dans la filière LHR.

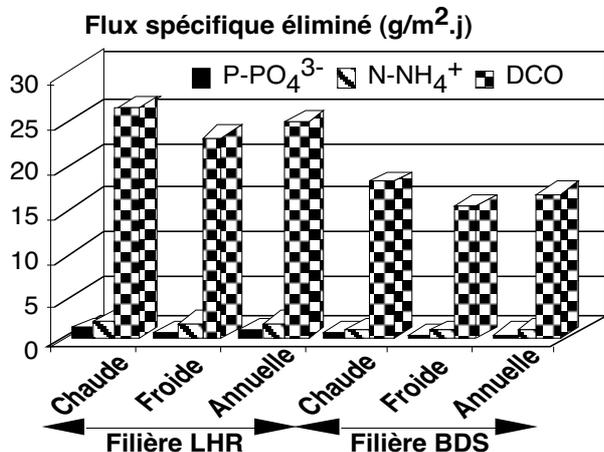


Figure 2. Flux spécifiques éliminés par les filières LHR et BDS (valeurs obtenues selon les saisons (chaude, froide et annuelle))

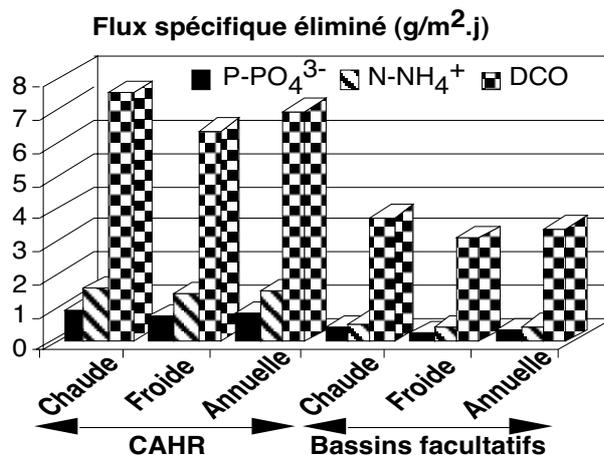


Figure 3. Flux spécifiques éliminés par le CAHR et les 3 bassins facultatifs (valeurs obtenues selon les saisons (chaude, froide et annuelle))

4. Rôle des variables photosynthétiques

Le rôle d'oxygénation du milieu au sein de la filière LHR revient au CAHR. Dans la filière BDS ce sont les trois bassins facultatifs qui remplissent ce rôle. Les données, présentées ci-dessus et celles qui sont relatives à l'activité photosynthétique se déroulant dans le CAHR pour la filière LHR ou dans les bassins facultatifs pour la filière BDS, permettent d'expliquer la supériorité du LHR. L'évolution nyctémérale de la teneur en oxygène dissous dans le CAHR et dans les trois bassins facultatifs (Figure 4) montre une anoxie nocturne de 2 à 6 h. L'anoxie observée est la conséquence de l'arrêt de l'activité photosynthétique en absence de la lumière et de la consommation active de l'oxygène dissous suite à la respiration des algues et des micro-organismes. Cette observation montre, par ailleurs, que le système d'agitation mécanique du CAHR ne contribue pas de manière significative dans l'oxygénation du milieu comparativement à l'activité photosynthétique.

Pendant la période diurne, les teneurs en oxygène dissous enregistrées dans le CAHR sont toujours supérieures à celles des trois bassins facultatifs. Les concentrations maximales enregistrées sont de 32 mg/l pour le CAHR et de 13,5 mg/l pour les trois bassins facultatifs. Cette différence de production d'oxygène est la conséquence d'une concentration en chlorophylle-a du CAHR 6 fois supérieure à celle qui est rencontrée dans les trois bassins facultatifs (Tableaux 3 & 4). L'optimum d'activité photosynthétique est atteint vers 14 h pour le CAHR, mais beaucoup plus tard, à 18 h, pour les trois bassins facultatifs (Figure 4).

Les valeurs du pH enregistrées dans les trois bassins facultatifs et dans le CAHR présentent des variations qui suivent de près celles de l'oxygène dissous (Figure 5) démontrant ainsi l'effet de l'activité photosynthétique sur le pH des bassins.

