

SIMULATION DU TRAITEMENT PAR BOUES ACTIVEES DES EFFLUENTS INDUSTRIELS EN MILIEU ANAEROBIE : CAS DE SANIA EN CÔTE D'IVOIRE

Konan Lopez KOUAME^{1*} et Nogbou Emmanuel ASSIDJO²

¹*Ecole Doctorale Polytechnique (EDP) de Yamoussoukro, Laboratoire de Procédés Industriels, de Synthèse, de l'Environnement et des Energies Nouvelles (LAPISEN) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire*

²*Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro, Laboratoire Responsable du Groupe de Nutrition et de Technologies Alimentaires (GNTA) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, e-mail : kouamekonanlopez@gmail.com

RÉSUMÉ

L'industrialisation du monde a occasionnée une augmentation de la production des eaux usées industrielles. Ce qui constitue un danger pour l'environnement. Toutefois, ces effluents doivent être traités avant leur rejet dans l'environnement. Ce travail a fait l'objet de la conception d'un modèle multiphysique de traitement des effluents industriels. Nous avons présenté dans ce document une modélisation du traitement des effluents industriels par boues activées en milieu anaérobie. Les phénomènes de ce traitement sont décrits par des équations de conservation de masse, de diffusion, et les équations du modèle ASM, permettant ainsi de simuler le fonctionnement du système par le logiciel Comsol. La première phase a consisté à la caractérisation des effluents traités dans la station de traitement des eaux usées de Sania-cie situé dans la ville d'Abidjan précisément dans la zone industrielle de Vridi, rue du textile. La seconde phase a été la modélisation et les simulations. Pour valider le modèle, les paramètres des effluents ont été déterminés expérimentalement. Ces valeurs expérimentales ont été utilisées pour concevoir le modèle. Par ailleurs, les valeurs expérimentales de la DCO ont été confrontées à celles du modèle afin de valider les résultats du modèle. Les résultats expérimentaux et simulés sont quasi identiques d'où la validation du modèle avec un coefficient de performance de $\gamma = 97 \%$. Cette étude a également montré que la plage optimale de DCO pour le traitement anaérobie des effluents de SANI_cie est [1,7 ; 1,9] (kg/m³).

Mots-clés : *boues activées, simulation, anaérobie, effluents industriels.*

Konan Lopez KOUAME et Nogbou Emmanuel ASSIDJO

ABSTRACT

Simulation of activated sludge treatment of industrial effluents in an anaerobic environment : cas of SANIA in Ivory Coast

The industrialization of the world has led to an increase in the production of industrial wastewater. This constitutes a danger for the environment. However, these effluents must be treated before being released into the environment. This paper was the purpose of the design of a multiphysical model for the treatment of industrial effluents. In this paper, we presented a modeling of the treatment of industrial effluents by activated sludge in anaerobic environment. The phenomena of this processing are described by mass conservation equations, diffusion, and equations of the ASM model, thus making it possible to simulate the operation of the Comsol software system. The first phase consisted of the characterization of treated effluents in the factory of Sania-cie and the second phase consisted of modeling and simulations. To validate the model, effluent parameters were determined experimentally. These experimental values were used to design the model. Besides, the experimental values of the chemical oxygen need (COD) were compared with those of the model in order to validate the results of the model. The experimental and simulated results are almost identical, hence the validation of the model with a coefficient of performance of $\gamma = 97\%$. This study also showed that the optimal range of COD for the anaerobic treatment of the effluents of SANIA_cie is $[1,7 ; 1,9]$ (kg/m³).

Keywords : *activated sludge; simulation; anaerobic, industrial effluents.*

I - INTRODUCTION

La gestion des déchets liquides constituent une problématique pour toutes les industries [1]. La société SANIA_cie, située dans la ville d'Abidjan précisément dans la zone industrielle de Vridi, rue du textile, industrie agro-alimentaire spécialisée dans le raffinage et la commercialisation de l'huile de palme n'échappe pas à cette règle. En effet les activités de l'industrie (raffinage, fabrication de fûts métalliques et emballages) engendrent des rejets liquides avec une forte biodégradabilité [2]. Il convient donc de traiter ces rejets liquides (eaux polluées) afin de les rendre conformes aux spécifications de rejets en Côte d'Ivoire. Dans cette usine, l'accent est mis sur le traitement biologique en raison de la grande biodégradabilité des effluents traités. Les traitements biologiques reposent sur l'utilisation des microorganismes qui dégradent les polluants organiques. Ces traitements sont généralement réalisés dans des bioréacteurs avec des conditions aérobies ou anaérobies [3]. Le traitement est dit en anaérobie lorsqu'il se fait en l'absence d'oxygène. Afin de

comprendre le comportement des microorganismes anaérobies et de déterminer la performance des procédés anaérobies, une simulation multiphysique s'impose. C'est dans cette optique que s'inscrit ce projet de modélisation du traitement biologique (en milieu anaérobie) des eaux usées afin de suivre les paramètres et d'avoir une connaissance plus approfondie des traitements anaérobies.

