



Les microalgues : un défi prometteur pour des biocarburants propres

Meriem Sadi

Centre de Développement des Energies Renouvelables

B.P 62 Route de l'observatoire, village Céleste, Bouzaréah, Algérie

meriem.sadi@cder.dz

Résumé — Les carburants fossiles ont bien servi l'être humain depuis longtemps, cependant, ils restent épuisables et polluants. Les microalgues semblent être une solution intéressante pour la production des carburants dits « biocarburants », ces végétaux microscopiques ont la possibilité d'être cultivés de différentes manières afin d'extraire par la suite la matière qui sert à fabriquer le biocarburant, ces derniers peuvent être liquides (biodiesel, bioéthanol) ou gazeux (biohydrogène).

Mots clés — Culture des microalgues, biocarburants, biodiesel, bioéthanol, biohydrogène

I. INTRODUCTION

Bien que la découverte des gisements de pétrole et charbon ait servi l'humanité, ces derniers resteront épuisables et déclineront un jour. De plus, l'utilisation des carburants fossiles présente une menace considérable de point de vue pollution de l'environnement terrestre et marin et détérioration de la qualité de l'air.

La biomasse marine, plus précisément les microalgues s'avère comme nouvelle source de carburants appelés biocarburants, le concept d'utiliser des algues comme matière première énergétique a été mis en évidence à la fin des années 1950 [1]. L'idée d'utiliser la biomasse marine a été conçue par Howard Wilcox en 1968, il s'est avéré que les microalgues peuvent être de bonne candidates pour la production de combustibles, grâce à leur efficacité photosynthétique et leur croissance rapide comparée à la biomasse ligno-cellulosique [4].

Avant d'arriver à un biocarburant près à l'utilisation, les microalgues sont cultivées dans des étangs ou dans des photobioréacteurs, récoltées puis séchées, par la suite l'huile ou l'amidon sont extraits.

Les biocarburants issus des microalgues présentent plusieurs avantages, ils peuvent être liquides comme les alcools et le biodiesel ou gazeux, c'est le cas du biohydrogène.

II. LES MICROALGUES

Les microalgues sont des organismes microscopiques eucaryotes photosynthétiques vivant dans les mers, les océans, les eaux douces et les eaux saumâtres [2], [3].

Leur mécanisme photosynthétique est similaire à celui des plantes terrestres et leur transfert de l'énergie solaire en une biomasse s'avère efficace [2].

En ce qui concerne la nutrition, la plupart des microalgues sont photoautotrophes, c'est à dire qu'elles utilisent le CO₂ comme source de carbone et qu'elles tirent leur énergie de la photosynthèse. Cependant, il existe aussi des microalgues hétérotrophes qui sont capables d'utiliser une source de carbone organique pour se développer [3].

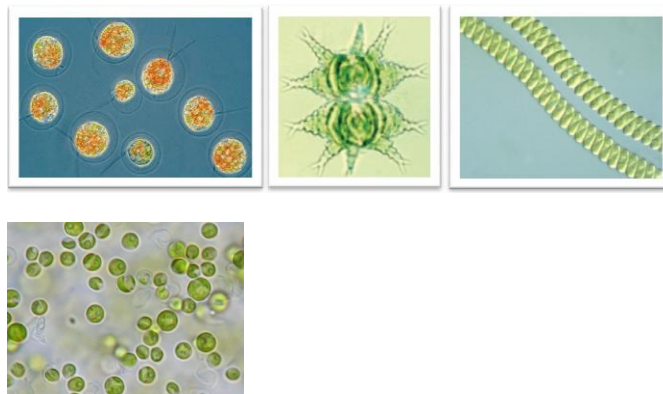


Fig.1 Quelques exemples de microalgues: *Haematococcus*, *Staurastrum*, *Spirulina* et *Chlorella vulgaris* [3]

A. Les avantages de la culture des microalgues pour la production des biocarburants

Les microalgues présentent divers avantages dans le domaine de production des biocarburants, à savoir:

- Leur croissance est rapide et fait d'elles une importante source renouvelable pour l'énergie [2], [4] ;
- Leur conversion photonique est élevée (environ 3 à 8% face à 0,5% pour les végétaux terrestres), ce qui fait un rendement important par hectare [2], [5] ;
- Leur séquestration de CO₂ est élevée [2], [6] ;
- Elles sont capables de croître dans un milieu aqueux salin, eaux usées ou eaux saumâtres et se nourrissent de l'azote et phosphore qui se trouvent en général dans les eaux polluées [2] ;
- Leur culture peut se faire dans des terres en friche [2], la référence [5] affirme qu'une ferme mesurant un



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



hectare sur des terres en friche peut produire plus de 10 à 100 fois d'huile par rapport à toute autres sources connues produisant l'huile ;

- Pour la culture des microalgues, ni des engrais ou pesticides sont utilisés.

