



Etude hydrodynamique de deux systèmes d'agitation dans un chenal algal à haut rendement (CAHR)

Hydrodynamic study of two agitation systems in one high efficiency algal channel (heac)

Fouad ZOUHIR⁽¹⁾, Ayoub EL GHADRAOUI⁽²⁾, Chéma KEFFALA⁽³⁾, Hugues JUPSIN⁽¹⁾ & Bernard TYCHON⁽¹⁾

Abstract: In this work, we carried out a hydrodynamic comparison between the two stirring systems most often used for high-efficiency algal channel installations namely the air lift and the impeller. Thus we can compare the power of the energy consumed by these two systems for the range of flow velocity of the effluent usually encountered in this type of wastewater treatment system, in order to determine the most efficient system.

Keywords: Algal channel, energy saving, paddle wheel, air lift

Résumé : Dans ce travail, nous avons réalisé une comparaison hydrodynamique entre les deux systèmes d'agitation les plus souvent utilisés pour des installations de type chenal algal à haut rendement à savoir l'air lift et la roue à aube. Ainsi on peut comparer la puissance de l'énergie consommée par ces deux systèmes pour la gamme de vitesses de circulation de l'effluent usuellement rencontrée dans ce type de filière de traitement des eaux usées, en vue de déterminer le système le plus efficace.

Mots clés : Chenal algal, économie énergétique, roue à aube, air lift

INTRODUCTION

Les études élaborées et les enquêtes effectuées en matière d'assainissement ont mis en évidence le déficit important enregistré par le secteur de l'assainissement liquide au Maroc eu égard au développement des activités urbaines, industrielles et touristiques de la plupart des villes du Royaume (insuffisances de réseaux, vétusté des installations existantes, quasi absence d'épuration et réutilisation des eaux usées brutes). Selon le recensement de 2014, la population marocaine vivant en milieu rural est d'environ 14,6 millions d'habitants dont 89 % ne disposent pas d'installations d'assainissement liquide.

L'accroissement de la population urbaine et de la consommation individuelle en eau potable a entraîné une importante augmentation du volume des rejets des eaux usées. Les ressources en eau du pays sont d'origine météorique. Les précipitations, sous leurs différentes formes, représentent en moyenne 150 milliards de m³/an, dont seulement 20 milliards sont mobilisables et déjà épuisés à 56% (BAZZA, 1992). A l'heure actuelle, 9000 hectares seraient irrigués directement avec des eaux usées brutes, c'est-à-dire sans traitement préalable.

En outre, il existe un grand nombre de petites collectivités et communes rurales où les ressources financières sont insuffisantes pour l'installation des systèmes de traitement classiques en raison de leurs coûts d'exploitation et d'entretien et la nécessité d'un staff qualifié (LAMZOURI *et al.*, 2015).

Dans ce contexte climatique et socio-économique particulier, les eaux usées peuvent constituer une ressource en eau non négligeable pouvant être réutilisée de façon bénéfique, notamment en agriculture, moyennant des prises de précaution au niveau sanitaire. Le Chenal Algal à Haut Rendement (CAHR) est un procédé de traitement des eaux usées adapté à un pays tel que le Maroc, semblant pallier à tous les problèmes cités précédemment. Il s'agit en fait d'une technique basée sur une symbiose entre les bactéries et les algues, dont le but est d'accélérer le processus d'épuration en favorisant la production algale. Outre l'épuration et la réutilisation de l'eau épurée, le CAHR est donc destiné à la production d'une biomasse algale, valorisable en extraits algaux à haute valeur ajoutée, en aliments pour les animaux et aussi en bio fuel (CRAGGS *et al.*, 2002).

(1) Unité de Recherche SPHERES, Faculté des Sciences, département des Sciences et Gestion de l'environnement, Université de Liège, site d'Arlon, Belgique. Fouad.Zouhir@uliege.be, H.jupsin@ulg.ac.be

(2) Laboratoire d'hydrobiologie Eco-toxicologie et Assainissement (LHEA/URAC33), Faculté des Sciences Semlalia Université Cadi Ayyad, Marrakech, MAROC. ayoubelghadraoui@gmail.com

(3) Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem, BP 47, 4042 Chott Mariem (Sousse), Tunisie keffalachema@yahoo.fr

La preuve a été faite que, sous des climats adaptés, et quand ils sont bien intégrés, bien conçus et opérationnels, les CAHR permettent de produire un effluent de qualité égale, voire supérieure à d'autres procédés d'épuration, à un coût bien moindre en termes d'investissement et d'exploitation et avec un minimum de contraintes (BAILEY GREEN et OSWALD, 1993).