II - MÉTHODOLOGIE

II-1. Matériel

Plusieurs matériels ont été utilisés dans la réalisation de ce projet. Ce sont entre autres les rapports de suivi, les fiches techniques, des logiciels, des réactifs chimiques et appareillages. Ces équipements nous ont permis d'effectuer des analyses des différents paramètres recherchés. Ainsi le mixeur (WARING PRODUCTS DIVISION) a permis d'obtenir des échantillons homogènes. La balance Sartorius pour la pesée des réactifs chimiques. Pour les analyses le spectrophotomètre HACH DR 2800 a permis de déterminer, les MES, la turbidité et le chlore total. Le pH-mètre pour le potentiel en hydrogène; L'oxitop® (WTW) pour la DBO et le spectromètre HACH DRB 200 pour la DCO. Pour les dosages la verrerie classique de laboratoire a été utilisée [4]. Ainsi, Les caractéristiques et les paramètres du traitement de la station de traitement des effluents de SANIA-cie sont consignés dans le *Tableau 1* ci-après :

Tableau 1 : Composition moyenne des eaux usées de la station de traitement de SANIA

Paramètres	pH	DCO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	MES (mg/L)	Débit (m ³ /j)
Valeurs	8,5-10,7	900 - 3000	635	2000- 4000	80

pH : potentiel d'hydrogène ; *MES* : matières en suspension ; *DCO* : Demande Chimique en oxygène ; *DBO₅* : Demande Biochimique en Oxygène.
Par ailleurs, le logiciel Comsol multiphysics a été utilisé pour la simulation.

II-2. Définition des phénomènes à modéliser

Cette étude consiste d'abord à modéliser puis à simuler la sédimentation des particules en suspension dans l'eau, la croissance de la biomasse épuratrice et la digestion des substrats en milieu anaérobie [5]. Les physiques qui interviennent dans les traitements anaérobies des eaux usées sont :

- ✓ L'écoulement laminaire ;
- ✓ Le transport d'espèces diluées ;

II-3. Choix du modèle

La difficulté de ce travail réside dans le fait que le logiciel COMSOL utilisé ne dispose pas de système multiphysique préétablie adapté au phénomène de traitement biologique de l'eau. Il nous convient donc de rechercher les équations pouvant décrire les phénomènes et les réactions qui ont lieu lors de la digestion anaérobie des substrats biodégradables contenu dans les effluents à traiter [6]. Ainsi nous avons cherché certains modèles empiriques qui pourraient décrire au mieux le phénomène dans la littérature. Il est ressorti après analyse des modèles empiriques disponibles à ce jour que le modèle de boues activées (Activated Sludge Model : ASM) est le modèle qui décrit au mieux les phénomènes de traitement biologique des eaux usées notamment les traitements par les boues activées. Les modèles ASM fournissent les équations des phénomènes tels que l'oxydation du carbone, la nitrification et la dénitrification en quantifiant la cinétique et la stœchiométrie de chaque réaction. Le modèle dénombre au total : 13 variables d'état (variables liées aux phénomènes biologiques), 8 processus et 19 paramètres cinétiques et stœchiométriques [7]. Les principales transformations traduites en équations mathématiques dans notre modèle multiphysique sont :

- ✓ Croissance anoxie des bactéries hétérotrophes ;
- ✓ Mortalité des bactéries ;
- ✓ Hydrolyse de la matière organique particulière ;
- ✓ L'ammonification de l'azote organique.

Les *Équations* décrivant la digestion des substrats sont regroupées dans le *Tableau 2*.

Tableau 2 : Les équations de la dégradation des matières organiques dans ASM1

Composante Processus	S _I	S _S	X _I	X _S	X _{B,H}	X _{B,A}	X _P	S _O	S _{NO}	S _{NH}	S _{ND}	X _{ND}	Cinétiques p _i [ML ⁻³ T ⁻¹]
Croissance aérobie des hétérotrophes		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$\frac{-1 - Y_H}{Y_H}$			$-iX_B$		$\mu_{H}^a \frac{S_S}{S_S + K_S} X_{B,H}$
Croissance hétérotrophe anoxique		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$\frac{-1 - Y_H}{2,26Y_H}$			$-iX_B$		$\mu_{H}^a \frac{S_S}{S_S + K_S} \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO}} \eta_B X_{B,H}$
Croissance autotrophes						1		$\frac{-4,57 - Y_A}{Y_A}$		$-\frac{1}{Y_A}$	$-iX_B - \frac{1}{Y_H}$		$\mu_{A}^a \frac{S_S}{S_S + K_S} X_{B,A}$
Mortalités hétérotrophes				$(1-f_p)$	-1		f_p					$iX_B - f_p iX_P$	$b_H X_{B,H}$
Mortalités autotrophes				$(1-f_p)$		-1	f_p					$iX_B - f_p iX_P$	$b_A X_{B,A}$
Ammonification											-1		$k_a S_{ND} X_{B,H}$
Hydrolyse de la MOP		1		-1						1			$k_H \frac{X_S}{K_H + X_S} X_{B,H}$
Hydrolyse de l'azote organique											1	-1	$p_2(X_{ND} / X_S)$

II-4. Dessin de la géométrie du bassin anaérobie

La géométrie du bassin anaérobie est présentée par la *Figure 1*.