III. LA CULTURE DES MICROALGUES

La culture des microalgues utilisant la lumière du soleil peut être effectuée soit dans des bassins à ciel ouvert ou des photobioréacteurs en forme de tube, rectangle, réacteur à agitation continue ou autre forme [5].

Concernant la nutrition, la plupart des microalgues sont photoautotrophes, c'est-à-dire elles utilisent le CO₂ et qu'elles tirent leur énergie de la photosynthèse. Or, il existe aussi des microalgues hétérotrophes qui sont capables de se développer sans utiliser l'énergie solaire mais une source de carbone organique [3], c'est le cas de *Chlorella vulgaris* et *Chlorella protothecoides* [7].

Les microalgues ayant un métabolisme autotrophe sont principalement cultivées en bassins extérieurs, dans des photobioréacteurs ou encore grâce à des modèles hybrides permettant de conjuguer ces deux premières approches. Plusieurs éléments influencent l'efficacité des méthodes de culture utilisées, dont le choix des microalgues, la localisation et le climat. Pour assurer une efficacité en mode autotrophe, des températures moyennes d'au moins 15°C doivent être rencontrées ainsi que des conditions d'ensoleillement optimales. Les microalgues de métabolisme hétérotrophe sont principalement cultivées dans des bioréacteurs fermés appelés fermenteurs en absence de rayonnement solaire. Pour assurer leur croissance, elles doivent être en présence d'un substrat organique. Il serait possible de croire que celles-ci peuvent utiliser n'importe quelle source d'hydrates de carbone pour remplacer le rayonnement solaire en tant que source d'énergie pour leur métabolisme, alors que tel n'est pas le cas. En effet, certains substrats sont en mesure de supporter la croissance de certaines espèces alors que ces mêmes substrats sont inefficaces pour d'autres espèces. De plus, certains composés chimiquement similaires ne favorisent pas nécessairement la croissance d'une espèce microalgale donnée [7].

A. Les photobioréacteurs

L'utilisation des photobioréacteurs revient plus chère que les systèmes d'étang à ciel ouvert, cependant ils nécessitent moins de lumière et d'espace pour la culture des microalgues. Les scientifiques préfèrent l'utilisation des photobioréacteurs car ils assurent la croissance d'une seule espèce d'algue sans qu'elle rentre en compétition avec une autre espèce ou qu'elle soit contaminée [5].

Il existe différents types de photobioréacteurs selon [5], leurs technologies de design sont très variables et dépendent fortement de l'ingénieur qui les a conçus et de l'espèce à

cultiver. En effet, il faut établir des conditions d'agitation et de turbulence compatibles avec la biologie des espèces. C'est le cas de certaines cellules qui ont un flagelle particulièrement fragile et qui sont extrêmement sensibles à de fortes contraintes de cisaillements [8].

Les photobioréacteurs tubulaires semblent être les plus satisfaisants de point de vue production de la biomasse algale convertie en biocarburants dont la quantité varie entre 2 et 5g/l [3], [5].

Un photobioréacteur tubulaire est constitué d'un ensemble de tubes transparents en plastique flexible ou en verre placés en parallèle verticalement ou horizontalement. Ces tubes, que l'on peut qualifier de capteur solaire, capturent la lumière du soleil nécessaire à la photosynthèse. Ils ont habituellement un diamètre de moins de 10 cm afin de permettre à la lumière d'atteindre la majeure partie des cellules en suspension. Le milieu de culture circule dans un réservoir, puis dans le capteur solaire et revient ensuite dans le réservoir. Généralement, pendant la journée, la culture a lieu en continu dans le photobioréacteur, cette circulation est assurée par un flux turbulent qui a lieu dans le réservoir où un air riche en CO₂ est diffusé, ce flux permet d'assurer la distribution des nutriments, les échanges des gaz et de minimiser la sédimentation des cellules [5].