MATERIELS ET METHODES

Description de la station Saada Marrakech

Dans le cadre d'un projet de coopération entre la Belgique et le Maroc, une station d'épuration des eaux usées de taille réelle par lagunage a été construite à Saada, banlieue de Marrakech. Il s'agit d'un chenal algal à haut rendement présentant la particularité d'être équipé de deux systèmes d'agitation : un air lift et une roue à aubes (fig 1). Cette station CAHR a été construite dans le cadre du projet PIC « Optimisation et Valorisation d'une filière d'épuration des eaux usées par chenal algal » financé par la Coopération Universitaire de Développement de la Fédération Wallonie-Bruxelles.

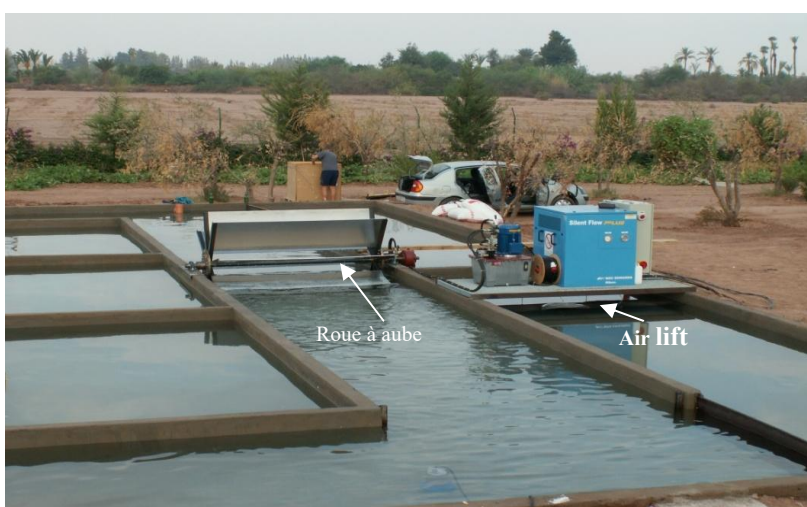


Figure 1: Le Chenal Algal à Haut Rendement de Saada avec ses deux systèmes d'agitation (Roue à aube et Air lift).

L'airlift est constitué d'une fosse de 16 m³, séparée en deux parties égales. L'injection de l'air est assurée dans une seule partie (4 m²) par un surpresseur Hibontype SF+H00, raccordé à 12 diffuseurs d'air de type tube à membrane perforée de marque Bioflex III 750, placés à 23 cm du fond de la fosse (fig 2 et 3). Un variateur de fréquence type Lenze modèle smd contrôle le moteur du surpresseur, de manière à faire varier la fréquence d'alimentation et de ce fait le débit d'air dans l'airlift.



Figure 2 : Raccordement des raquettes de diffuseurs.



Figure 3 : Airlift en fonctionnement.

Roue à aube : la circulation et l'homogénéisation de l'effluent dans le chenal de Saada peuvent aussi être assurées par une roue à aubes munie de 8 pales de dimension de 180 cm x 45 cm, entraînée par un moteur hydraulique type ORBITAL AS 25 d'une puissance de 4 kW, équipé d'un distributeur manuel PUNGER type 1-CEX SD5 pour pouvoir régler la vitesse de rotation de la roue (fig 4).



Figure 4: Roue à aubes en fonctionnement.

Essais de traçage

La méthode consiste à injecter, une fois que le régime hydraulique est établi, instantanément 150 kg de sel (NaCl) dans le bassin à un endroit et un instant donné (fig 5). On choisit la quantité de sel de manière à ce que la conductivité pour le premier pic reste dans la gamme quasi linéaire du conductimètre. On relève ensuite à l'aide d'une mesure en continu la conductivité avec une sonde de type YSI 6920 munie d'un acquiiseur de données intégré et placée à une distance telle qu'un bon brassage vertical soit réalisé. La fréquence d'acquisition du signal a été réglée sur une seconde. La sonde de conductivité (YSI 6920) a été calibrée avant chaque essai avec une solution KCl (0,01M).



Figure 5 : Injection de sel lors d'un essai de traçage avec la roue à aubes.

Afin de bien comparer l'hydrodynamique des deux systèmes d'agitation, nous avons réalisé quatre essais de traçage au NaCl et en eau claire pour chacun de ces systèmes. Nous avons travaillé à quatre débits d'air différents (26, 37, 59 et 82 Nm³/h) et 4 vitesses différentes de rotation de la roue à aubes (2, 3, 4 et 5 tours/minute).

