



**RESEARCH ARTICLE**

**ETUDE THERMIQUE DU CHENAL ALGAL À HAUT RENDEMENT**

**Hichame Ihmaine\*, Ali Tarfas, Jaouad Elghabi, Meriem Bamaarouf, Abdelilah Abid et Jama Eddine Jellal**

Laboratoire de génie civil, Structure 'Traitement des Eaux', Ecole Mohammedia d'Ingénieurs, Université Mohammed V - Agdal, Avenue ibn sina, BP 765 Agdal, Rabat, Maroc

**ARTICLE INFO**

**Article History:**

Received 5<sup>th</sup>, March, 2015  
Received in revised form 12<sup>th</sup>,  
March, 2015  
Accepted 6<sup>th</sup>, April, 2015  
Published online 28<sup>th</sup>,  
April, 2015

**Key words:**

Channel algal high-output,  
Hydrodynamic, Distribution of  
the residence time, Heat  
exchange.

**Copyright** © Hichame Ihmaine *et al.*, This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**INTRODUCTION**

Le Maroc a connu durant les dernières années de graves périodes de sécheresse qui accentuent son déficit en eau et dont les retombées négatives sur le développement du pays sont évidentes. Partant de ce constat, le Maroc prévoit la construction de plusieurs stations d'épuration pour améliorer la réutilisation des eaux usées afin de lutter contre le gaspillage et apporter une aide non négligeable à la pénurie de l'eau. Jusque là, la majorité des procédés adoptés pour l'épuration des eaux usées domestiques sont des systèmes extensifs. Ces derniers ont plusieurs inconvénients tels que:

L'utilisation d'une grande superficie, l'émanation des odeurs nauséabondes et la production de quantités importantes de boues (Eckenfelder. W, 1982).

Ainsi, le système intégré réacteur anaérobie-chenal algal à haut rendement semble être une solution adéquate dans ce sens, car c'est un système à faible coût énergétique, nécessitant de faibles superficies et permettant d'abattre efficacement la charge polluante (Jellal. J, 1994).

Ce système réduit les coûts énergétiques et génère une production de biomasse algale pouvant être récoltée, et présentant une valeur

**ABSTRACT**

The started study was carried out by using the data of the Control station of the agronomic and veterinary institute Hassan II, it is interested in the distribution of the temperature within high-out put the Algal Channel to improve its design and thus to optimize its operation.

Our article is focused initially, to make a theoretical approach, a phenomenologic analysis and consequently asetting in adequate equation with the problem and in the second time, with the use of the FLOWING computer code for the simulation of the variation in the temperature according to the contact of space.

The got results makes it possible to know:

- Distribution of the profiles of the temperature in the channel.
- Impact of the mode of flow of the channel on the temperature.
- The importance which the wheel of agitation in heat exchange plays.

ajoutée pour la valorisation des protéines qui peuvent être utilisées dans divers domaines cosmétiques, agroalimentaires, pharmaceutiques ou pour l'alimentation animale voire humaine (Jellal. J, 1994 ; El hamouri. B, 2004).

Plusieurs recherches ont été entreprises afin de contribuer à l'adaptation du système au contexte marocain et à l'optimisation de son fonctionnement (Tarfas A. *et al* 2014). Toutefois, l'épuration des eaux usées a toujours été envisagée du point de vue de l'abattement d'une charge polluante, qu'elle soit organique, particulière ou encore liée à la présence de germes pathogènes. De nombreuses théories décrivant l'activité microbienne ou le mode d'écoulement des bassins ont été mises au point pour tenter de mieux comprendre et de mieux maîtriser les rendements de tel ou tel ouvrage d'épuration (Edeline .F, 1980).

A l'opposé, l'un des aspects les peu traité par les chercheurs est sans aucun doute le régime thermique qui caractérise pourtant tout procédé de traitement des eaux usées. Malgré son influence considérable sur des phénomènes aussi variés que les cinétiques épuratoires, le transfert d'oxygène ou la viscosité de l'eau, très peu d'auteurs se sont penchés sur ce sujet (Bamaarouf. M *et al*, 2009). Élément clef d'une station d'épuration à système intégré, notre étude se propose précisément d'étudier la distribution de la température dans le chenal algal à haut

\*Corresponding author: **Hichame Ihmaine**

Laboratoire de génie civil, Structure 'Traitement des Eaux', Ecole Mohammedia d'Ingénieurs, Université Mohammed V - Agdal, Avenue ibn sina, BP 765 Agdal, Rabat, Maroc

rendement. Cette étude sera déclinée sous une approche dynamique, permettant une analyse fine des variations de la température. Son utilisation rendrait même possible le suivi en continu, voire en temps réel, du régime thermique du CAHR. Pour ce faire, une simulation à l'aide du code de calcul Fluent sera faite.

