



HAL
open science

Récupération de ressources des eaux usées par chenal à haut rendement algal

Julie Farinacci, Le Anh Pham, Julien Laurent

► **To cite this version:**

Julie Farinacci, Le Anh Pham, Julien Laurent. Récupération de ressources des eaux usées par chenal à haut rendement algal. 13ème congrès international du GRUTTEE, 18-20 février 2020, Feb 2020, Rennes, France. hal-04835022

HAL Id: hal-04835022

<https://hal.science/hal-04835022v1>

Submitted on 12 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Récupération de ressources des eaux usées par chenal à haut rendement algal

Julie FARINACCI^a, Le Anh PHAM^b, Julien Laurent^c

ICube, UMR 7357, ENGEES, CNRS, Université de Strasbourg, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

julie.farinacci@etu.unistra.fr

*^bDepartment of Water-Environment-Oceanography, University of Science and Technology of Hanoi, Vietnam
Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam*

julien.laurent@engees.unistra.fr

Mots-clés : microalgues, lagune à haut rendement algal, énergie, biocarburants

1. Introduction

Dans les stations d'épuration, les traitements secondaires conventionnels permettent d'éliminer efficacement la matière organique et les matières en suspension. La présence de phosphore et d'azote dans les effluents nécessite des traitements nécessitant soit l'ajout de réactifs, soit d'augmenter significativement la taille des bioréacteurs et la dépense énergétique associée (notamment pour l'aération nécessaire à la nitrification). Dans ce contexte, l'utilisation des microalgues fait l'objet d'une attention croissante des scientifiques et des industriels. Lors de la photosynthèse, elles ont en effet la capacité d'utiliser la lumière et les nutriments des eaux usées pour produire de la biomasse et de l'oxygène, réduisant par conséquent les besoins en aération. Ainsi, le potentiel de ces microorganismes dans le traitement des eaux usées est de plus en plus considéré comme prometteur.

Cependant, l'étape de récupération de la biomasse produite constitue encore un verrou dans la mesure où, en raison de leur petite taille, les microalgues sédimentent difficilement. Les coûts de cette étape peuvent ainsi représenter de 20 à 30% des coûts totaux de production [1]. En général, une technique de séparation comme la filtration, la centrifugation ou la coagulation/floculation est mise en place. La bio-floculation consiste à inoculer des boues activées à la culture pour améliorer la décantation de la biomasse. En effet, les floccs formés par les microalgues et les bactéries sédimentent plus rapidement en raison de leur plus grande taille [2].

La lagune à haut rendement algal (LHRA) (Figure 1) repose sur un consortium d'algues et de bactéries. Elle se compose d'un chenal de forme oblongue avec une cloison centrale et une profondeur de 0.2 à 1 m [3]. Une roue à aubes entraîne les eaux à une vitesse de circulation horizontale de 0.15 à 0.3 m/s [4]. Grâce à sa configuration, la LHRA produit des eaux de qualité satisfaisante en cinq fois moins de temps que les lagunes conventionnelles tout en occupant une surface réduite de moitié [4]. Un autre intérêt de la LHRA comparée aux lagunes conventionnelles est la récupération des nutriments dans la biomasse algale.

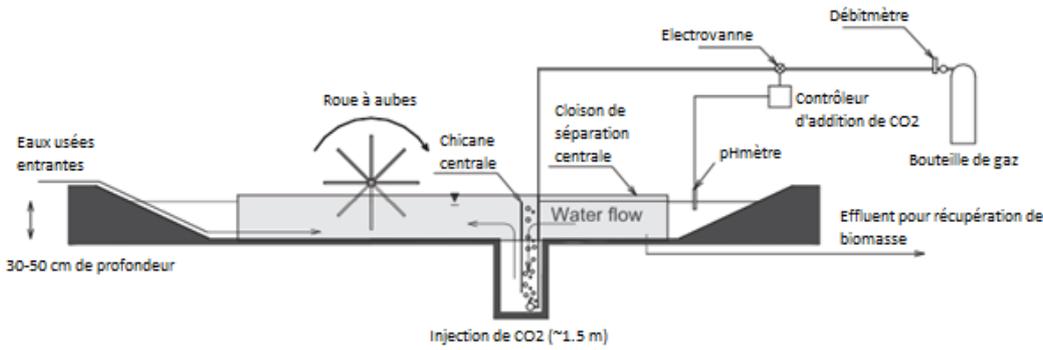


Figure 1 : Vue en coupe d'une lagune à haut rendement algal (LHRA) avec injection de CO₂ [3]