Modélisation de l'écoulement hydrodynamique

L'ajustement de la courbe expérimentale du traçage avec l'équation de Voncken (JUPSIN *et al.*,2003) nous permet de déduire le nombre de Peclet (Pe). Et à partir de la valeur du nombre de Peclet ainsi déterminée, on peut directement déterminer le coefficient de dispersion axiale Ez (m²/s).

Si on porte en graphique $C/C_0 = f(t)$, avec C la concentration du traceur et C_0 la concentration finale quand le traceur est bien mélangé, on obtient une courbe de même allure que la courbe de traçage de conductivité. Une courbe d'étalonnage nous permet de passer de la conductivité à la concentration en sel. On observe des sinusoïdes amorties, pouvant être modélisées par l'équation de Voncken :

$$\frac{C(t)}{C_{\text{inf}}} = \frac{1}{2} \left(\left[\frac{Pe}{\pi\theta} \right] \right)^{1/2} \sum_{i=1}^n \exp \left[\left(\frac{-Pe}{4\theta} \right) (Uc - \theta)^2 \right]$$

- θ : temps réduit, (sans dimension).
- $C(t)$: concentration en sel en g/l à l'instant (t).
- C_{inf} : concentration à la fin du traçage en g/l (après homogénéisation).
- Pe : nombre de peclet (sans dimension).
- Uc : vitesse moyenne d'écoulement (m/s).

Dans cette expression, le nombre de Peclet (Pe) règle l'amplitude des sinusoïdes et θ (temps réduit = t/temps de circulation) l'étalement de la sinusoïde. Pour étalonner le modèle on fait correspondre la courbe expérimentale et la courbe de Voncken, soit en faisant varier les deux paramètres (Pe et T_c), soit en faisant varier le nombre de Peclet et en remplaçant le θ par celui calculé lors des essais expérimentaux. (L'ajustement a été réalisé avec le programme Matlab, il s'agit d'un ajustement par moindres carrés avec une valeur de R^2 proche de 1)

Calculs des puissances consommées pour les deux systèmes d'agitation

Les puissances consommées par les deux systèmes ont été déterminées de la manière suivante :

Puissance consommée par l'Air lift : Pour l'air lift, les courbes caractéristiques fournies par le constructeur du surpresseur SF+H00 nous ont permis d'établir plusieurs corrélations entre la fréquence, la température de refoulement, la perte de charge déterminée au préalable, le débit d'air aspiré et la puissance consommée (Fig. 6A).

