

Étude de la diffusion algale dans le système **Chenal Algal** à haut rendement en mode étage

Par **Soukaina Alaoui, Najoua Haddaoui, Jamal Eddine Jellal**

Laboratoire de génie civil, structure 'Traitement des Eaux' Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Université Mohammed V - Rabat, Maroc



Abstract

STUDY OF ALGAL DIFFUSION IN THE HIGH YIELD ALGAL CHANNEL SYSTEM IN FLOOR MODE

The purification technique of wastewater by High Rate Algal Ponds (HRAP) in mode stages is a new technique, which aims at implementing two channels in floors instead of the only one, whose purpose is to return the typical extensive system (HRAP) in an intensive system, to this end it is essential to study the various parameters governing the system to define the adequate way of functioning of TS-HRAP for a future realization. In this frame we are going to be interested to study the algal distribution and the evaluation of the purifying performances in the (TS-HRAP), according to the type of mass hydraulic supply in series, using the digital modelling with the aid of the tool CFD FLOW. Since the photosynthetic activity plays a crucial role which influences directly all other purifying phenomena. Indeed under the feigned operating conditions, the TS-HRAP was able to show a uniformity of the algal distribution throughout the channel and an efficiency purifying remarkable by working in serial mode with a short residence time.

La technique d'épuration des eaux usées par chenal algal à haut rendement en mode étage (CARET) est une nouvelle technique qui vise à mettre en œuvre deux chenaux en étages au lieu d'un seul, comme le but de rendre le système extensif type (CAHR) en un système intensif. Pour ce faire, il est indispensable d'étudier les différents paramètres régissant le système afin de définir le mode de fonctionnement adéquat du CARET pour une réalisation future. Dans ce cadre, nous allons nous intéresser à étudier la diffusion algale et l'évaluation des performances épuratoires dans le (CARET), selon une alimentation hydraulique en série, par le biais de la modélisation numérique à l'aide de l'outil CFD FLUENT. Étant donné que l'activité photosynthétique joue un rôle crucial qui influence directement tous les autres phénomènes épuratoires. En effet, sous les conditions opératoires simulées, le CARET a pu montrer une uniformité de la diffusion algale tout au long du chenal et une efficacité épuratoire remarquable en fonctionnant en mode série avec un temps de séjour court.

Le chenal algal à haut rendement est une variante de lagunage naturel qui a pu démontrer ses meilleures performances épuratoires et son efficacité.

Ce type de lagunage, conçu au début des années soixante par W.J. OSWALD constitue un écosystème différent des bassins de lagunage classique (1). En effet, il est caractérisé par des temps de séjour très inférieurs, des profondeurs plus faibles (30 à 60 cm au lieu de 1,10 à 1,40 m) et par une agitation mécanique constante, créée par une roue à aubes, de façon à favoriser le développement algal (2). Cette agitation rend négligeable l'action des coups de vent et leur incidence dans le déclenchement des successions saisonnières (3). Cependant, ce système permet d'atteindre des performances excellentes seulement pour des petites et moyennes

agglomérations. La présente étude met en évidence la possibilité de rendre le système extensif type (CAHR) en un système intensif, en mettant en œuvre deux chenaux en étages au lieu d'un seul, vu que les conditions climatologiques au Maroc à savoir les heures d'ensoleillement sont importantes.

Pour ce faire, nous allons étudier le comportement de ce système selon le type d'alimentation hydraulique en série, par le biais de la modélisation numérique à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT, en l'occurrence la diffusion algale en tant que l'activité algale, est un paramètre important qui conditionne et gouverne l'ensemble des processus biologiques épuratoires.

Les objectifs de cette étude sont donc :

- 1. mettre en évidence l'état du mélange parfait et de la diffusion uniforme ;

Mot clés : CARET, diffusion algale, temps de séjour, performances épuratoires.