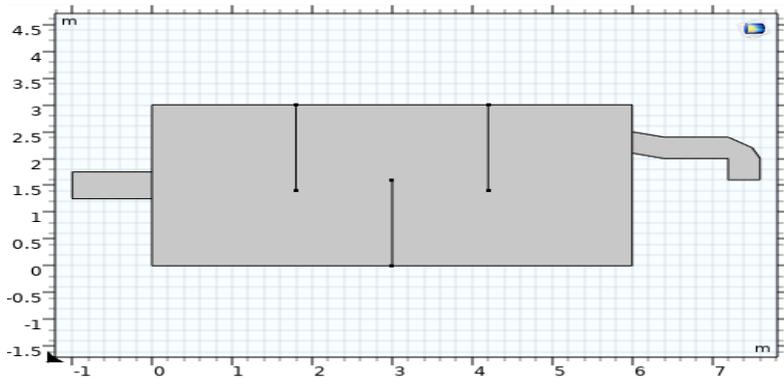


Figure 1 : *Géométrie du bassin anaérobie*

III - RÉSULTATS

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont : la vitesse de l'effluent, la pression, la concentration, la DCO et le taux d'azote. Plusieurs simulations ont été effectuées à partir de différentes valeurs cependant nous présenterons quelques simulations et les résultats obtenus puis les interprétations et discussions qui en découlent.

III-1. Profil de vitesse et de pression

Les profils de vitesse et de pression du bassin anaérobie sont donnés par les *Figures 2 et 3*.

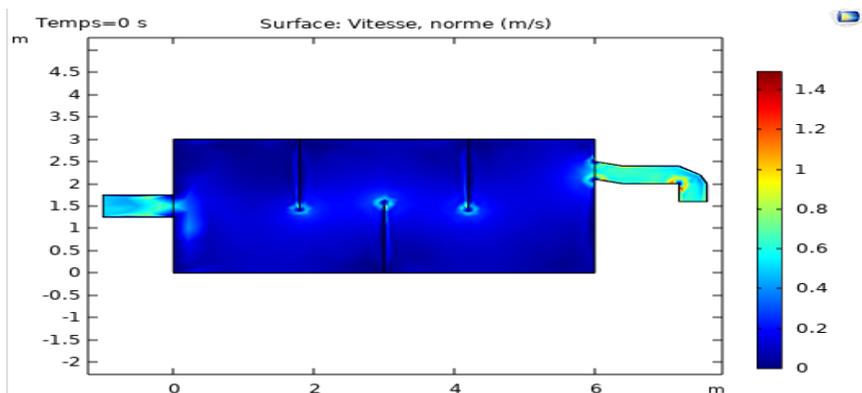


Figure 2 : *Variation de vitesse dans le bassin*

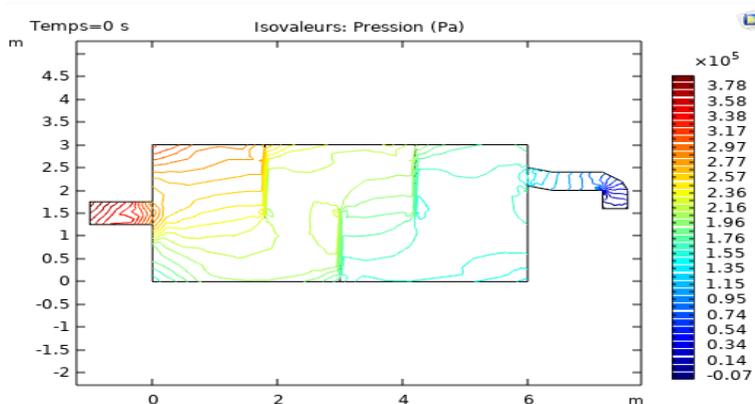


Figure 3 : Variation de pression

L'analyse des **Figures 2 et 3** montre qu'il y a une légère augmentation de la vitesse à la sortie du bassin anaérobie. La vitesse passe de 0,6 m/s à 0,8m/s. Par ailleurs, il y a une baisse de la pression le long du bassin. Cette baisse de pression s'explique par la formation et la décantation de boues du fait de l'activité de la biomasse épuratrice.