**Matériel et Méthode**

**Zone d'étude**

**Tableau 1** Les informations de la zone d'étude

Pays	Maroc
Ville	Rabat
Situation géographique	Nord ouest
Lieu	Institut agronomique et vétérinaire Hassan II
Coordonnées géographiques	Latitude : 34° 0' 47 N
	Longitude : -6° 49' 57 O

Les ouvrages de la station

**Tableau 1** Les ouvrages de la Station d'épuration

Désignation de l'ouvrage	Caractéristique
Traitement Préliminaire	Dégrilleur et Dessableur
Prétraitement	Réacteurs Anaérobies
Post de Traitement	Chenal Algal à Haut Rendement
Traitement tertiaire	Bassin de Maturation

**Chenal Algal à Haut Rendement**

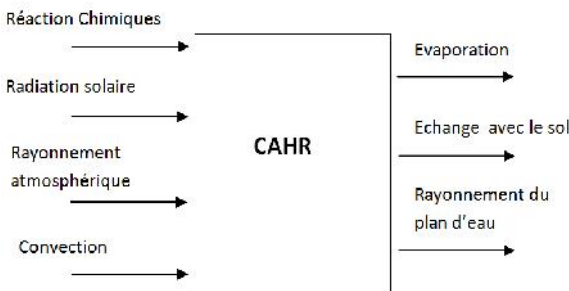
Notre étude se focalise sur Le Chenal algal à haut rendement qui est un réacteur photosynthétique dans lequel, cohabitent des algues microscopiques avec des bactéries hétérotrophes. Ce bassin à la forme d'un carrousel avec une faible profondeur (entre 35 et 50 cm). Le mélange est maintenu en agitation permanente grâce à une roue à palettes (Oswald et Gotaas 1957; Oswald, 1988).

**Objectif et intérêt**

La température est un paramètre qui régit une variété de phénomènes. Notre objectif, à travers cet article, est d'étudier la distribution de la température dans le chenal algal à haut rendement, plus précisément, faire une modélisation numérique permettant de déterminer la valeur de la température en fonction des coordonnées de l'espace.

**Equation régissant**

Le but de notre article est de modéliser le Chenal Algal à Haut Rendement pour améliorer le fonctionnement du système Intégré. Pour cela on utilisera l'équation de Continuité et l'équation du Bilan de l'Energie écrites dans le système de coordonnées cartésiennes.



**Figure 1** Les mécanismes de Chenal Algal à Haut

**Analyse phénoménologique**

Dans un CAHR, les formes d'apport ou de dissipation d'énergie considérées comme les plus importantes sont représentés sur la figure suivante:

**Mise en équation**

**Equation de l'Energie**

Nous pouvons formuler l'équation de l'énergie comme suit

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \text{div}(\lambda \nabla T) + T\beta \frac{dP}{dt} + q' + h_c(T_A - T)A + \epsilon_w \sigma T^4 A + A_e(T - T_e) + q_R + \phi$$

Tous les paramètres intervenant dans l'équation ci-dessus sont définis précédemment.

q terme constant qui regroupe le flux des radiations solaires, le flux du rayonnement de l'atmosphère et le flux d'évaporation (AJDOR et al, 1995).

$$q' = \frac{1}{V} [A\lambda\rho_w(i + jV)(P_A - P_w) + A(1 - \delta)(1 + 0,17N^2)\sigma K_p \epsilon_A T_{sky}^6 + A(1 - \delta)G]$$

Et : q<sub>R</sub> flux de chaleur apportée/absorbée par la réaction chimique

$$q_R = \frac{1}{V} \left( \Delta_r H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta_r C_p^0 dT \right)$$

Avec: V volume du CAHR

**Equation de continuité**

Ecriture de l'équation de continuité :

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

Les équations instantanées de continuité et de Navier-Stokes en utilisant la convention d'Einstein dans le cas d'un fluide incompressible, sans terme source.

$$\rho \left( \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \alpha + \mu \nabla^2 V_x$$

$$\rho \left( \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 V_y$$

$$\rho \left( \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \cos \alpha + \mu \nabla^2 V_z$$

étant l'angle d'inclinaison du fond du CAHR.