Les photobioréacteurs peuvent être mis en marche d'une manière continue et la culture est récoltée continuellement ou d'une manière discontinue en produisant une quantité définie d'algue, dans ce cas la quantité de nutriment nécessaire pour la culture est diffusée pendant un temps précis jusqu'à la récolte [9].

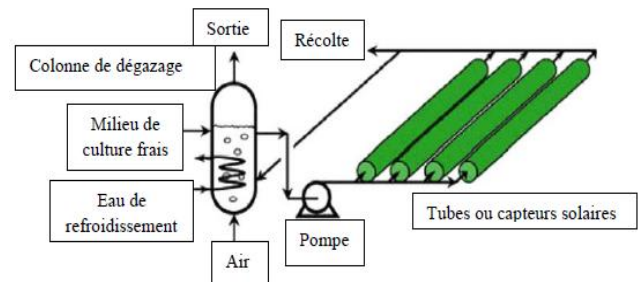


Fig.2 Photobioréacteur tubulaire comportant des capteurs solaires disposés en parallèle [5]

La figure.2 montre le milieu de culture provenant de la colonne de dégazage pompé en continu dans les tubes où la lumière est absorbée. Il retourne ensuite dans la colonne de dégazage. Du milieu de culture frais est introduit de façon continue dans la colonne de dégazage pendant la journée et une quantité équivalente du milieu de culture située à l'intérieur du dispositif est extraite du courant qui retourne dans la colonne. En vue de contrôler la température, de l'eau de refroidissement est utilisée. Celle-ci passe par le serpentin



d'un échangeur thermique situé dans la colonne de dégazage. Cette dernière est aérée en continu afin d'évacuer l'oxygène accumulé au cours de la photosynthèse. On élimine également le gaz de sortie de la colonne [5].

Dunaliella nécessitent des milieux spécifiques, alcalin pour la première et une forte teneur en sel pour la deuxième [5].

La figure 4 est un schéma d'un étang, la profondeur des canaux est d'environ 0,3m. La roue à aube fonctionne continuellement afin d'empêcher la sédimentation [5].

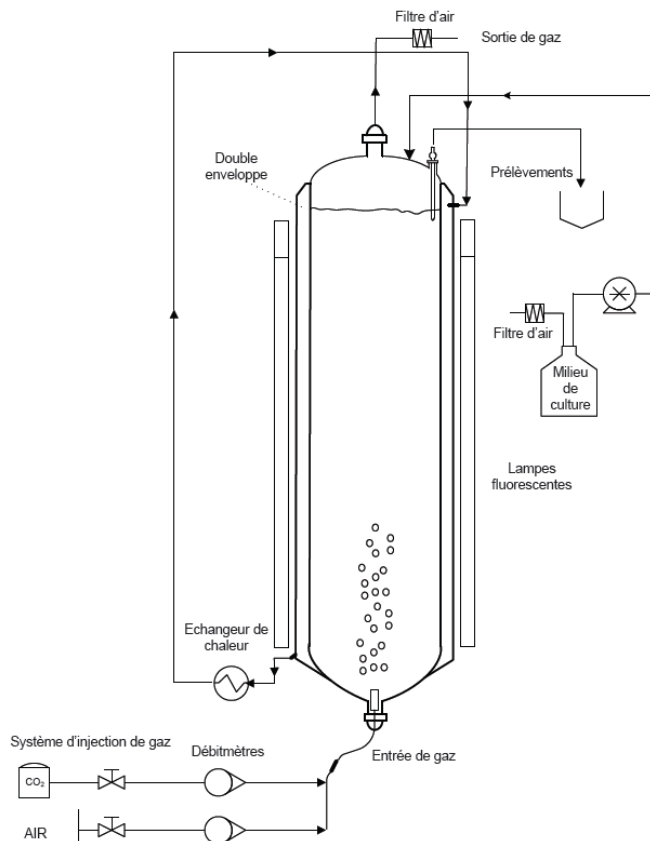


Fig.3 Schéma d'un photobioréacteur de 2,5l de type cylindrique [3]