- 2. déterminer le temps nécessaire pour parvenir à l'état de mélange parfait pour chaque étage ;
- 3. déterminer le rendement du CARET dans les deux périodes diurne et nocturne.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Description de l'Installation

Le chenal algal à haut rendement est un procédé de traitement extensif qui nous permet d'optimiser et d'économiser la superficie (4).

L'idée d'ajouter un étage identique représente une solution qui permettra de :

- Traiter le double du débit par une même superficie ;
- Adapter le système à une agglomération plus grande par le biais d'une augmentation de la population desservie.
- Le type d'alimentation hydraulique choisi est en série, les eaux issues des bassins anaérobies gravitairement sont traitées dans le chenal algal d'en haut puis, elles sont acheminées vers le chenal d'en bas à l'aide d'une conduite en cascade (dans le but d'améliorer l'aération de l'effluent),
- La figure suivante présente une vue générale de l'installation du (CARET), réalisée avec ANSYS Designer Modeler :

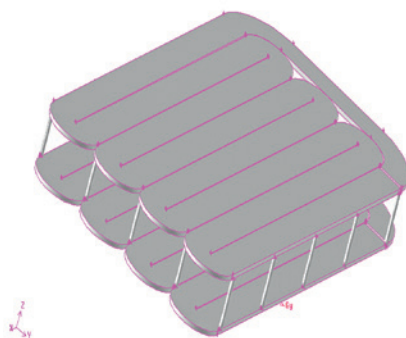


Figure 1: Vue en perspective d'un CARET

Les caractéristiques géométriques et les données hydrauliques des tronçons rectilignes et courbes du chenal algal sur lequel on a réalisé notre étude sont illustrées dans le tableau 1 et 2.

Le fluide en question est un mélange d'eau usée et d'algues microscopiques, du fait de la faible concentration des

Tableau 1: données géométriques du CAHR (5)

Géométrie	Grandeur	Valeur
Tronçon rectiligne	Longueur (m)	50
	Largeur (m)	3
	Hauteur (m)	0,5
Tronçon courbe	Rayon de courbure R (m)	3
	Angle de courbure (°)	180
	Largeur (m)	0,5
Mur de séparation	Epaisseur (m)	0,1
Chenal Haut	Hauteur (m)	4

Tableau 2: données hydrauliques du CAHR

Régime d'écoulement	Permanent
Débit (l/s)	2
Vitesse moyenne (m/s)	0,15
Temps de séjour (j)	2

algues microscopiques, on peut le considérer comme un fluide newtonien et incompressible (6).

La circulation et l'homogénéisation de l'eau sont assurées par une roue à aube.

Présentation du logiciel de simulation ANSYS Fluent

La simulation a été faite par un Code de calcul **ANSYS FLUENT** (version académique), qui est reconnu comme l'outil de simulation le plus puissant de la mécanique des fluides numérique (**MFN**) ou (bien Computational Fluid Dynamics (**CFD**), et qui permet d'aller plus vite et plus loin dans l'optimisation des performances des systèmes étudiés.

Pour effectuer la simulation de notre problème dans un domaine géométrique, on doit procéder par les étapes suivantes :

- Géométrie/CAO: Être en possession d'une géométrie 3d du domaine fluide.
- Maillage: discrétiser le domaine.
- Mise en données: choisir les modèles physiques et les hypothèses adaptés au problème.

Cet outil de simulation nécessite la

connaissance de la géométrie de l'ouvrage, l'étude des conditions aux limites et le choix du modèle de turbulence. Il permet de représenter les écoulements tridimensionnels (champ de vitesse, ligne de courant, concentration des espèces. etc.)

ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE

La mise en équation des phénomènes hydrodynamiques et de diffusion a été basée sur des données et des résultats des travaux antérieurs sur l'écoulement dans le CAHR de l'institut agronomique et vétérinaire Hassan II à Rabat.

Les conditions opératoires et les paramètres physiques qui entrent en jeu dans le fonctionnement du CARET pendant le jour sont considérablement différents de ceux de la nuit. Pour cela, l'étude de la diffusion algale dans ces deux périodes est indispensable.