Lorsque l'on réécrit ces équations en faisant intervenir les champs moyens de vitesse V<sub>i</sub> et de pression p, nous obtenons : Equation de continuité :

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

Equation de Navier-Stokes

$$\rho \left( \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \alpha + \mu \nabla^2 V_x + \frac{\partial v_x'^2}{\partial x} + \frac{\partial v_x' v_y'}{\partial y} + \frac{\partial v_x' v_z'}{\partial z}$$

$$\rho \left( \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 V_x + \frac{\partial v'_x v'_x}{\partial x} + \frac{\partial v'_x v'_y}{\partial y} + \frac{\partial v'_x v'_z}{\partial z}$$

$$\rho \left( \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho g \cos \alpha + \mu \nabla^2 V_y + \frac{\partial v'_y v'_x}{\partial x} + \frac{\partial v'_y v'_y}{\partial y} + \frac{\partial v'_y v'_z}{\partial z}$$

Ces nouvelles équations (« Reynolds averaged » Navier-Stokes) ont la même forme générale que les équations de continuité et de Navier-Stokes en régime instantané, mais dans la nouvelle équation de Navier-Stokes, il apparaît une nouvelle inconnue. Ce terme  $\overline{v'_i v'_j}$  est appelé tenseur de Reynolds. La résolution des équations ainsi obtenues impose donc la connaissance de cette nouvelle inconnue. Nous utilisons l'approche Boussinesq qui propose de relier ce tenseur à la vitesse moyenne  $V_i$ , et d'introduire la notion de viscosité turbulente  $\nu_t$  (m<sup>2</sup>/s) par la relation:

$$\overline{v'_i v'_j} = \nu_t \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij}$$

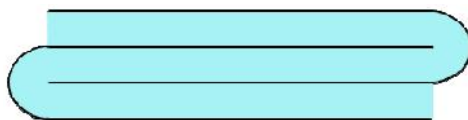
L'estimation du tenseur de Reynolds repose donc sur la détermination de la viscosité turbulente. Plusieurs modèles de physique, et donc de résoudre les équations. Ces modèles reposent sur le constat qu'il faut introduire de nouvelles équations, dites « de fermeture », pour pouvoir déterminer toutes les inconnues. Afin d'établir les profils de température on utilise le logiciel de simulation fluent qui propose plusieurs modèles de turbulences pour résoudre l'équation de Reynolds nous choisissons le modèle de turbulence k - e, élaboré par (Jones et Laudner, 1974) et largement utilisé depuis.

**Données du problème**

Les données présentées ci-après sont issues des caractéristiques de la station de l'IAV.

**Géométrie**

Le CAHR possède la forme d'un carrousel, la géométrie étudiée sera la suivante:



Les caractéristiques géométriques du tronçon rectiligne sont les suivantes:

**Tableau 3** Données géométriques du tronçon rectiligne.

<b>Longueur</b>	<b>50 m</b>
Largeur	3 m
Hauteur	0.5

Les caractéristiques géométriques du tronçon courbe sont les suivantes:

**Tableau 4** Données géométriques du tronçon courbe.

<b>Rayon de courbure</b>	<b>3 m</b>
Largeur	3 m
Angle de courbure	180°

**Données hydrauliques**

Les données concernant l'écoulement dans le CAHR sont illustrées dans le tableau suivant:

**Tableau 5** Données sur l'écoulement.

Régime d'écoulement	Permanent
Débit	1 l/s
Vitesse moyenne	0.13 m/s

Les propriétés du mélange sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 6** Propriétés du mélange.

Propriétés	Eau usée	Algues microscopiques
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	998	1000
Viscosité cinématique (m <sup>2</sup> /s)	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>

L'écoulement dans le chenal algal est turbulent, en effet le calcul du nombre de Reynolds donne le résultat suivant:

$R_e = 56250$

**Hypothèses sur le fluide (mélange eau usée/algues microscopiques)**

Hypothèse sur le comportement rhéologique (Tarfes A. et al, 2014):

- Le fluide en question est un mélange d'eau usée et d'algues microscopiques, du fait de la faible concentration des algues microscopiques, on peut le considérer comme un fluide newtonien et incompressible.
- L'homogénéité du fluide est assurée par la roue d'agitation.

**Données thermodynamiques**

**Tableau 7** Données thermodynamiques.

Température d'entrée	305 K
Température des parois	295K
Température ambiante	295K
Température du ciel	295K
Capacité calorifique de l'eau	4,187 kJ/kg K
Conductivité thermique de l'eau	0,6 W/m.K
Chaleur latente de vaporisation	2,27 kJ/kg
Coefficient de convection des parois	10 W/m <sup>2</sup> K
Rugosité standard des parois	0,001 m

**Simulation numérique**

La simulation numérique de la Température dans le CAHR a été faite par un Code de calcul FLUENT, qui est un logiciel de type CFD (Computational Fluid Dynamics) utilisé pour des calculs multiphasiques complexes. Ce dernier donnera des images 3D illustrant les profils de la Température en fonction de la géométrie du Chenal.