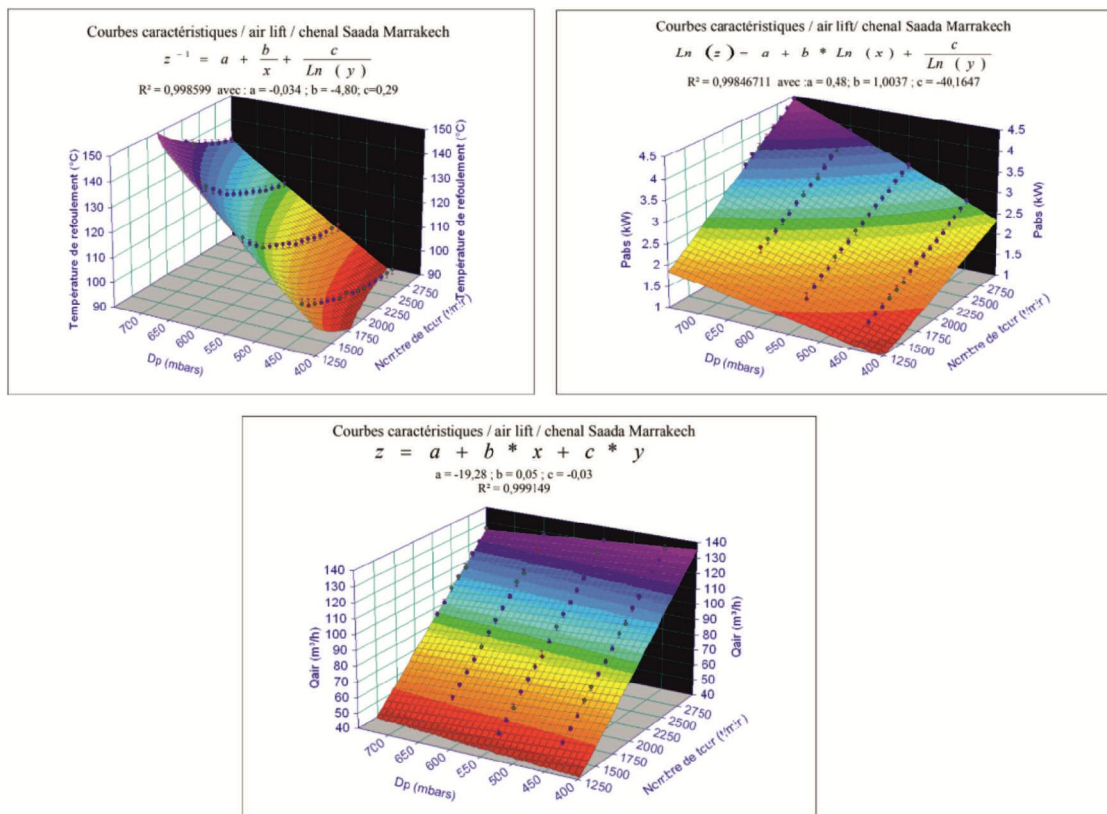


Figure 6A : Corrélation entre différents paramètres

Puissance consommée par la roue à aubes : Pour la roue à aubes, nous avons mesuré la pression et le débit d'huile dans le circuit fermé entre le moteur hydraulique et la roue à aubes. La mesure de pression était relevée sur un manomètre, tandis que le débit était mesuré par un débitmètre à ultrasons portable Paname trics, modèle PT878 (figure 6B). La connaissance de la pression et du débit dans le circuit hydraulique permet de calculer la puissance consommée. Le PT878 mesure les débits des conduites entre 1 cm et 5 m de diamètre, à des températures pouvant atteindre 260 °C.



Figure 6B : Dispositifs de mesure du débit et de la pression sur le circuit hydraulique de la roue à aubes

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Essais de traçage

On constate que le graphique (Fig.7) présente plusieurs pics. Ce phénomène est le résultat de la recirculation des eaux. Nous remarquons aussi que l'amplitude des pics diminue progressivement, et ce, suite au mélange du traceur dans le réacteur. La largeur des pics, quant à elle, augmente au fur et à mesure de l'essai, traduisant le phénomène de dispersion dans le réacteur.

Plusieurs informations peuvent être tirées de ces courbes :

- Le temps de circulation T_c , temps mis par le traceur (NaCl) pour faire une boucle dans le pilote, correspondant au temps entre deux pics.
- La vitesse de circulation du liquide (U_c) qui intervient dans le maintien d'une bonne homogénéisation du milieu, ce paramètre est important dans le dimensionnement du chenal algal.

$$U_c(m/s) = \frac{\text{débit de circulation}(m^3/s)}{\text{section transversale}(m^2)}$$

Comme en témoignent les deux graphiques des figures 8 et 9, on assiste à une diminution du temps de circulation T_c soit en augmentant le débit d'air pour l'air lift, soit en accélérant la vitesse de la roue à aube. Par contre, la vitesse de circulation U_c , varie inversement par rapport au temps de circulation et ceci pour les deux systèmes (air lift et roue à aube). Les vitesses U_c calculées sont du même ordre de grandeur que les vitesses de circulations retrouvées pour des installations type chenal algal à haut rendement. Les vitesses sont dans les mêmes gammes pour les deux systèmes afin de pouvoir comparer le coût énergétique du fonctionnement de la station.

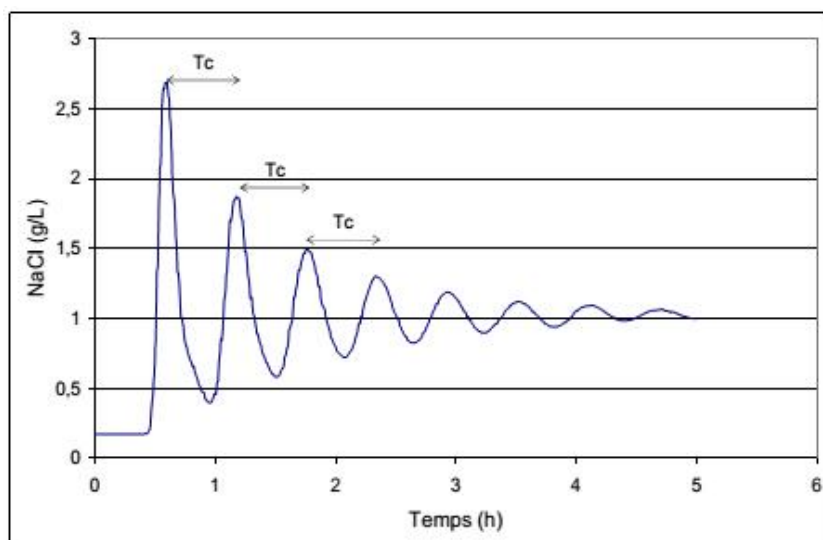


Figure 7 : Exemple de résultat d'un essai de traçage dans le chenal de Saada (essai avec airlift, 40 Hz)