III-2. Évolution de la DCO au cours du traitement anaérobie

Plusieurs simulations ont été effectuées afin de visualiser la variation de la DCO en fonction du temps et au cours du traitement anaérobie. Les résultats des simulations effectuées sur l'évolution de la DCO sont présentés par les **Figures 4, 5 et 6**. Ces simulations ont été effectuées pour sur une durée de traitement de 7h. Ce qui correspond à la durée réelle de traitement de l'usine. En effet, le traitement complet se déroule en 24h comme indiqué [8], cependant la phase anaérobie dure 7h.

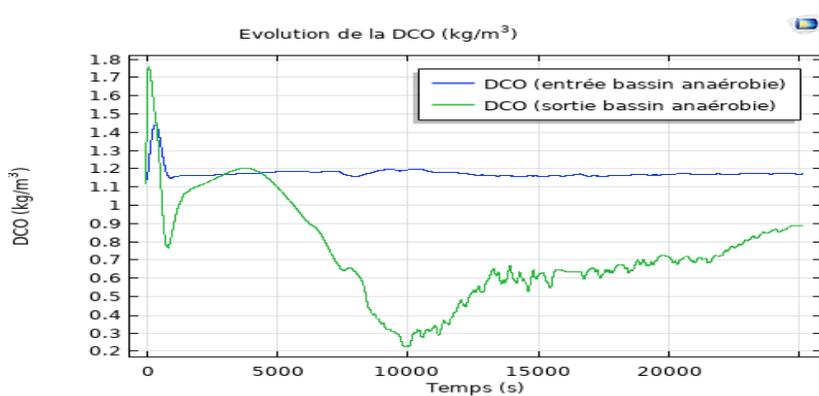


Figure 4 : Variation de la DCO au cours du traitement anaérobie
($DCO_{entrée} = 1.12 \text{ kg/m}^3$)

La **Figure 4** met en exergue la variation de la DCO en fonction du temps et en deux points du bassin anaérobie (à l'entrée et à la sortie). Un effluent qui entre dans le bassin anaérobie avec une DCO initiale de 1120 mg/L soit 1.12 kg/m³, sort du bassin avec une DCO de 0.9 kg/m³ soit un rendement de

$$\tau = \frac{DCO_{extraite}}{DCO_{entrée}} = \frac{1.12-0,9}{1.12} = 19,6 \% \text{ au niveau du traitement anaérobie.}$$

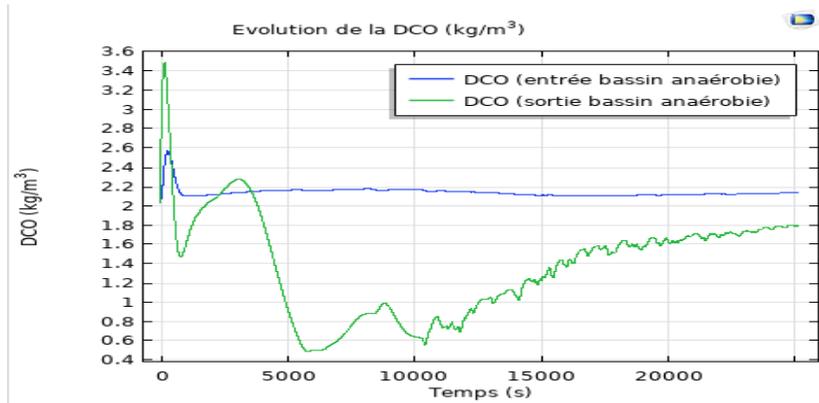


Figure 5 : Variation de la DCO au cours du traitement anaérobie ($DCO_{entrée} = 2.1 \text{ kg/m}^3$)

Pour cette simulation, la DCO d'entrée est 2.1 kg/m³ et la DCO de l'effluent sortant est 1.8 kg/m³. Soit un rendement de $\tau = \frac{DCO_{extraite}}{DCO_{entrée}} = \frac{2.1-1,8}{2.1} = 14,3 \%$

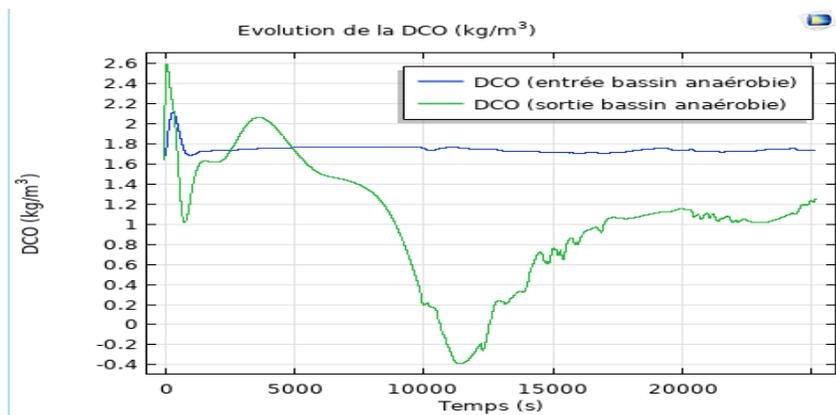


Figure 6 : Variation de la DCO au cours du traitement anaérobie ($DCO_{entrée} = 1.7 \text{ kg/m}^3$)

Pour cette simulation, la DCO d'entrée est 1.7 kg/m³ et la DCO de l'effluent sortant est 1.2 kg/m³. Soit un rendement de $\tau = \frac{DCO_{extraite}}{DCO_{entrée}} = \frac{1.7-1,2}{1.7} = 29,4 \%$.