Par ailleurs et comme pour l'oxygène dissous, les valeurs de pH les plus élevées sont observées vers 14 h pour le CAHR et 18 h pour les bassins facultatifs. Les maxima de pH enregistrés sont de 9,8 pour le CAHR et 8,8 pour les trois bassins facultatifs. Les valeurs de pH les plus faibles sont enregistrées pendant la nuit, en raison de l'absence d'activité photosynthétique et la libération du CO₂ respiratoire. Dans les deux cas, les algues contribuent à l'augmentation du pH par assimilation des bicarbonates d'où le déplacement de l'équilibre carbonate-bicarbonate vers une

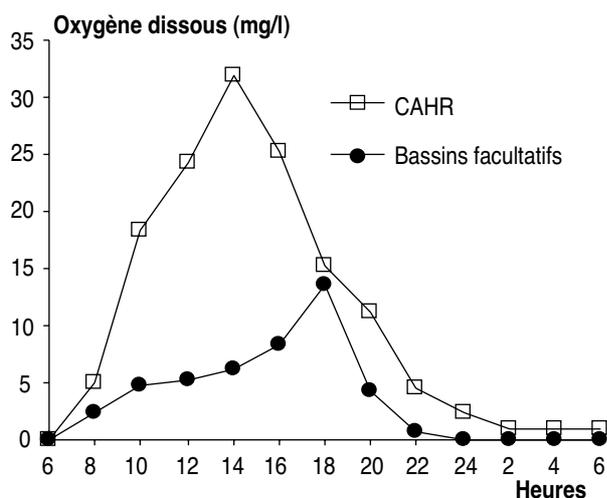


Figure 4. Évolution nyctémérale de la concentration en oxygène dissous à la sortie du CAHR et du dernier bassin facultatif de la filière BDS n°2

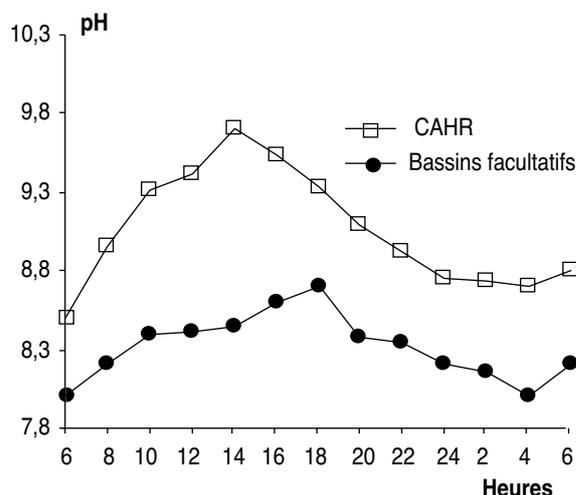


Figure 5. Évolution nyctémérale du pH à la sortie du CAHR et du dernier bassin facultatif de la filière BDS n°2

diminution de l'alcalinité totale (Azov, 1982 ; Buhr & Miller, 1983). Ce déplacement est accompagné d'une augmentation des carbonates qui s'hydratent et conduisent à l'augmentation du pH par libération de l'ion OH^- (Dubinsky, 1986).

Par ailleurs et comme signalé plus haut, la filière LHR s'était montrée peu sensible aux variations climatiques liées aux changements des saisons comparativement à la filière BDS. La figure 3 montre qu'un tel avantage est, en fait, lié à la présence du CAHR dans cette filière. En effet, les FSE des nutriments N et P diminuent de 28% pour N-NH_4^+ et 42% pour P-PO_4^{3-} dans le cas des trois bassins facultatifs contre seulement 10% pour N-NH_4^+ et 15% pour P-PO_4^{3-} dans le cas du CAHR.

DISCUSSION

Si la supériorité de la filière LHR sur celle des BDS est acquise et s'il est démontré qu'une telle supériorité est due à la présence du CAHR dans la filière LHR au lieu des trois bassins facultatifs retenus dans la filière BDS. Il devient alors nécessaire de déterminer les raisons pour lesquelles le CAHR surpasse les trois bassins facultatifs.