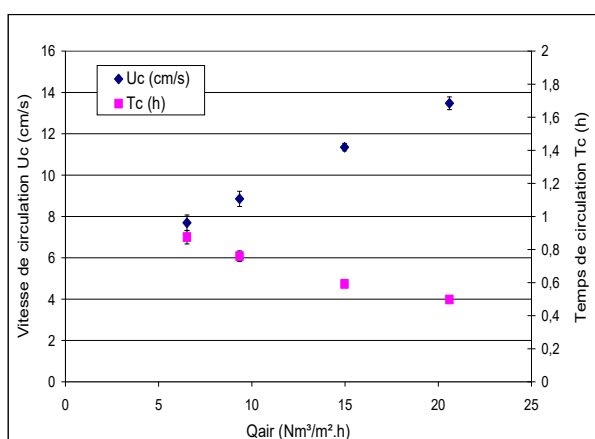


Figure 8 : Variation du temps de circulation moyen et vitesse d'eau moyenne en fonction du débit d'air appliqué.

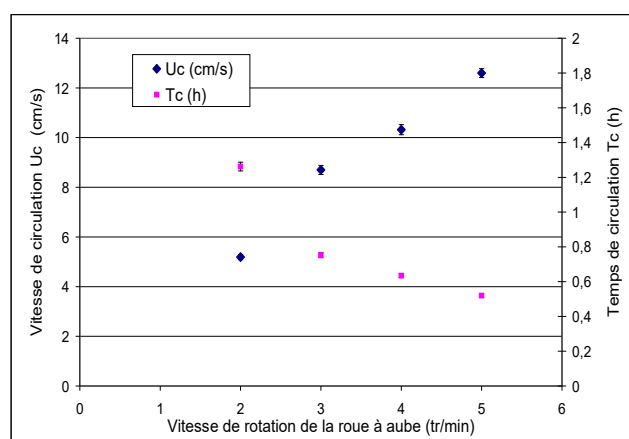


Figure 9 : Variation du temps de circulation moyen et la vitesse d'eau moyenne en fonction de la vitesse de la roue à aubes appliquée.

Tableau 1 : Résultats des essais de traçage pour l'Airlift.

Fréquences (Hz)	Débit d'air (Nm ³ /m ² .h)	Puissance (kW)	Tc (h)		UC (cm/s)	
			Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
25	6,52	0,475	0,875	0,0413	7,692	0,381
30	9,339	0,571	0,76	0,0316	8,851	0,369
40	14,97	0,762	0,592	0,009	11,350	0,175
50	20,60	0,953	0,498	0,011	13,475	0,307

Tableau 2 : Résultats des essais de traçage pour la roue à aube.

Vitesse de rotation de la roue à aube (tour/min)	Puissance (kW)	Tc (h)		UC (cm/s)	
		Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
2	1,01	1,262	0,025	5,191	0,105
3	2,56	0,753	0,015	8,699	0,182
4	3,55	0,635	0,012	10,320	0,204
5	4,77	0,52	0,01	12,598	0,178

Ajustement du modèle de Voncken

La courbe (figure 10) montre que l'ajustement par l'équation de Voncken est excellent pour les deux cas (ajustement sur Pe et θ , et aussi sur Pe seul).

La superposition de la courbe théorique et de la courbe expérimentale nous permet de déduire le temps de circulation moyen (T_c), et également le nombre de Peclet.

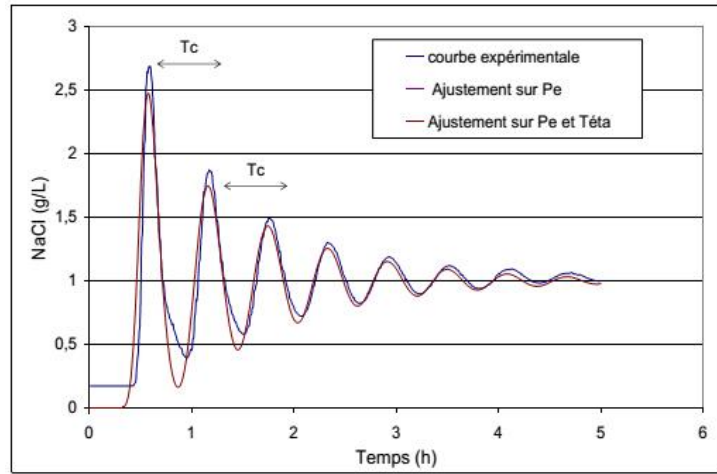


Figure 10 : Exemple d'ajustement d'une courbe expérimentale d'un essai de traçage dans le chenal de Saada avec l'équation de Voncken (essai avec airlift, 40 Hz)