Pour chaque valeur d'entrée, les rendements ont été calculés puis regroupés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Rendement du traitement en fonction de la charge d'entrée

Entrée du modèle	Sortie du modèle	
COD (kg/m ³)	COD (kg/m ³)	Rendement
1,12	0,9	19,6 %
1,7	1,2	29,4 %
2,1	1,8	14,3 %

Le rendement global du modèle est donné par : $\tau_G = \frac{\sum \tau_i}{3}$. Ainsi le rendement réel du terrain est $\tau_G = 21,1\%$.

III-3. Évolution du taux d'azote au cours du traitement anaérobie

La **Figure 7** montre l'évolution du taux d'azote en fonction du temps et en deux points du bassin (à l'entrée et à la sortie).

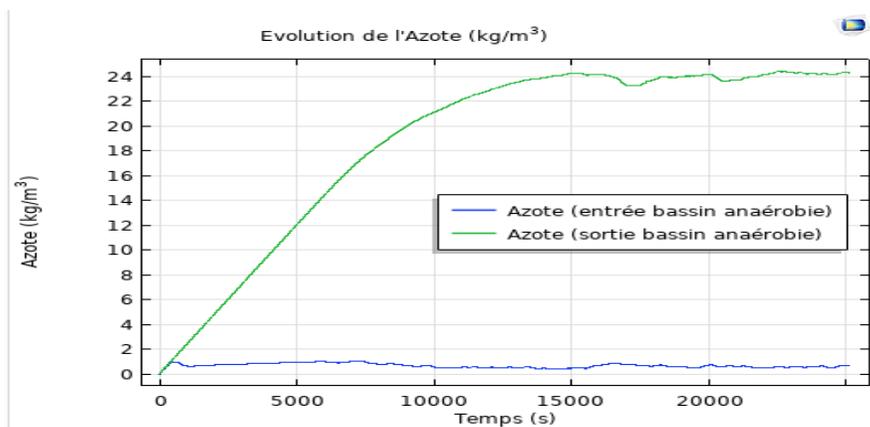


Figure 7 : Variation du taux d'azote au cours du traitement anaérobie

Il ressort de l'analyse de ces graphes qu'un effluent qui entre dans le bassin anaérobie avec une teneur en azote dissous quasi nulle (0,1 kg/m³), suite à l'activité de la biomasse épuratrice hétérotrophes anaérobies conduisant à la dénitrification des molécules de nitrate contenues dans l'effluent à traiter, environ 24 kg/m³ d'azote gazeux est généré. Cette quantité d'azote est dégagée à la sortie du bassin anaérobie dans un bassin appelé zone de dégazage et de clarification avant d'entamer le traitement aérobie.

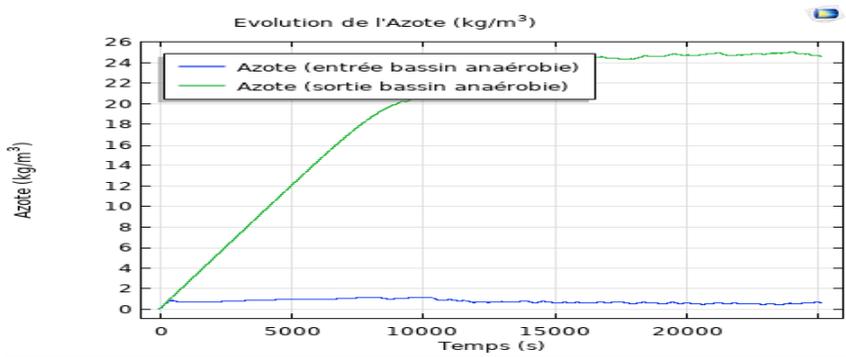


Figure 8 : *Variation du taux d'azote au cours du traitement anaérobie*

Pour cette simulation, la quantité de gaz azote produite à la sortie du bassin est d'environ 25 kg/m³