Par photosynthèse via la lumière du soleil, les microalgues convertissent le dioxyde de carbone (CO₂) et les nutriments présents (azote, phosphore) en biomasse et en dioxygène (O₂). En parallèle, les bactéries utilisent l'oxygène libéré par les algues pour leur métabolisme conduisant à la dégradation des composés organiques et à l'oxydation de l'azote ammoniacal, tout en produisant les nitrates et le CO₂ nécessaires aux algues (Figure 2). Ce mécanisme est appelé la respiration photosynthétique.

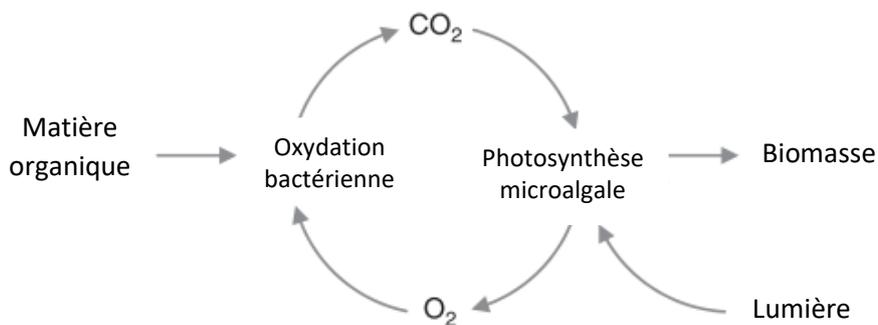


Figure 2 : Principe des interactions algues-bactéries en traitement des eaux usées [5]

Les travaux réalisés par Le Anh Pham au laboratoire ont démontré la pertinence du système vu les performances constatées sur la qualité des eaux traitées. Dans un premier temps, un ratio idéal d'inoculation algues/boues activées a été déterminé avec des tests en réacteurs [6]. La mise en place du pilote LHRA a été appuyée par l'étude de l'hydrodynamique et du transfert de gaz via les variations des paramètres tels que le niveau de l'eau, le débit d'entrée et le mouvement de la roue à aubes [7]. Par la suite, ce ratio optimal et ces paramètres opérationnels ont été appliqués pour un fonctionnement sur le long terme du pilote avec différentes charges nutritives et temps de rétention hydraulique. Ces travaux ont aussi permis le développement d'un modèle numérique d'un chenal à haut rendement algal de type « raceway » [8] : ce modèle biocinétique simulant les processus bactériens et algaux a été calibré et validé grâce aux données expérimentales obtenues.

Ces études ont donc permis d'aboutir à un fonctionnement satisfaisant du système au regard d'un objectif de traitement des eaux usées nécessitant peu d'énergie. Sur ces aspects, la suite du projet a comme objectif d'approfondir l'étude du pilote face aux changements des conditions opératoires : l'intensité lumineuse, le temps de séjour hydraulique, la charge en nutriments, le recyclage de la biomasse. Ainsi, un mode de fonctionnement sera proposé pour assurer la stabilité de la biomasse dans le chenal ainsi que des performances sur le long terme. En revanche, la valorisation de la biomasse produite n'a pas encore été

abordée dans notre contexte. Ainsi, cette contribution a pour objectif de recenser les pistes pour la valorisation de la biomasse produite, celle-ci étant riche en nutriments et en composés d'intérêt.