Pour une vitesse moyenne d'écoulement de 15 cm/s, qui correspond à la vitesse recommandée par OSWALD (7) pour un fonctionnement optimal et économique. Les paramètres hydrauliques d'écoulement sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3: Les paramètres hydrauliques du CAHR

Paramètre	Valeur	Observation
Nombre de Mach	0.0001	Mélange incompressible
Nombre de Reynolds	56250	Ecoulement turbulent
Nombre de Froude	0.005	Ecoulement fluvial

Équations régissantes

Les équations principales qui régissent l'hydrodynamique de notre système sont : l'équation de continuité, l'équation de quantité de mouvement, l'équation de transport et l'équation de l'énergie.

Mise en équation:

L'équation de continuité s'écrit comme suit:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = S$$

Avec:

- ρ : masse volumique du fluide (kg.m⁻³);
- \vec{v} : vitesse du fluide (m.s⁻¹);
- S: terme puit/source (kg.m⁻³.s⁻¹).

L'équation de quantité de mouvement s'écrit:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\text{grad } p + \text{div} \vec{\tau} + \vec{f}$$

Avec:

- $\rho \vec{v} \vec{v}$: le tenseur de quantité de mouvement;
- $\text{div}(\rho \vec{v} \vec{v})$: le bilan flux entrant/sortant de quantité de mouvement pour le volume élémentaire;
- $\vec{\tau}$: le tenseur des contraintes dû à la viscosité du liquide (Pa).

L'équation de l'énergie

L'équation de l'énergie s'écrit sous la forme suivante:

$$\frac{\partial(V_i(\rho E + p))}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + v_i(\tau_{ij})_{eff} \right] + S_h$$

Avec:

- K_{eff} : la conductivité effective définie par:
- J_j : le flux de diffusion propre à l'espèce j.
- E: est donné par la relation

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{V_i^2}{2}$$

h: l'enthalpie sensible, pour un fluide incompressible, tel que:

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho}$$

L'équation de transport

L'équation de transport d'un mélange liquide peut s'écrire en général sous la forme suivante:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho V_i Y_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \vec{J}_i + R_i$$

Avec:

- V_i : composante de la vitesse suivant un axe;
- Y_i : fraction massique de chaque espèce;
- R_i : taux de réaction ou Taux de production de l'espèce i;
- J_j : flux de diffusion de l'espèce i dû au gradient de concentration.

SIMULATION

Le maillage

Le maillage utilisé dans notre étude est de type raffiné qui permet d'avoir des résultats de bonne précision.

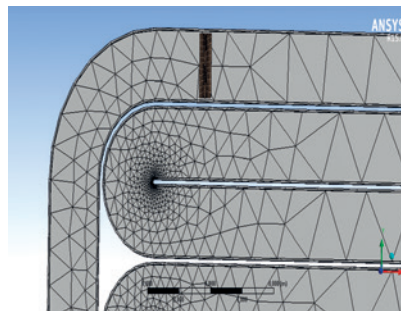


Figure 2: Maillage du CARET (fluent)

Conditions aux limites

Pour effectuer la simulation, certaines conditions aux limites doivent être déterminées, en conformité avec les données du logiciel. Ces conditions concernent l'entrée, la sortie et le fond du chenal.

Tableau 4: conditions aux limites (Fluent)

Élément	Conditions aux limites
Influent	Velocity Inlet
Effluent	Out flow
Fond	Wall
Parois	Wall
Surface libre	Symmetry

RÉSULTATS

Pour simplifier la transition entre les périodes du jour, la simulation de l'écoulement a été commencée au début de la journée avec un pas de temps de 2 heures jusqu'à homogénéisation du mélange, puis les rendements épuratoires ont été calculés.

Les résultats obtenus sont des images, pour éviter de présenter plusieurs contours on présentera seulement le premier et le dernier contour lorsque le mélange atteint l'état parfait.