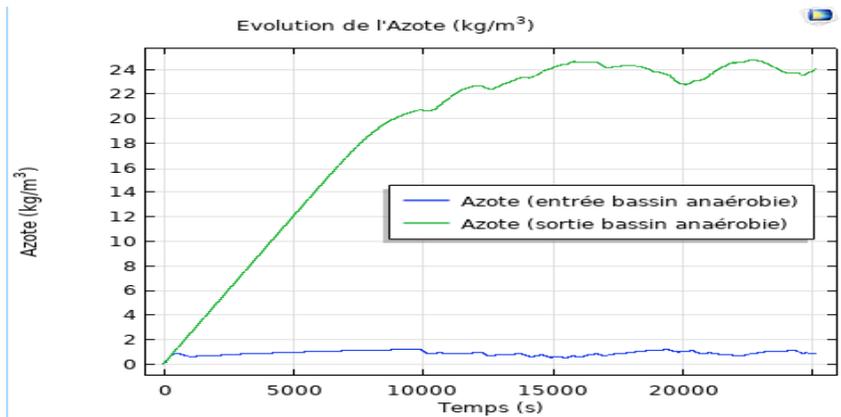


Figure 9 : *Variation du taux d'azote au cours du traitement anaérobie*

Pour cette simulation, la quantité d'azote produite à la sortie du bassin est d'environ 25 kg/m³.

III-4. Validation du modèle

Les valeurs de DCO des effluents de SANIA avant et après traitements sont consignées dans le **Tableau 4**.

Tableau 4 : Quelques valeurs de DCO des effluents de SANIA avant et après traitement

CAF2	Anaérobie Tank	Clarifier
COD (mg/L)		COD (mg/L)
1985		1605
1180		980
1740		1230
2140		1780

Pour un effluent dont la charge à l'entrée du système de traitement est 1130 mg/L, la DCO à la sortie du procédé de traitement anaérobie de SANIA est 980 mg/L soit un rendement de $\alpha_i = \frac{DCO_{extraite}}{DCO_{entrée}} = \frac{1985-1605}{1985} = 19,14 \%$. Soit $\alpha = 19,2 \%$. Pour chaque valeur d'entrée, les rendements ont été calculés puis regroupés dans le **Tableau 5**.

Tableau 5 : Rendement du traitement en fonction de la charge d'entrée

CAF2	Bassin anaérobie	
COD (mg/L)	COD (mg/L)	Rendement
1985	1605	19,2%
1740	1230	29,3%
1180	980	17%

Le rendement réel obtenue sur le terrain est donné par : $\alpha = \frac{\sum \alpha_i}{3}$. Ainsi le rendement réel du terrain est $\alpha = 21,8\%$. Le rendement du modèle obtenu ($\tau_G = 21,1 \%$) est près qu'identique à celui obtenu sur le terrain qui est $\alpha = 21,8 \%$. Ce qui permet de calculer le coefficient de performance γ du modèle établit. $\gamma = \frac{\tau_G}{\alpha}$. On obtient ainsi $\gamma = \frac{21,1\%}{21,8\%} = 96,8\%$ Soit $\gamma = 97 \%$. Le modèle ainsi établit est jugé performant relativement à la DCO puisqu'il fournit un coefficient de performance ($\gamma = 97 \%$) très proche de 100 %. Le modèle ainsi établit être jugé performant.

III-5. Valeurs optimales de la DCO

Il s'agit de déterminer les valeurs de la DCO pour lesquelles le rendement est meilleur. La simulation suivante (**Figure 10**) est faite sur la base des résultats des simulations effectuées ci-avant.

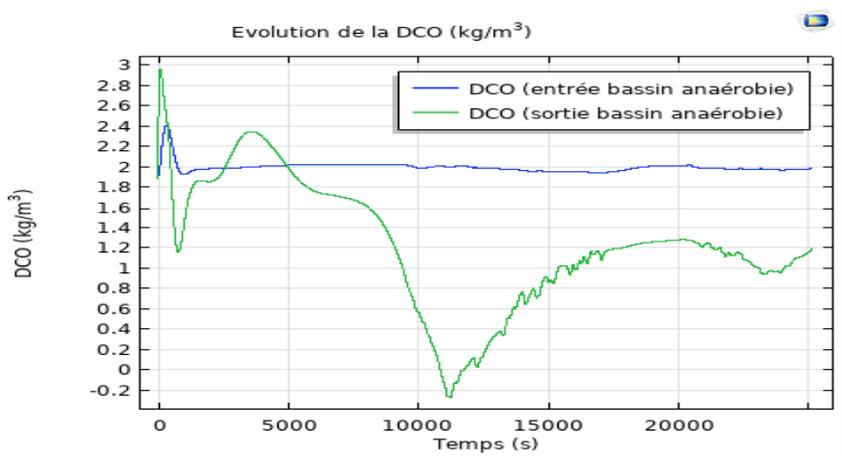


Figure 10 : Variation de la DCO au cours du traitement anaérobie ($DCO_{entrée} = 1.9 \text{ kg/m}^3$)

Pour cette simulation, la DCO d'entrée est 1.9 kg/m^3 et la DCO de l'effluent sortant est 1.2 kg/m^3 . Soit un rendement de $\tau = \frac{DCO_{extraite}}{DCO_{entrée}} = \frac{1.9-1.2}{1.9} = 36,8 \%$. Les résultats des simulations effectuées sont consignés dans le **Tableau 6** ci-après :