A partir de la valeur du nombre de Peclet ainsi déterminée, on peut directement déterminer le coefficient de diffusivité axiale E_{zl} (m^2/s) grâce à la relation suivante (VILLERMAUX,1992):

$$E_{zl} = \frac{U_c * L}{Pe}$$

où L est la longueur de bassin en m (257m). Et de ce nombre de Peclet on peut aussi calculer le nombre de cuves (n) parfaitement mélangées en série correspondant à notre chenal.

$$\frac{1}{n} = 2d - 2d^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{d}\right) \right)$$

Avec d : le nombre de dispersion (sans dimension) $d = \frac{1}{Pe}$. (EDELIN 1998)

La grandeur caractéristique est le coefficient de dispersion axiale E_{zl} . Ce coefficient englobe le mélange dû à la diffusion et celui dû au transport par la turbulence. Théoriquement ce coefficient E_{zl} tend vers l'infini lorsque le mélange est parfait, et $E_{zl} = 0$ lorsque l'écoulement tend vers un modèle piston.

Les tableaux 3 et 4 résument les résultats obtenus, suite à l'ajustement par l'équation de Voncken.

Tableau 3 : Résultats des ajustements par la courbe de Voncken, de l'ensemble d'essai de traçage pour l'Airlift.

Débit d'air : Q_{air} ($Nm^3/m^2.h$)	Puissance (kW)	Pe	E_{zl} (m^2/s)	d	n
6,52	0,475	199,48	0,093	0005	100
9,339	0,571	108,17	,0197	0,009	54
14,97	0,762	77,14	0,355	0,012	39
20,60	0,953	74,08	0,440	0,013	37

Tableau 4 : Résultats des ajustements par la courbe de Voncken de l'ensemble d'essai de traçage pour la roue à aubes.

Vitesse de rotation de la roue à aubes (tour/min)	Puissance (kW)	Pe	Ez1 (m ² /s)	d	n
2	1,01	173,8	0,070	0,005	87
3	2,56	115,7	0,177	0,008	58
4	3,55	95,8	0,253	0,010	48
5	4,77	63	0,471	0,015	32

Le nombre de dispersion « d » calculé avec les 2 systèmes d'agitation est très faible et proche de zéro. Ceci nous a permis de dire que notre système se comporte macroscopiquement comme un réacteur piston dispersif avec recirculation. Ceci confirme les premières études menées sur des installations réelles à Rabat et Ouarzazate, qui ont montré que l'hydrodynamique de ce type de système peut être caractérisé par un écoulement de type piston dispersif avec un débit de recirculation élevé (EL OUARGHI *et al.*, 2000).

Cette partie de modélisation de l'écoulement, nous a permis de récolter les données nécessaires pour l'interprétation des essais de mesures de transferts gazeux (O₂, propane et CO₂), et pour combiner l'hydrodynamique du réacteur aux cinétiques biochimiques.

Comparaison de la consommation énergétique

Pour arriver à l'objectif fixé au départ de notre étude qui était de comparer les deux systèmes par rapport à leur consommation énergétique, nous avons établi sur le même graphique l'évolution de la puissance consommée en fonction de la vitesse de l'eau dans le chenal pour les deux systèmes (Fig 11).

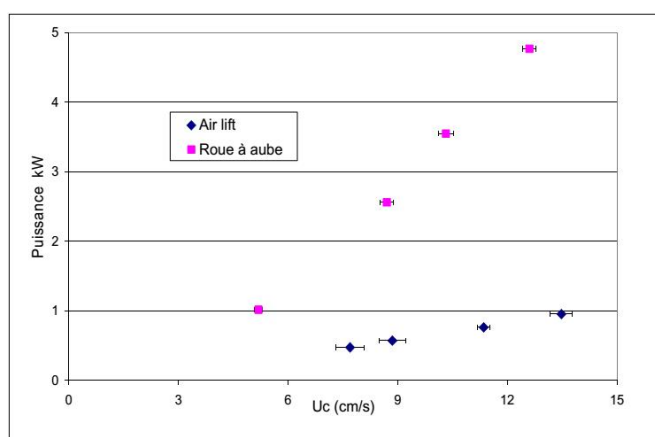


Figure 11 : Comparaison de la puissance consommée de l'air lift et de la roue à aubes pour des vitesses de l'eau usuellement rencontrées dans les CAHR.