Étage Haut

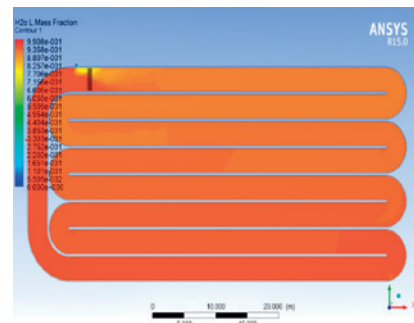


Figure 3: État du mélange à t = 2h

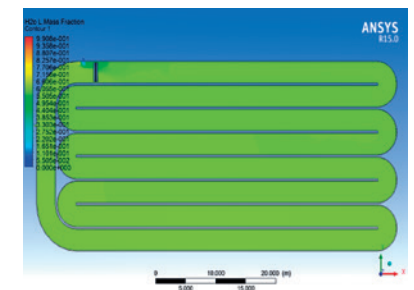


Figure 4: État du mélange à t = 18h

On constate qu'on arrive à l'état stationnaire du fonctionnement du chenal après 18 h, le contour de la fraction massique de l'eau présente dans le Chenal est uniforme sauf au niveau de l'entrée: zone où l'effluent du bassin anaérobie pénètre de façon concentrée dans le chenal, riche en substrat et avec une

température de 305 K. Les contours de variation de substrat se présentent comme suit :

Période diurne

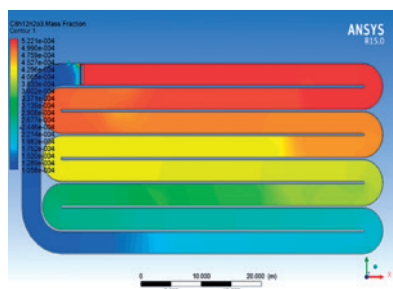


Figure 5: Variation de la concentration du substrat

Période nocturne

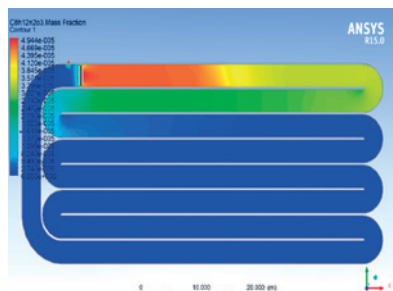


Figure 6: Variation de la concentration du substrat

Les contours présentés montrent une bonne dégradation du substrat influent : La dégradation du substrat est moins performante dans le cas nocturne, car les micro-algues ne procèdent plus à la photosynthèse et deviennent consommatrices d'oxygène plutôt que productrices. La concentration du substrat passe d'une valeur de 440 mg/l à une valeur de 204,24 mg/l avec un rendement épuratoire de 54 %.

IV.2- Étage Bas



Figure 7: État du mélange à t = 2h

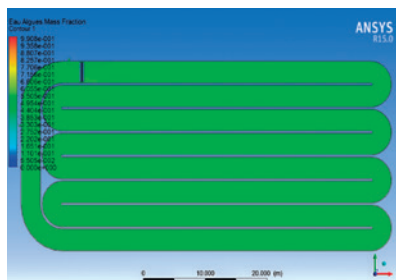


Figure 8: État du mélange à t = 48h

Le contour de la variation du substrat dans le chenal bas pour un temps de séjour de 2j, se présente comme suit :

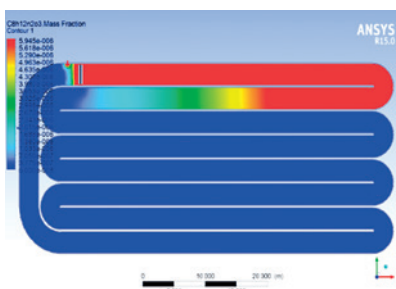


Figure 9: Concentration molaire du substrat (DCO) dans le chenal bas (2j)

La concentration du substrat passe d'une valeur de 204.24 mg/l à une valeur de 138.23 mg/l avec un rendement de 34 %. Le rendement global du CARET en série est donc 72 %.