Outre l'intérêt des microalgues pour le traitement des eaux ou la capture de dioxyde de carbone, la biomasse algale peut être valorisée dans de nombreux domaines comme la pharmaceutique, la cosmétique, l'alimentation et la production d'énergie. En agriculture, elle peut être utilisée comme engrais pour la fertilisation des sols pauvres. Toutefois, il faut s'assurer qu'elle ne contienne pas de métaux lourds ou autres polluants au risque de contaminer les sols [5]. La biomasse algale constitue également une source potentielle de protéines alimentaires pour l'homme et l'animal et comporte des composés d'intérêt pour la cosmétique et la pharmaceutique. Mais, le fait qu'elle soit cultivée dans des eaux usées peut poser un frein à cause du possible manque d'acceptation par le public et d'exigences de qualité importantes [5].

2. Valorisation énergétique de la biomasse algale

Avec le changement climatique et l'épuisement des ressources fossiles, l'intérêt pour les énergies renouvelables s'est accru au fil des ans. Au début du XX^{ème} siècle, malgré le potentiel des biocarburants, les carburants fossiles se sont imposés par leur facilité d'extraction [9]. Aujourd'hui, le débat autour des émissions de CO₂ permet l'essor des biocarburants, ceux-ci étant considérés comme une alternative pertinente aux fossiles.

Le biocarburant peut être simplement ajouté aux carburants fossiles en tant qu'additif ou complément. En France, la part des biocarburants est fixée à 7.9% de l'énergie contenue dans les carburants conventionnels [10]. Au Brésil, 25% d'éthanol anhydre est mélangé à l'essence sous le nom de mélange E25 [11].

Les biocarburants sont classifiés en trois générations selon la matière première, les procédés utilisés, et leur date d'apparition sur le marché mondial de l'énergie [9]. La « troisième génération » fait référence à la production de biocarburant à partir d'algues. Elles ont été vues comme une matière première prometteuse car elles ont la capacité de produire de la biomasse en grandes quantités avec un taux de croissance rapide. La culture d'algues n'accapare pas des surfaces normalement exploitées pour les productions agricoles. En agriculture, les récoltes se font deux à quatre fois par an, ce qui limite l'apport de matière première pour la production de biocarburant. La biomasse algale peut être fournie à longueur d'année. Enfin, la culture d'algues peut se faire en eaux usées ou salées, ce qui réduit l'impact sur les réserves d'eau douce [12]. Ces arguments mettent en avant la pertinence des algues en tant que matière première pour la production de biocarburant.

Suite à sa récupération, la biomasse peut être convertie en biocarburant selon différents procédés (Figure 3). Le choix de la technique de conversion va s'appuyer sur la nature de la ressource et la quantité, la forme d'énergie voulue, l'aspect économique et l'application attendue [13].

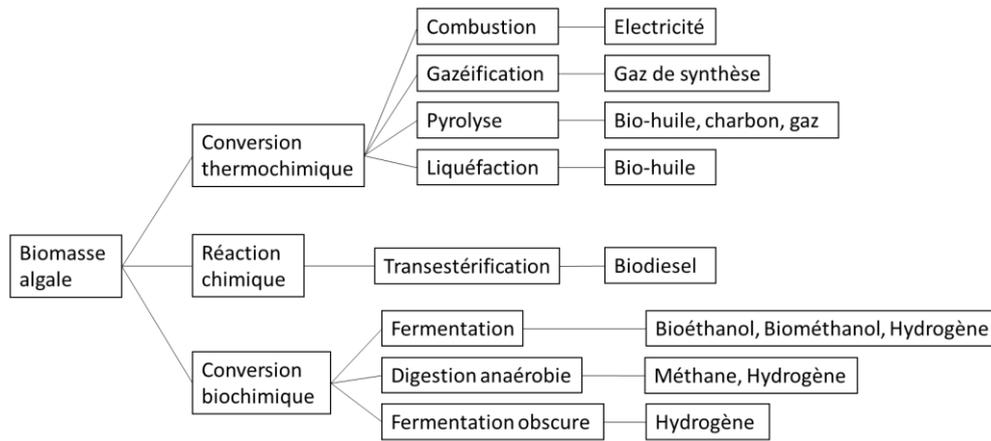


Figure 3. Principe des interactions algues-bactéries en traitement des eaux usées [5]

2.1 Conversion thermochimique

La conversion thermochimique fait référence à la décomposition thermique d'un composé organique pour former du biocarburant et comprend différents procédés comme la combustion, la gazéification, la liquéfaction et la pyrolyse. La difficulté posée avec une conversion thermochimique est la teneur en eau de la biomasse algale d'environ 80% qui nécessite alors une étape de séchage.