Comme on le constate clairement sur la figure 11 et la tableau 5, le système air lift est nettement plus économique : 3 à 5 fois moins puissant que la roue à aubes, et ceci pour des vitesses d'eau usuellement rencontrées pour des installations type chenal algal à haut rendement (CAHR). Ce résultat va dans le même sens que celui de RICHMOND et BECKER (1986) qui avaient estimé une consommation de la roue à aube de 600 W pour une surface de 100 m², et une consommation de l'air lift de 195 W pour une surface de 95 m², soit un rapport de 3 entre les deux systèmes en faveur de l'air lift.

Un autre avantage de l'air lift, c'est que ce système peut créer un type de mélange « twin helical flow ». Ce type de flux est suggéré par MIHALYFALVY *et al.* (1998) pour éviter les zones mortes dans un réacteur.

Malgré le fait que le système air lift (environ 7000 euros) coûte plus cher en investissement par rapport à la roue à aubes (environ 2000 euros), le tableau 5 nous montre clairement qu'au point de vue du coût de fonctionnement des deux systèmes, l'air lift se révèle beaucoup moins cher (plus de cinq fois), ce qui nous conduit à relativiser ses coûts d'investissement plus élevés. En effet, sur un an environ, le gestionnaire récupère la différence. En matière de consommation énergétique, l'air lift semble bien être le système le plus économique, mais il faudra encore faire des essais de transferts gazeux et notamment des transferts d'oxygène pour conclure sur lequel des deux systèmes étudiés est le plus performant du point de vue rendement et coût.

Tableau 5 : Comparaison des deux systèmes par rapport à leur rendement et leur coût de fonctionnement.

	Air lift	Air lift	Air lift	Air lift	Roue à aubes	Roue à aubes	Roue à aubes	Roue à aubes
Essai	25 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	2 tr/min	3 tr/min	4 tr/min	5tr/min
Temps de circulation Tc (h)	0,87	0,76	0,59	0,49	1,26	0,73	0,63	0,52
Vitesse de circulation Uc (cm/s)	7,69	8,85	11,35	13,47	5,19	8,69	10,32	12,59
Consommation horaire (kWh)	0,47	0,57	0,76	0,95	1,01	2,56	3,55	4,77
Consommation journalière (kWh)	11,28	13,68	18,24	22,80	24,24	61,44	85,20	114,48
Consommation sur un an de fonctionnement (kWh)	4117	4466	2207	2143	8847	22425	31098	41785
Prix de la consommation d'un an (euro)	741	899	1198	1498	1592	4037	5598	7521

La figure ci-dessous confirme le constat selon lequel l'air lift est le système d'agitation le plus économique et aussi le plus performant du point de vue brassage pour les systèmes d'agitations rencontrés dans les systèmes type chenal. Cette figure traduit la variation de l'intensité lumineuse en fonction de la profondeur dans le chenal, et ce pour les deux systèmes d'agitations étudiés. Lors de ces essais nous avons cherché à comparer les deux systèmes d'agitation (air lift et roue à aubes). Comme on peut le voir clairement sur la figure 12.

L'intensité lumineuse s'annule déjà à partir d'une profondeur 7,5 cm dans le chenal pour le système air lift (30 Hz, $U_c = 8,85$ cm/s pour une consommation énergétique de 0,75 kWh) contrairement au cas de la roue à aubes (4tr/min, $U_c = 10,32$ cm/s pour une consommation énergétique de 3,55 kWh) où cette intensité ne s'annule pas avant une profondeur de 25 cm.