B. Les étangs à ciel ouvert de type raceway

Ces systèmes sont plus anciens et simples pour la culture des microalgues, ils sont sous forme de chemin à roulement où une ou plusieurs roues à aube sont placées pour permettre la nutrition de toutes les cellules algales. Les chemins à roulement sont en général faits en béton coulé ou sont creusés directement dans le sol et recouverts d'une couche en plastique pour empêcher la pénétration du milieu de culture dans le sol. Des chicanes qui font passer l'eau sont placées, elles servent à minimiser l'espace de culture. Ces étangs sont utilisés lors d'une culture continue, les nutriments sont ajoutés face à la roue à aube et la récolte se fait derrière la roue après un moment de circulation. Ce système est utilisé aux Etats Unis, Japon, Australie, Inde et aussi en Chine, c'est un mode de culture qui revient moins chère, sauf que la contamination est probable, ce qui ne permet pas de réaliser la culture de toutes les espèces. La culture de *Chlorella* est réussie dans les étangs, en revanche, les espèces comme *Spirulina* et

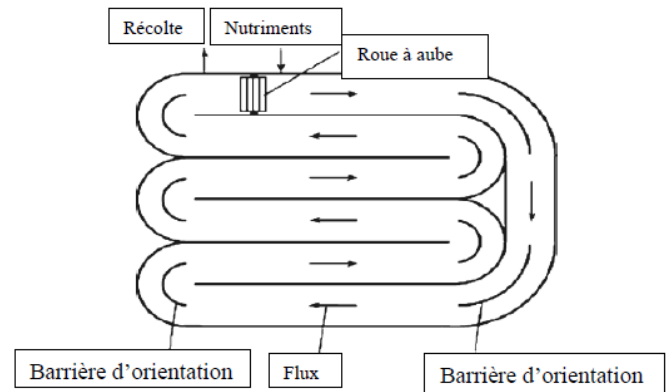


Fig.4 Schéma d'une vue de haut d'un étang ouvert [4]

IV. LA RECOLTE DES MICROALGUES

La récolte des microalgues est parfois facile à réaliser, comme la filtration pour la spiruline (spiruline en spirales 0,1 mm) [8], [10], mais la plupart des temps la récolte nécessite une étape préparatoire de floculation [10].

La plupart des techniques de séparation solide-liquide sont employées [10]: la centrifugation, la fraction de la mousse, la floculation. La méthode de la récolte dépend de l'espèce elle-même, de la densité des cellules et souvent des conditions de la culture [7].

La filtration nécessite l'utilisation d'une membrane de cellulose modifiée ainsi que d'une pompe, cette méthode convient pour une taille supérieure à 30 µm, il faut passer à une micro- et ultrafiltration si la taille est inférieure à 30 µm [7], [10]. Les microalgues de très faible densité peuvent ainsi être retenues par la membrane. Cependant, cette technique est limitée par le volume traité puisque la succion exercée par la pompe entraîne fréquemment l'obstruction de la membrane. Certaines techniques peuvent par contre être utilisées afin d'éviter cette problématique, soit l'utilisation d'une pompe exerçant une pression au-dessus du filtre. Cette façon de faire permet de traiter des volumes plus importants. La technique de filtration est applicable principalement pour les microalgues formant des colonies [7].

La centrifugation est énergivore mais efficace [10] et permet de concentrer les microalgues d'une solution initiale ayant une concentration en biomasse de 10 à 20 g/L en une pâte de 100 à 200 g/L. Cette méthode nécessite l'utilisation d'une centrifugeuse qui fonctionne par rotation autour d'un axe principal, ce qui permet d'exercer une force perpendiculaire à cet axe et de récolter les algues ayant une densité plus importante que le substrat de croissance. Cette technique est



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



toutefois considérée comme étant trop dispendieuse et énergivore pour la production d'algocarburants [7].

Pour la récolte par floculation, les floculants utilisés sont le chlorure de fer et le chlorure d'aluminium. Par ailleurs, la floculation peut être effectuée naturellement par l'arrêt d'alimentation en CO₂, cette floculation s'appelle l'autofloculation [5].

Dans le cas de fraction de la mousse, le milieu de culture est exposé à une aération pour se transformer en mousse, par la suite les algues sont séparées de l'eau [5].

V. LE SECHAGE DE LA PATE ALGALE

La pâte algale obtenue, à 5-15 % en solide, périssable, est séchée par technologies conventionnelles (sous vide, sur tambour, en lit fluide, en spray), souvent dégradatives. La lyophilisation est plus coûteuse mais conserve les propriétés des métabolites. Le séchage solaire, faisable en air très sec, est d'autant plus long que l'air est humide [10].