Tableau 6 : Rendement du traitement en fonction de la charge d'entrée

Entrée du modèle	Sortie du modèle	
COD (kg/m³)	COD (kg/m³)	Rendement
1,12	0,9	19,6 %
1,7	1,2	29,4 %
1,9	1,2	36,8 %
2,1	1,8	14,3 %

L'analyse du tableau montre que le rendement du procédé augmente pour des valeurs de DCO variant de 1.12 kg/m^3 (19,6 %) jusqu'à 1.9 kg/m^3 (36,8 %). Au-delà de cette valeur, le rendement chute jusqu'à 14,3 % pour une valeur de DCO égale à $2,1 \text{ kg/m}^3$. Les valeurs de DCO fournissant les meilleurs rendements sont 1.7 kg/m^3 avec un rendement de 29,4 % et 1.9 kg/m^3 avec un rendement de 36,8 %. Il ressort donc de cette analyse que la plage optimale de DCO pour le traitement anaérobie des effluents de SANI_cie est $[1,7 ; 1,9] \text{ (kg/m}^3\text{)}$.

IV - DISCUSSION

La présente étude a permis de montrer que les paramètres qui permettent d'évaluer l'efficacité du traitement anaérobie sont : la DCO et le temps de séjour. Le traitement est d'autant efficace que lorsque le temps de séjour pour la gestion des substrats et le temps faire sédimenter la quasi-totalité des suspensions est petit [10 - 13]. Une digestion bien effectuée conduit à un bon rendement du procédé de traitement biologique (boue activée). Pour ce faire, l'effluent d'entrée dans le réacteur doit être en écoulement laminaire. C'est ainsi que [14] a affirmé que la dégradation photocatalytique d'un polluant dans un réacteur est plus importante à faible débit. Toutefois, une légère augmentation de vitesse et de pression est constatée à la sortie du bassin. Ceci s'explique par la formation et l'accumulation de boue au fond du bassin. Le rendement du digesteur anaérobie est assez faible. En effet, le bassin anaérobie n'étant pas oxygéné, l'activité des microorganismes anaérobie est fonction de la charge en matière organique azotée [15, 16]. Le traitement anaérobie est d'autant plus efficace que lorsque la pollution azotée est importante dans l'effluent à traiter. Puis inversement un effluent peu chargé en composés azoté biodégradable fourni un faible rendement [17, 18]. La réaction d'assimilation de matière organique par les bactéries hétérotrophes en l'absence d'oxygène dissous et de présence de nitrates (NO_3) peut être représentée par la réaction suivante : Matière organique + bactéries \rightarrow Nouvelles Bactéries + N_2 + H_2O + CO_2 Cette réaction est dite « de dénitrification » car elle se traduit par la réduction des nitrates en azote moléculaire (N_2), gaz qui retourne à l'atmosphère. Cette transformation est également appelée réduction dissimilative [19]. Le coefficient de performance du modèle étant $\gamma = 97 \%$ le modèle peut être jugé performant car il reflète le cas réel. C'est ainsi que Vaxelaire., (1994) [20] a affirmé que : malgré les divergences existant entre l'expérience et la théorie, les résultats de la simulation peuvent donner une bonne idée de la durée des séquences d'aération à appliquer pour diminuer le coût énergétique tout en évoluant en phase aérobie.

V - CONCLUSION

Ce travail a fait l'objet de la conception et de la validation d'un modèle numérique. Nous avons présenté dans ce document une modélisation du traitement des eaux usées industrielles par boues activées plus précisément le traitement anaérobie. Ces modèles sont décrits par des équations de conservation de masse, les équations de diffusion, et les équations du modèle ASM (Model de boues activées), permettant ainsi de simuler le fonctionnement du système de traitement sous le logiciel Comsol. La première phase de cette étude a consistée à la caractérisation des effluents traités dans l'usine de

traitement de Sania-cie. La seconde phase de cette étude a été la modélisation et les simulations numériques du réacteur anaérobie. Pour la validation du modèle, une étude expérimentale a été effectuée. Dans cette étude, les paramètres des effluents (DCO) ont été déterminés expérimentalement à la sortie du bassin anaérobie. Ces valeurs expérimentales ont été confrontées à celles du modèle numérique en vue de valider les résultats prédits par la simulation numérique. On observe une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés ; ce qui permet une validation du modèle numérique du traitement anaérobie avec un coefficient de performance de $\gamma = 97 \%$. Cette étude a également montré que la plage optimale de DCO pour le traitement anaérobie des effluents de SANI_cie est [1,7 ; 1,9] (kg/m³).