La supériorité du CAHR sur les trois bassins facultatifs peut être attribuée à l'importante activité photosynthétique qui se déroule dans le premier (Figures 4 & 5). En effet, les résultats montrent que les algues connaissent un taux de croissance plus élevé dans le CAHR que dans les trois bassins facultatifs, comme en témoigne la concentration en chlorophylle-a dans ces deux types de bassins (Tableaux 3 & 4).

L'important taux de croissance des algues dans le CAHR et la forte activité photosynthétique qui en résulte, sont la conséquence de sa faible profondeur (entre 0,35 et 0,40 m) et de l'agitation permanente, assurée par la roue à palettes qui l'équipe. Ces deux facteurs favorisent la pénétration de la lumière sur toute la colonne d'eau ainsi que le contact régulier de la plupart des cellules algales avec la lumière et avec la zone d'interface eau-air (Oswald & Golueke, 1968 ; McGary & Tongkasame, 1971).

C'est d'ailleurs pour cette raison que l'on constate la dominance des espèces immobiles: *Micractinium pusillum* (96%), *Chlorella sp.* (2%) dans le CAHR et la dominance des algues mobiles *Chlamydomonas sp.* (62%), *Euglena sp.* (32%) dans les trois bassins facultatifs.

La mobilité algale est un élément de survie dans les bassins facultatifs non agités. Les cellules doivent être en mesure de venir s'aérer et capter la lumière solaire en surface et avoir aussi la faculté de fuir les intensités solaire élevées enregistrées en saison chaude.

La forte croissance algale enregistrée dans le CAHR est également à l'origine de la forte élimination des éléments nutritifs N et P (Tableaux 3 & 4). Outre la croissance algale, les valeurs de pH élevées enregistrées dans le CAHR suite à une activité photosynthétique plus élevée (Figure 5 et Tableaux 3 & 4) sont favorables au transfert de l'ammoniac NH_3 vers l'atmosphère et

à la précipitation des orthophosphates (Wash *et al.*, 1972 ; Shirt, 1981 ; Picot *et al.*, 1991 ; El Halouani *et al.*, 1993 ; Moutin *et al.*, 1992 ; El Hamouri *et al.*, 1994b, El Hafiane *et al.*, 2001).

Par ailleurs et concernant l'effet de la saison sur l'efficacité de dépollution des filières comparées, on constate que cet effet dépend du paramètre analysé. Ainsi, l'élimination de la DCO par les filières BDS et LHR ne change pas de manière significative en saison froide contrairement à l'élimination des nutriments N et P.

En effet, on constate que l'influence de la saison est plus important sur la filière BDS (réduction des performances en saison froide) qu'elle ne l'est sur la filière LHR ce qui donne un avantage à cette dernière.

CONCLUSION

Le présent article met en lumière l'avantage de recourir au flux spécifique éliminé ou FSE, exprimé en gramme de polluant éliminé par m² et par jour au lieu du rendement apparent exprimés en % dans les comparaisons des filières d'épuration. En effet, le FSE permet de désigner la filière qui valorise le mieux le m² de terrain qu'elle couvre et ouvre la voie vers le développement de nouvelles filières plus efficaces.

Ainsi, la comparaison menée, à Ouarzazate, entre une filière classique de bassins de stabilisation ou BDS et une filière basée sur le lagunage à haut rendement ou LHR met en évidence la supériorité de la seconde sur la première.

Ce travail vise à démontrer que cette supériorité est due à l'adoption du chenal algal à haut rendement dans la filière LHR en lieu et place des bassins facultatifs classiques utilisés dans la filière BDS.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le PNUD, la FAO et l'OMS pour le soutien qu'ils ont apporté au Projet MOR 86/018. Les auteurs expriment leur reconnaissance à l'Administration du Génie Rural (AGR), à la Direction du Développement de la Gestion de l'Irrigation (DDGI) et à l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole d'Ouarzazate (ORMVAO). Ils remercient le professeur Moussa Ettalibi pour la lecture du manuscrit ainsi que pour ses nombreuses suggestions.