VI. LES BIOCARBURANTS PRODUITS A PARTIR DES MICROALGUES

Les biocarburants produits à partir des algues, ou « algocarburants », sont considérés comme des biocarburants de troisième génération. Les microalgues servent à la fabrication de biodiesel, parmi les autres biocarburants de troisième génération figurent les alcools, comme le biopropanol, le biobutanol ou le bioéthanol, qui, compte tenu du manque d'expérience de leur production, ne devraient pas être présents sur le marché des carburants avant 2050 [11].

A. Le biodiesel

Le biodiesel est un carburant propre qui peut être mélangé au diesel fossile, du fait que leurs propriétés physiques sont similaires et compatibles [2].

Le contenu lipidique dans les microalgues dépend des conditions de culture. Une carence en nitrate est utilisée pour orienter le métabolisme vers l'accumulation de lipides, notamment des triacylglycérols (TAG), intéressants pour la production de biodiesel [10]. Les microalgues contiennent une mixture d'acides gras insaturés, notamment l'acide palmitoléique, l'acide oléique, l'acide linoléique et l'acide linoérique ainsi que des acide gras saturés, à titre d'exemple, l'acide palmitique et l'acide stéarique[2]

Les souches microalgales comme *Chlorella vulgaris*, *Spirulina maxima*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Nannochloropsis s*, *Neochloris oleoabundans*, *Scenedesmus obliquus*, *Nitzschia sp.*, *Schizochytrium sp.*, *Chlorella protothecoides*, *Dunaliella tertiolecta* ont été sélectionnées par plusieurs auteurs comme étant les espèces les plus productives de point de vue lipides, autrement dit comme meilleurs sources pour la production du biodiesel [2].

Dans le cas de *Chlorella protothecoides*, les cellules sont récoltées par centrifugation, rincée à l'eau distillée puis séchées est transformée en poudre par le processus de lyophilisation. L'extraction de l'huile se fait par le broyage de la poudre de *Chlorella protothecoides* dans un mortier avec l'ajout de l'hexane. Par la suite, le biodiesel est obtenu par transesterification de l'huile extraite auparavant [13]. La transesterification consiste en la réaction de huile extraite avec du méthanol ou l'éthanol en présence d'un catalyseur (KOH ou NaOH) ou sans présence de ce dernier pour produire des esters méthylique ou éthylique (biodiesel) et de la glycérine [12]. La transestérification peut se faire même en présence d'enzyme ou des acides comme catalyseurs. Dans le cas d'une transestérification sans catalyseurs, la réaction se fait dans un autoclave à 246,85°C [14].

B. Le bioéthanol

La production de bioéthanol à partir des microalgues est obtenue par un procédé de fermentation. Les microalgues contiennent de l'amidon qui peut être fermentés en bioéthanol [10], [1].

L'amidon peut être extrait par voie mécanique telle que les ultrasons et le cisaillement ou chimique, par dissolution des cellules en utilisant des enzymes. Une fois l'amidon extrait, il subi une hydrolyse (saccharification) pour le transformer en sucre simple fermentescible. La fermentation se fait en présence d'une levure [1].

L'éthanol produit est purifié par la distillation en le séparant de l'eau et des vinasses [1]. La fermentation est un procédé plus simple à mettre en œuvre que celui de production de biodiesel. En outre, le CO₂ coproduit dans le procédé de fermentation peut être réutilisé comme source de carbone pour la culture des microalgues [10].

TABLE I
LE TAUX D'AMIDON PAR POIDS SEC DANS QUELQUES ESPECES DE
MICROALGUES SELON PLUSIEURS AUTEURS [1]

Espèces microalgale	% amidon après extraction de l'huile (g/ pds sec)	Référence
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	~53	Kim et al. (2006)
<i>C.reinhardtii</i>	45	Hirano et al. (1997)
<i>C.reinhardtii</i>	17	Spolaore et al. (2006)
<i>Chlorella vulgaris</i>	12-17	Spolaore et al. (2006)
<i>C. vulgaris</i>	37	Hirano et al. (1997)
<i>Scenedesmus Obliquus</i>	23,7	Rodjaroen et al (2007)
<i>Spirulina fisisiformis</i>	27,3-56,1	Rafiqul et al. (2003)



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



C. Le biohydrogène

Les microalgues sont capables de produire de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire en utilisant l'eau comme donneur d'électrons et de protons. Les électrons mobilisés par l'appareil photosynthétique sont utilisés par une hydrogénase, enzyme capable de réduire les protons et produire H₂. La découverte est assez ancienne, mais la productivité est encore limitée. La microalgue verte *Chlamydomonas reinhardtii* est souvent retenue comme modèle d'étude, car elle possède une hydrogénase à fer à forte activité couplée à la chaîne photosynthétique. Lorsqu'elle est placée à la lumière en conditions anaérobies, cette algue produit transitoirement H₂.