**Le maillage**

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

**Conditions aux limites**

Les conditions aux limites adoptées dans notre logiciel sont :

**Tableau 8** Définition des conditions aux limites.

Eléments	Conditions aux limites
Entrée	Velocity-inlet
Sortie	outflow
Parois	wall
Surface libre	Symetry
Fond	wall
Roue d'agitation	Wall

## RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### Résultats

Les résultats des profils de température obtenus par notre code de calcul sont des images 3D, on présentera dans un premier temps quelques images sur différents points moyennant des coupes transversales et longitudinales, et dans un second temps on regroupera tous les résultats obtenus sous forme de tableau afin de faciliter la lecture.

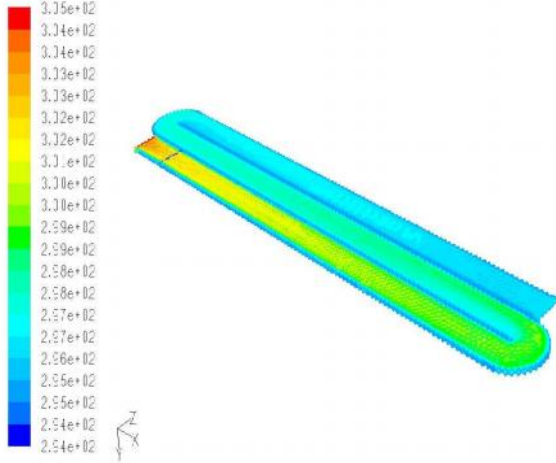


Figure 2 Contour 3D de la température au sein du CAHR

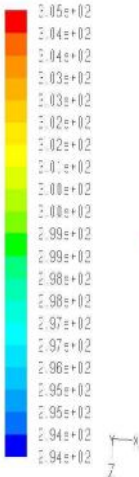


Figure 3 Coupe transversale à 0,4 m de profondeur

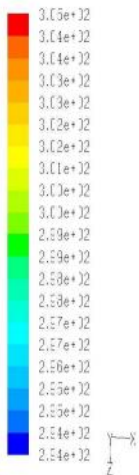


Figure 4 Coupe transversale à 0,2 m de profondeur

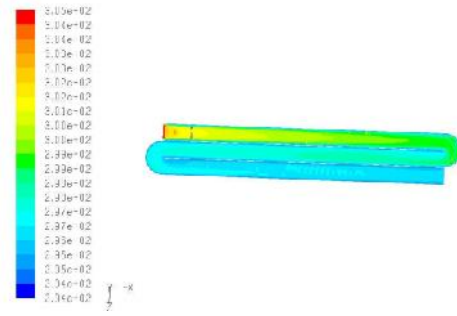


Figure 5 Contour de température de surface dans le CAHR.

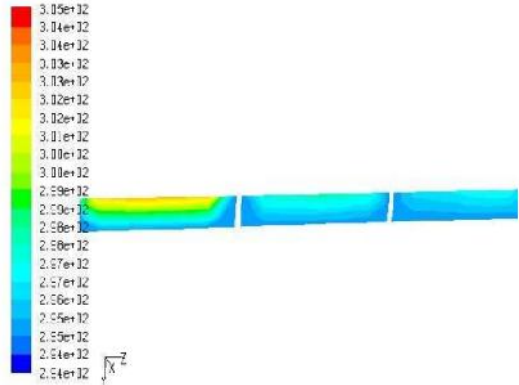


Figure 6 Coupe longitudinale à 5,5 m de l'entrée.

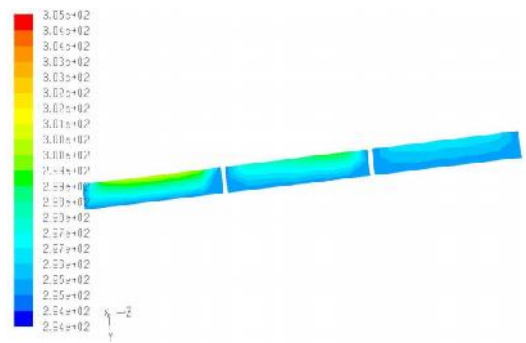


Figure 7 Coupe longitudinale à 40 m de l'entrée.

Les températures simulées sont présentées ci-dessous :

Tableau 9 Températures simulées en surface, (premier couloir).

Distance de l'entrée (m)	Température ( <sup>0</sup> K)		
	Paroi	Centre	Paroi
0	305	305	305
4	302,7	303	302,7
6	300,6	301	300,6
10	300	300,4	300
20	299,65	300	299,65
30	299,05	299,5	299,05
40	298,35	298,9	298,35

Tableau 10 Températures simulées à 20 m de l'entrée, (premier couloir).