RÉFÉRENCES CITÉES

- APHA (1985) Standard methods for examination of water and wastewater, 16th edition. American Public Health Association, New York
- Arthur J.P. (1983) Notes on the design and operation of waste stabilisation ponds in warm climates of developing countries. In world Bank technical papers (7)
- Azov Y. (1982) Effet of pH on inorganic carbon uptake in algal culture. *Appl. and Environ. Microbiol.* 43 : 1300-1306
- Azov Y. & Shelef G. (1982) Operation of high-rate oxidation ponds ; theory and experiments. *Wat. res.* 16 : 1153-1160
- Bourrelly P. (1966) Les algues d'eau douce, algues vertes. Tome I, Editions Boube N. et Cie, Paris, 570 p.
- Buhr H.O. & Miller S.B. (1983) A dynamic model of high rate algal-bacterial wastewater treatment pond. *Wat. Res.* 17 : 29-37
- Dubinsky Z. (1986) Productivity of algae under nature conditions. Algal mass culture and water blooms in nature. In Handbooks of Microalgal Mass Culture, Richmond A. (Eds), CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, pp. 101-115
- El Hafiane F., Rami A. & El Hamouri B. (2001) Devenir de l'azote et du phosphore en période d'adaptation et en phase stationnaire d'un chenal algal à haut rendement. *Actes Inst. Agron. Vet. (Maroc)* sous presse
- El Halouani H., Picot B., Casellas C., Pena G. & Bontoux J. (1993) Elimination de l'azote et du phosphore dans un lagunage à haut rendement. *Revue Sciences de l'Eau* 6 : 47-61
- El Hamouri B., Khallayoune K., Bouzoubaa K., Rhallabi N. & Chalabi M. (1994b) High-rate algal pond performances in faecal coliforms and helminth egg removals. *Wat. Res* 28 (1) : 171-174
- El Hamouri B., Jellal J., Outabiht H., Nebri B., Khallayoune K., Benkerroum A., Hajli A. & Firadi R. (1995) The performances of a high-rate algal pond in the moroccan climate *Wat. Sci. Technol.* 31 (12) : 67-74
- Gloyne E. F. (1971) In Waste stabilization ponds World Health Organization, Geneva

- Mara D.D. & Pearson H.W. (1987) Waste stabilisation ponds : design manual for mediterranean europe Ed. W.H.O. regional office for europe copenhagen
- Marais G.V.R. & Shaw V.A. (1961) A rational theory for the design of sewage stabilization ponds in central and south Africa. *Transactions of the South African Institution of Civil Engineers* 3 : 205-227
- Marais G.V.R. (1966) New factors in the design, operation and performance of waste stabilization ponds. *Bulletin of the World Health Organization* 34 : 737-763
- McGary M.G. & Tongkasame C. (1971) Water reclamation and algae harvesting . *J. Wat. Pollut. Control. Fed.* 5 : 824-835
- Miller S., Abeliovich A. & Belfort G. (1972) Effects of high organic loading on mixed photosynthetic wastewater treatment. *Journal W.P.C.F.*, Mars : 346-440
- Moutin T., Gal J.Y., EL Halouani H., Picot B. & Bontoux J. (1992) Decrease of phosphate concentration in a high rate pond by precipitation of calcium phosphate: theoretical and experimental results. *Wat. Res.* 26 (11) :1445-1450
- Oswald W.J. & Golueke C.G. (1968) Large scale production of algae. In single cell protein production. Eds: Males and Tannebaum S.R. MIT Press Cambridge MA. : 271-305
- Pearson H.W., Mara D.D & Mills S.W. (1987) in Physico-chemical parameters influencing faecal bacterial survival in waste stabilization ponds. *Wat. Sci. Technol.* 19 (12) : 145-152
- Picot B., El Halouani H., Casellas C., Moersidik S. & Bontoux J. (1991) Nutrient removal by high rate pond system in a Mediterranean climate (France). *Wat. Sc. Technol.* 23 : 1535-1541
- Shirt E. (1981) Role of hydrodynamic factors in ammonia desorption by diffused aeration. *Wat. Res.* 15 : 739-743
- Shoval H.I., Fattal B. & Yekutieli P. (1986) State of the art : an epidemiological approach to the health effect of wastewater reuse. *Wat. Sci. Technol.* 18 : 147-162
- Wash A.M., Folkman Y. & Shemesh (1972) Use of surface stirrers for ammonia desorption from ponds. *Prog. Wat. Tech.* 1: 263-271