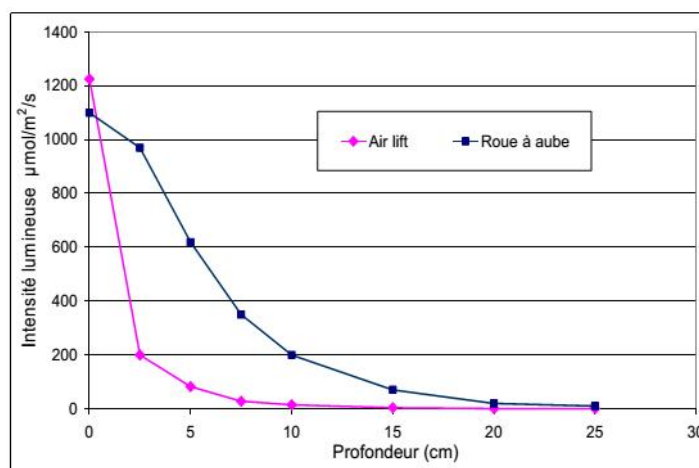


Figure 12 : Comparaison de la puissance consommée de l'air lift et de la roue à aubes pour des vitesses de l'eau usuellement rencontrées dans les CAHR.

Ceci est dû essentiellement au degré d'agitation qui est plus important dans le cas de l'air lift, ce qui met davantage en suspension la matière et empêche la pénétration de la lumière, malgré le fait que la consommation énergétique soit nettement moins importante dans le cas de l'air lift. On notera que ces essais ont été faits de façon successive ; on peut donc considérer que la biomasse dans le chenal n'a pas été modifiée entre les deux essais.

CONCLUSION

A notre connaissance, aucune autre étude n'a porté sur la comparaison des systèmes d'agitation : air lift et roue à aube sur la même installation type chenal algal à haut rendement. Notre étude n'a pas visé seulement la comparaison de la consommation énergétique par rapport à la vitesse de l'eau dans le chenal, mais elle a aussi calculé les différents paramètres hydrodynamiques (Pe , Tc , $Ez1$), nécessaires pour la modélisation (VASEL *et al.*, 2004). En matière de consommation énergétique, l'air lift est bien le système le plus économique, mais il faudra encore faire des essais de transferts gazeux et, notamment, des transferts d'oxygène pour identifier définitivement quel est le système le plus efficace.

REFERENCES

- BAILEY GREEN F. & OSWALD W. J., 1993. Engineering strategies to enhance microalgal use in wastewater treatment. 2nd IAWG International Specialist Conference on waste stabilization ponds and the reuse of pond effluents, California, 20-29.
- CRAGGS, R.J, DAVIES-COLLEY R.J., TANNER C.C. & SUKIAS J.P., 2002. Advanced Pond System: performance with high rate ponds of different depths and areas, 5th international IWA specialist group conference on Waste Stabilisation Ponds. Ponds Technology for the new millenium. Auckland New Zealand, 25-33.
- CRAGGS, R.J, SUTHERLAND D. & CAMPBELL H., 2012. Hectar-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production, *J. Appl. Phycol.*, 24 : 329–337.
- EDELIN F., 1998. L'épuration physico-chimique des eaux, théorie et technologie, 4^{ème} édition, CEBEDOC, Liège, 287 p.
- EL OUARGHI H., BOUMANSOUR B.E., DUFAYT O., EL HAMOURI B. & VASEL J.L., 2000. Hydrodynamics and oxygen balance in high-rate algal pond. 4th International Specialist Conference on Waste Stabilization Ponds: Technology and Environment. IAWQ, Marrakech, 20th – 23th April 99. *Wat. Sc. Tech.*, 42, (10) : 349-356.
- JUPSIN, H., PRAET, E & VASEL, J.-L., 2003. "Dynamic mathematical model of High Rate Algal Pond (HRAP)", *Wat. Sci. Tech.*, 48, (2) :197-204.
- LAMZOURI, K., BARTALI, E., LATRACH, L., MAHI, M., OUATTAR, S. & MANDI, L., 2015. Les enjeux de l'accès à l'assainissement en milieu rural au Maroc. *Revue marocaine des sciences et techniques du développement rural : hommes terres & eaux*. 161-162, 11-17.
- MIHALYFALVY E., JOHNSTON H.T., GARRETT M.R., FALLOWFIELD H.J. & CROMAR N.J., 1998. "Improved Mixing of High rate Algal Ponds", *Wat. Res.* 32, 4 : 1334-1337.
- RICHMOND A. & BECKER E.W., 1986. Technological aspects of mass cultivation - a general outline. In: A. Richmond (Ed.), *Handbook of microalgal mass culture*. CRC Press Inc., Boca Raton, Fla. : 245-263
- VASEL, J.-L., JUPSIN, H. & PICOT, B., 2004. "Progress in modelization of HRAP", 6th international IWA Conference on Waste Stabilisation Ponds, Avignon (France) : 433-439.
- VILLERMAUX J., 1995. Génie de la réaction chimique :conception et fonctionnement des réacteurs. 2^{ème} édition, Tec & Doc – Lavoisier. 439 p.