Cette réaction s'arrête rapidement du fait de la production d'O₂ par le photosystème II et de la forte sensibilité de l'hydrogénase à ce gaz [10].

VII. CONCLUSIONS

Grâce à leurs caractéristiques biochimiques spécifiques et très variées, les microalgues représentent aujourd'hui une grande voie de recherche à approfondir. Les problèmes liés au réchauffement climatique attirent le regard vers ces microorganismes capables de consommer le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pour produire de la biomasse contenant des acides gras utilisés pour la fabrication des biocarburants et de l'hydrogène biologique.

Les systèmes de production microalgales qui sont de deux types : fermés et ouverts. Chacun présente des avantages et des inconvénients. En effet, les systèmes ouverts sont économiquement plus avantageux puisque la source d'énergie utilisée est le soleil mais ils présentent des difficultés de contrôle des conditions opératoires ce qui conduit à une faible productivité. En revanche, les photobioréacteurs fermés sont bien plus chers mais la productivité obtenue est nettement supérieure et le contrôle et la régulation des paramètres de culture sont envisageables.

REFERENCES

- [1] P. J. Rojan, G.S. Anisha, K. Madhavan Nampoothiri and P. Ashok, Micro and Macroalgal Biomass: A Renewable Source for Bioethanol. *Bioresource Technology*, vol 102, pp. 186–193, 2011.
- [2] L. Goumeta, *Microalgae as a Feedstock for Biofuels*, London: Springer, 2011, 69p.
- [3] G.P. Becerra Celis, Proposition de stratégies de commande pour la culture de microalgues dans un photobioréacteur continu. Thèse de Doctorat. France : Ecole Centrale Des Arts Et Manufactures « Ecole Centrale Paris », 2009. 243p
- [4] M.E.A. Belkadi, Etude technique pour la valorisation énergétique des microalgues. Thèse de Magister en Management des Projets Énergétique. Algérie : Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 2009. 49p.
- [5] A. Demirbas and M. Fatih Demirbas, *Algae Energy: Algae as a New Source of Biodiesel*. London: Springer, 2010, p. 29-47.
- [6] Z.Świątek, *Algae – Feedstock of the Future*. *Archivum Combustionis*, vol. 30, n°3, pp. 225-235, 2010.
- [7] I. Cantin, La production de biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe. Canada : Centre Universitaire de Formation en Environnement Université de Sherbrooke, 2010, 87p.
- [8] J.P. Cadoret, and O. Bernard, La production de biocarburant lipidique avec des microalgues: promesses et défis. *Journal de la Société de Biologie*, vol 3, n°202, pp.201-211, 2008.
- [9] MORA Associates. Analyst: L.WAGNER, Biodiesel from Algae Oil, July 2007. (Page consultée le 07 juillet 2011) <http://www.fao.org/uploads/media/0707_wagner_-_Biodiesel_from_algae_oil.pdf>
- [10] J. Jenck, O. Lépine, J. Legrand, P. Dreno, D. Grizeau and C. Dupré, Valorisation industrielle des microalgues photosynthétiques. Ed., *Technique de l'Ingénieur*, 13p, 2011.
- [11] PNUE. Vers la production et l'utilisation durables des ressources : Evaluation des biocarburants. Rapport du Groupe international d'experts sur la gestion durable des ressources, 96p, 2009.
- [12] A. Demirbas, Competitive Liquid Biofuels from Biomass. *Applied Energy*, vol 88, pp. 17–28, 2011a,
- [13] A. Demirbas, Biodiesel from oilgae, biofixation of carbon dioxide by microalgae: A solution to pollution problems. *Applied Energy*, vol 88, p. 3541–3547, 2011b,
- [14] A. Demirbas, *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engine*. London: Springer, pp. 39-64, 2008.