Lors de la combustion, la biomasse est décomposée en présence d'air dans un four, une chaudière ou une turbine à vapeur à plus de 800°C et convertie en gaz [13]. La combustion n'est possible que si le taux d'humidité de la biomasse est <50% [14]. Les gaz produits doivent être utilisés immédiatement car ils ne peuvent pas être stockés [15].

La pyrolyse est la décomposition thermique de la biomasse en absence d'air à des températures de 650K à 800K. Les produits formés des condensables (goudrons, huile de pyrolyse/bio-huile), des gaz non condensables (CO, H₂, CO₂, C_xH_y) et du charbon riche en carbone. La répartition et la composition des produits dépendent des conditions opératoires choisies [16]. La bio-huile produite est instable thermiquement et se dégrade avec le temps [17], elle nécessite ainsi un raffinage.

Lors de la gazéification, la biomasse est oxydée partiellement en présence d'oxygène ou d'air ou de vapeur d'eau à des températures élevées (800-1300°C) en un produit gazeux hautement inflammable [18]. Le mélange appelé gaz de synthèse ou « syngaz » est constitué de CO₂, CO, H₂, CH₄ et autres composés. La biomasse avant gazéification doit avoir une teneur en eau inférieure à 10-15% [19].

La liquéfaction a lieu entre 250 et 400°C et à des pressions variant de 10 à 25-30 MPa avec une durée pouvant aller de quelques secondes à plusieurs dizaines de minutes. Des additifs peuvent être introduits pour favoriser la réaction. L'avantage de la liquéfaction est qu'il n'y a pas besoin de sécher la biomasse algale récupérée (-80% d'eau m/m) [20]. L'eau est utilisée comme solvant. Le procédé en eau sous-critique permet ainsi d'obtenir : « des composés organiques hydrophobes, regroupés sous la dénomination de bio-huile » [21] qui doit ensuite être raffinée, « un résidu solide appelé char, une phase aqueuse contenant de la matière organique sous forme de composés polaires dissous, et une phase gazeuse minoritaire et principalement formée de CO₂ » [21].

2.2 Conversion chimique

La conversion chimique fait référence à la transestérification pour la production de biodiesel. Parmi les lipides, les triglycérides, autrement appelés triacylglycérols ou TAG, sont les molécules d'intérêt pour le biodiesel. La teneur en lipides des microalgues est typiquement comprise entre 20 et 50% (MS) [22], mais peut atteindre 90% (MS) sous certaines conditions [23]. En effet, il est possible d'augmenter la teneur en lipides et plus spécifiquement de triglycérides par un stress. Après extraction des lipides, l'huile est mélangée à froid à un alcool (généralement le méthanol) avec un catalyseur acide ou basique. Les trois chaînes d'acides gras se séparent du glycérol pour se fixer sur l'alcool, produisant ainsi du glycérol et du biodiesel (aussi appelé FAME pour Fatty Acid Methyl Esters).

2.3 Conversion biochimique

La conversion biochimique comprend la fermentation, la digestion anaérobie et la fermentation obscure.

La fermentation est la voie de production du bioéthanol qui est habituellement incorporé à l'essence pour améliorer les émissions de gaz polluants [24]. Parmi les glucides, les composés d'intérêt chez les microalgues sont l'amidon, le glycogène et la cellulose, trois polymères naturels du glucose. Certaines espèces comme *Chlorella*, *Dunaliella*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* et *Spirulina* peuvent stocker l'amidon et le glycogène en grandes quantités (jusqu'à 50% de la matière sèche) [25]. La teneur en glucides peut être augmentée en variant les conditions de culture. Après extraction, les glucides sont décomposés en sucres simples (glucose) par hydrolyse chimique (acide ou basique) ou l'hydrolyse enzymatique. Lors de la fermentation en absence d'oxygène, des enzymes (généralement *Saccharomyces cerevisiae* [26]) transforme alors le glucose en éthanol. Enfin, la distillation permet de récupérer et concentrer l'éthanol en éliminant l'eau et les autres impuretés [27].