Profondeur (m)	Température (0K)
0	300
0,1	299,8
0,2	299,65
0,3	299,34
0,4	297
0,5	295

## DISCUSSION

L'analyse de la figure 1 permet de conclure que :

- Au niveau de l'entrée, une chute de température est observée. Cette chute est due à ce que les eaux usées en provenance du réacteur anaérobie déversées dans le CAHR à une température de l'ordre de 305°K, se retrouve mélangée avec l'eau déjà en circulation dans le CAHR qui est à la température ambiante.
- Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée, la température des eaux usées baisse, cela est dû au fait que la recirculation favorise l'équilibre thermique.
- Après le passage à travers la roue d'agitation, nous remarquons une uniformisation et une diminution de la température, car la roue d'agitation joue un rôle important dans l'uniformisation de la température.
- Au niveau des courbures, la température est quasiment constante, cela est dû à l'existence de zones de turbulence qui étouffent les échanges par convection. Dans ces deux régions, le fluide subit un ralentissement, la convection se trouve diminuée et les échanges sont alors amoindris.
- -Au niveau du troisième couloir, la température devient constante. Ce constat peut appuyer en quelque sorte, le fait que le mélange dans le chenal algal à haut rendement tend à être parfait.
- Le maximum des échanges thermiques apparaît au niveau de la roue d'agitation, cette dernière crée une énergie cinétique supplémentaire qui favorise le transport turbulent du fluide pour atteindre un équilibre thermique rapide.
- L'étude des figures n°2 et n°3 permet de dire que :
- -Le comportement de la température dans les différentes coupes transversales est le même que celui de la surface.
- L'analyse des figures n°4,5 et 6 permet de constater que :
- Une stratification de la température suivant la profondeur est présente dans tout le chenal, ceci est dû essentiellement aux échanges thermiques de surface (phénomène de rayonnement, évaporation ...). Toutefois, cette stratification est minime à cause de la faible profondeur du chenal algal à haut rendement.

## CONCLUSION

Notre étude était centrée sur la détermination de la distribution de la température au sein du chenal algal à haut rendement, et vise à

### How to cite this article:

Hichame Ihmaine *et al.*, Etude Thermique Du Chenal Algal À Haut Rendement. *International Journal of Recent Scientific Research Vol. 6, Issue, 4, pp.3311-3315, April, 2015*

\*\*\*\*\*

améliorer le fonctionnement du système-intégré, en terme de rendement épuratoire et de rendement énergétique. La présente étude nous a permis d'analyser et de comprendre un bon nombre d'aspects physiques importants. Nous avons mis l'accent sur le rôle que joue la présence de la roue d'agitation sur la distribution, l'effet du transport turbulent sur les transferts thermiques, l'influence des zones de turbulence sur la convection et aussi la stratification thermique due aux échanges de surface. Cette étude a donc jeté les bases d'une meilleure connaissance de l'aspect thermique du CAHR.

## Références

1. Ajdor Y, Harti A, Benzerri A, Fothi A, 1995. Modèle hydrothermique d'un lac réservoir. Première partie : modélisation des échanges thermiques. Revue Marocaine du Génie civil.
2. Bamaarouf Meriem, Jellal Jamal Eddine et Bouzidi Abdelhamid ,2009. Étude de la cinétique d'élimination de la matière organique dans un système intégré réacteur anaérobie-chenal algal à haut rendement. Thèse nationale, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs. Maroc.
3. Eckenfelder.W, 1982. « Gestion des eaux usées urbaines et industrielles » Traduit de l'américain par L.VENDEVENNE. Ed. Technique et Documentation.
4. Edeline .F,1980. L'épuration biologique des eaux résiduaires : théorie et technologie. TECH & DOC(Éditeur), Paris, France, 306 p.
5. El hamouri .B.,2004. Réacteurs anaérobies et chenal algal a haut rendement pour l'épuration des eaux usées des petites communautés ; Monographie ; IAV Hassan
6. 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.
7. Oswald W.J. et H.B. GOTAAS, 1957. Photosynthesis in sewage treatment. Transaction of the American Society of Civil Engineers, 122, 65-105.
8. Tarfas A *et al.*, 2014. Etude Hydrodynamique du Réacteur Anaérobie pour le Traitement des Eaux Usées Domestiques.
9. Tarfas A *et al.*, 2014. Modélisation et optimisation de fonctionnement du Réacteur anaérobie dans le système intégré pour le traitement des eaux usées domestiques