RÉFÉRENCES

- [1] - R. GHEZLI, N. BELARIF, Contribution à l'évaluation de la qualité des effluents industriels et déchets solides au niveau de l'entreprise nationale des industries de l'électroménager ENIEM de tizi ousou, Université Mouloud Mammeri, (2017)
- [2] - M. BERTE, C. ADOU, Importance de la modélisation dans l'industrie chimique : cas pratique de la modélisation du traitement biologique des eaux usées, Rapport de projet interne, École Supérieure d'Industrie, (2017) 52 p.
- [3] - A. BOUKERROUCHA, Modélisation des stations d'épuration à boues activées cas de la station de Baraki (Alger). Thèse de l'École Supérieure d'Agronomie EL HARRACH ALGER, (2011)
- [4] - B. J. KONE, Optimisation du process de traitement des effluents de SANIACie, mémoire de fin d'étude, École Supérieure d'Industrie, (2015) 94 p.
- [5] - A. EL. GHAMMAT, K. TEMSAMANI RIFFI, M. HASSANI ZERROUK, A study of the performance of a sequential bioreactor plant for the treatment of dairy effluents, *LARHYSS journal* P-ISSN 1112-3680/E- ISSN 2602-7828, (2019) 7 - 21
- [6] - B. GIL-PULIDO, E. TARPEY, E. ALMEIDA, W. FINNEGAN, evaluation of dairy processing wastewater biotreatment in an IASBR system: Aeration rate impact on performance and microbial ecology, *Biotechnology reports* 19, e00263, (2018)
- [7] - S. HEDDAM, Contribution à la modélisation de la qualité des eaux. Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique d'Alger, (2012) 210 p.
- [8] - M. BENNEOUALA, Y. BAREHA, E. MENGELLE, M. BOUNOUBA, Hydrolysis of particulate settleable solids (PSS) in activated sludge is determined by the bacteria initially adsorbed in the sewage, *revue water research*, (2017) 400 - 409
- [9] - B. IMEN, Caractérisation de la taille des particules et de leur vitesse de chute en décantation primaire, Maîtrise en génie des eaux, Université de Laval, (2013) 249 p.

- [10] - M. ABOUZLAM, Optimisation d'un procédé de traitement des eaux par ozonation catalytique, (2014)
- [11] - J. BENSALD, Contribution à la dépollution des eaux usées par électrocoagulations et par adsorption sur des hydroxydes d'aluminium. Thèse de doctorat d'état, Université Mohammed v - Agdal faculté des sciences rabat, (2009) 6 - 43 p.
- [12] - M. MACHKOR, Modélisation et optimisation du taux du sulfate d'aluminium dans la station de traitement des eaux de barrage BAB LOUTA par la méthodologie du plan surface de réponse, Mémoire de fin d'études, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, (2013) 59 p.
- [13] - A. ZALAGHI, F. LAMCHOURI, M. MERZOUKI, Traitement par le procédé SBR (Sequencing Batch Reactor) des lixiviats de la décharge publique non contrôlée de la ville de Taza (Maroc), *International journal of invention and applied studies*, 23 (3) (2018) 299 - 309
- [14] - B. NIDHAL, Modélisation et simulation numérique de la dégradation photocatalytique d'un polluant modèle dans un microréacteur. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, (2012) 169 p.
- [15] - L. AMEL, Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station Hamadi-Kroma de Skikda. Mémoire de Magister, Université de Skikda Faculté des Sciences, Département des Sciences Fondamentales, Spécialité : Chimie ; Option : Pollutions Chimiques & Environnement, (2009) 120 p.
- [16] - S. MOULIN, Traitement des eaux usées. Centre d'Enseignement et de Recherches sur l'Environnement et la Société Environmental Research and Teaching Institute, (2013)
- [17] - M. ALLAOUI, E. MOHATI, M. SAADALLAH, A. HARFI, Performance épuratoire de STEP de Dar EI Gueddari (Lagunage naturel)/[STEP purifying permormance of Dar EI Gueddari (natuel lagoons), *International journal of innovation and Applied studies*, 16 (4) (2016) 704 - 717
- [18] - D. OUMAR, P. DROGUI, R. DUBE, G. BUELNA, Utilisation des procédés électrochimiques et leurs combinaisons avec les procédés biologiques pour le traitement des lixiviats de sites d'enfouissement sanitaires, *Revue des sciences de l'eau/ Journal of water science*, 29 (1) (2016) 63 - 89
- [19] - V. ROCHER, C. JOIN, S. MOTTELET, J. BERNIER, la production de nitrites lors de la dénitrification des eaux usées par biofiltration-stratégie de contrôle et de réduction des concentrations résiduelles, *Revue des sciences de l'eau/Journal of water science*, 31 (1) 5 (2018) 61 - 73
- [20] - J. VAXELAIRE, Étude et modélisation de l'aération des stations d'épuration des eaux usées urbaines par agitation mécanique de surface, Thèse de Doctorat à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, (1994) 193 p.