DISCUSSION

L'analyse des résultats de la simulation montrent que : La diffusion algale au sein du CAHR, se répartit uniformément dans le chenal dès le premier tronçon. Cela est dû principalement à l'action de la roue qui assure la fonctionnalité de mélange et le maintien en suspension des micro-algues. L'état stationnaire de fonctionnement du chenal est atteint après 18 h pour le chenal haut et 48 h pour le chenal bas, ceci est dû au changement progressif des réactions dans le chenal, cas au passage de la réaction de photosynthèse des microalgues à celle de la respiration, plus l'effet de l'ombre du chenal haut sur le chenal bas, qui influence sur l'activité photosynthétique des algues et provoque ainsi une diminution de production d'oxygène dans le chenal bas. Le rendement total a été estimé à une valeur de 72 %, ce rendement est

supérieur à la valeur de 68 %, enregistrée pour un système classique de CAHR, et nécessite même un temps de séjour optimisé qui est égal à 3 jours, valeur optimale par rapport à la valeur de 4 jours dans le système classique.

CONCLUSION

Notre étude était centrée sur l'utilisation du logiciel de simulation ANSYS Fluent pour modéliser la diffusion algale dans un Chenal Algal à Haut Rendement en mode étage (CARET). Il nous a permis dans un premier temps à cerner les différents phénomènes et mécanismes gouvernant le fonctionnement du CARET.

Nous avons ensuite étudié la diffusion algale dans le CARET pendant les périodes diurnes et nocturnes pour la disposition d'alimentation hydraulique en série. L'examen des résultats, dévoile le rôle que joue la présence de la roue d'agitation sur uniformité de la diffusion algale, une efficacité épuratoire remarquable pour un temps de séjour de 3 jours.

D'après l'analyse des résultats obtenus, la technique de traitement CARET, nous a permis, par ses temps de séjour courts, à la fois de traiter un grand volume d'eaux usées, une réduction des surfaces nécessaires et une réduction des pertes d'eau par évaporation, ce qui présente un intérêt économique important. Toutefois, la validation des résultats ne peut s'effectuer que par des mesures et expériences sur de réels bassins superposés, non seulement pour valider les résultats obtenus, mais aussi pour mettre en valeur la simulation CFD comme un outil fiable et puissant permettant l'étude exhaustive et minutieuse des phénomènes réels les plus complexes.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier du Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST).

Bibliographie

- OSWALD W.J., 1977. A syllabus on waste pond fundamentals. BEHS 259. Biomedical and Environmental Health Sciences School of Public Health, Univ. of Berkeley USA, 112 p.
- SHELEF G., AZOV Y., MORAIRO R., ORON G., 1980. Algal mass production as an integral part of waste treatment and reclamation system. In *Algal Biomass: Production and use* (Edité par Shelef G. et Soeder C.J.), Amsterdam, Elsevier, 163-169.
- REYNOLDS C.S., 1989. Physical determinants of phytoplankton succession. In *Plankton ecology. Succession in plankton communities* (Edité par Sommer U.), Berlin, Springer-Verlag, 9-56.
- JELLAL J., 1994. Contribution à l'optimisation des performances d'un chenal algal à haut rendement dans l'élimination de la matière organique. Thèse d'état, Université Sidi Med Ben Abdellah, Maroc, 200 p.
- EL HAMOURI B., 2004. Réacteurs anaérobies et chenal algal à haut rendement pour l'épuration des eaux usées des petites communautés; Monographie; JAV Hassan.
- TARFAS A ET AL., 2014. Modélisation et optimisation de fonctionnement du Réacteur anaérobie dans le système intégré pour le traitement des eaux usées domestiques.
- OSWALD W.J., 1988. Large scale culture Systems. Engineering aspects. In *Microalgal Biotechnology* (Edité par Borowitzka M. et Borowitzka L.), Cambridge: Cambridge University Press, 357-392.