En anaérobie (absence d'oxygène), la dégradation de biomasse mène à la formation de biogaz composé de 50 à 60 % de méthane (CH₄), 40 à 50 % de dioxyde de carbone (CO₂) et de petites quantités de vapeur d'eau, de sulfure d'hydrogène (H₂S), d'ammoniac et autres gaz. La digestion anaérobie peut être séparée en 4 étapes : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. La réaction prend place dans un digesteur où la matière organique est décomposée par des microorganismes. Le mélange est chauffé à 35°C ou plus et agité en continu pour éviter la formation de couches. Le biogaz s'accumule au-dessus de la surface et est stocké dans le toit flexible au-dessus du réservoir. Une fois la digestion achevée, le digestat (substrat dégradé) peut être utilisé comme engrais. Le rapport C/N idéal d'un substrat pour la digestion anaérobie se situe entre 20 et 30 [28]. Dans cette optique, l'inconvénient de la biomasse algale est un rapport C/N faible. Une stratégie consiste à combiner la biomasse algale à un substrat riche en carbone (co-digestion). Une autre possibilité est d'augmenter le rapport C/N en modifiant les conditions de culture pour que les cellules produisent et stockent des composés carbonés (glucides).

La fermentation obscure est similaire à la méthanisation. C'est une digestion anaérobie qui comprend les deux premières étapes (hydrolyse et acidogénèse). L'objectif est de produire de l'hydrogène, tandis que l'objectif de la méthanisation est de produire du biogaz contenant du CH₄. Pour favoriser la production d'hydrogène qui est un produit intermédiaire, il est nécessaire d'ajuster les conditions opératoires pour que les bactéries acétogènes et méthanogènes soient inhibées [29]. Plusieurs solutions sont envisageables : prétraitement de l'inoculum, temps de séjour court, contrôle du pH. Par exemple, un temps de séjour court (6 à 12h) est plus favorable pour la production de dihydrogène sinon la croissance des bactéries méthanogènes est favorisée [29].

3. Conclusion

L'utilisation d'un consortium de microalgues et de bactéries dans une lagune à haut rendement algal présente un fort potentiel pour le traitement des eaux usées et pour la production d'une biomasse valorisable. Cette synthèse met en évidence plusieurs alternatives possibles pour la conversion de la biomasse produite en énergie. Il existe des voies de conversion thermochimiques, chimiques et biochimiques. Les techniques thermochimiques nécessitent un prétraitement de la biomasse ainsi que des conditions de fonctionnement qui impactent le bilan technico-économique et environnemental. La transestérification requiert également un prétraitement mais apparaît prometteuse. Les conversions biochimiques sont des pistes sérieuses déjà explorées dans de nombreuses études, notamment la digestion anaérobie. Le choix de la voie de valorisation énergétique dépend de la composition de la biomasse algale qui varie avec les conditions de culture (pH, température, caractéristiques des eaux usées...), qui sont à établir précisément et à contrôler. Toutefois, avant conversion, la première étape est de favoriser la production de biomasse algale en optimisant les conditions de fonctionnement de la lagune comme la maîtrise du pH par injection de CO₂.

Références :

- [1] Mata, T.M., Martins, A.A., Caetano, N.S., 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- [2] Van Den Hende, S., Vervaeren, H., Desmet, S., Boon, N., 2011a. Bioflocculation of microalgae and bacteria combined with flue gas to improve sewage treatment. *New Biotechnol., Recent advances in Environmental Biotechnology* 29, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2011.04.009>
- [3] Park, J. and Craggs, R. (2011). Algal production in wastewater treatment high rate algal ponds for potential biofuel use. *Water Science and Technology*, 63(10), pp.2403-2410.
- [4] Craggs, R., Park, J., Heubeck, S. and Sutherland, D. (2014). High rate algal pond systems for low-energy wastewater treatment, nutrient recovery and energy production. *New Zealand Journal of Botany*, 52(1), pp.60-73.
- [5] Muñoz, R. and Guieysse, B. (2006). Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Research*, 40(15), pp.2799-2815.
- [6] Pham, L.A., Laurent, J., Bois, P., Wanko Ngnien, A., 2019. Finding optimal algal/bacterial inoculation ratio to improve algal biomass growth with wastewater as nutrient source. *Water SA* 45.
- [7] Pham, L.A., Laurent, J., Bois, P., Wanko, A., 2018. Impacts of operational conditions on oxygen transfer rate, mixing characteristics and residence time distribution in a pilot scale high rate algal pond. *Water Science and Technology* 78, 1782–1791.
- [8] L.A. Pham, Consortium algues-bactéries des lagunes à haut rendement algal: évaluation des performances, devenir des nutriments des eaux usées et conception à base de modèles expérimentaux et numériques, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2018.
- [9] Voloshin, R., Rodionova, M., Zharmukhamedov, S., Veziroglu, T. and Allakhverdiev, S. (2019). Review: Biofuel Production from Plant and Algal Biomass. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, (7-9), pp.12-31.
- [10] Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2019). Biocarburants. [online] Available at: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biocarburants> [Accessed 5 Dec. 2019].
- [11] Baeyens, J., Kang, Q., Appels, L., Dewil, R., Lv, Y. and Tan, T. (2015). Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol. *Progress in Energy and Combustion Science*, 47, pp.60-88.
- [12] Schenk, P., Thomas-Hall, S., Stephens, E., Marx, U., Mussgnug, J., Posten, C., Kruse, O. and Hankamer, B. (2008). Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *BioEnergy Research*, 1(1), pp.20-43.
- [13] Brennan, L. and Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), pp.557-577.

- [14] Goyal, H., Seal, D. and Saxena, R. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), pp.504-517.
- [15] Malcata, F., Pinto, I. and Guedes, A. (2018). *Marine Macro- and Microalgae: An Overview*. 1st ed. CRC Press.
- [16] Jendoubi, N. (2011). Mécanismes de transfert des inorganiques dans les procédés de pyrolyse rapide de la biomasse. Impacts de la variabilité des ressources lignocellulosiques sur la qualité des bio-huiles. Doctorant. Paul Cézanne, Aix-Marseille III.
- [17] Wertz, J. (2013). Bioraffineries de deuxième génération utilisant la voie thermo-chimique. [online] Available at: <https://monprojet.labiomasseenwallonie.be> › download › file › fid [Accessed 13 Jan. 2020].
- [18] Varfolomeev, S. and Wasserman, L. (2011). Microalgae as source of biofuel, food, fodder, and medicines. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 47(9), pp.789-807.
- [19] McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), pp.55-63.
- [20] Goswami, G., Makut, B. and Das, D. (2019). Sustainable production of bio-crude oil via hydrothermal liquefaction of symbiotically grown biomass of microalgae-bacteria coupled with effective wastewater treatment. *Scientific Reports*, 9(1).
- [21] Deniel, M. (2017). Etude de la production de bio-huile par liquéfaction hydrothermale de résidus agroalimentaires et de leurs molécules modèles. Doctorant. Toulouse.
- [22] Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), pp.294-306.
- [23] Metting, F. (1996). Biodiversity and application of microalgae. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 17(5-6), pp.477-489.
- [24] Hossain, M., Basu, J. and Mamun, M. (2015). The Production of Ethanol from Micro-Algae *Spirulina*. *Procedia Engineering*, 105, pp.733-738.
- [25] Ueda, R., Hirayama, S., Sugata, K., Nakayama, H., (1996). Process for the production of ethanol from microalgae. US Patent 5,578,472.
- [26] Demirbas, A. and Dermibas, M. (2010). *Algae energy*. London: Springer.
- [27] John, R., Anisha, G., Nampoothiri, K. and Pandey, A. (2011). Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol. *Bioresource Technology*, 102(1), pp.186-193.
- [28] Kwietniewska, E. and Tys, J. (2014). Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, pp.491-500.
- [29] François-Lopez, E. (2016). Production de biohydrogène par fermentation obscure : potentiel de différentes biomasses et variabilité microbienne. Doctorant. Strasbourg.