



Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

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



# Approche photonique pour la culture des microalgues

Djamal Zerrouki

Département de Génie des procédés université d'Ouargla

[djamal.zerrouki@gmail.com](mailto:djamal.zerrouki@gmail.com)

**Abstract**— Grâce à leur flexibilité métabolique et leur taux de croissance rapide, les phototrophes aquatiques de taille microscopiques comme les algues ont un potentiel pour devenir des convertisseurs photochimiques industriels. La photosynthèse des algues pourrait permettre la production à grande échelle des combustibles liquides et de produits chimiques propres et renouvelables avec des grands avantages environnementaux, économiques.

Les coûts d'investissement et d'exploitation sont les principales questions à résoudre de point de vue optique, améliorations techniques du bio- procédés (bioréacteur). Dans cette perspective, une variété d'approches photoniques ont été proposées, nous les présentons ici et nous décrivons leur potentiel, les limites de compatibilité avec la biotechnologie séparée et les progrès d'ingénierie.

Nous montrons que seule l'approche de la lumière du soleil est économiquement réaliste. Un des principaux objectifs de la photonique dans le domaine des algues est de diluer la lumière pour surmonter les effets de photosaturation qui ont un impact sur les cultures exposées en plein soleil. Parmi les autres approches, nous introduisons une technique d'adaptation spectrale qui utilise la luminescence pour optimiser le spectre solaire en vue des exigences de la bioconversion souhaitée.

**Mots-clés**— algues; photonique; photosynthèse; luminescence; biocarburants

## I. INTRODUCTION

La photosynthèse génère 3000 EJ de biomasse chaque année, l'équivalent de moins d'un millième de la quantité d'énergie reçue du soleil à la surface de la terre, mais plus de cinq fois la consommation d'énergie primaire des êtres humains. Un peu moins de la moitié de la photosynthèse se produit dans les organismes aquatiques, une partie importante de ces organismes sont microscopiques. Les microorganismes photosynthétiques aquatiques comprennent microalgues et cyanobactérie, et seront collectivement appelés les algues ici, pour plus de commodité. En raison de leur métabolisme flexible et taux de croissance rapide, les

microalgues sont présentées comme des sources potentielles de carburant renouvelable, avec d'autres futurs grands usages dans l'alimentation animale et de traitement des eaux usées [1]. Toutefois, à ce jour, la production d'une tonne d'algues reste une opération coûteuse : les volumes globaux annuels ne dépassent pas 10 000 tonnes, pour des marchés spécialisés, les coûts de production les plus bas estimés restent autour de € 10-20 par kg.

Si à l'heure actuelle les algues ne sont pas encore utilisées dans les bioraffineries à grande échelle, cela indique que d'importants progrès dans les domaines de l'ingénierie et la biologie seront nécessaires. Cet article présente les problématiques et les voies de progrès technologiques actuellement envisagés du point de vue purement photoniques.

## II. APPROCHES INDEPENDANTE DE LA LUMIÈRE SOLAIRE

### II.1-la photosynthèse indirecte

Certains grands projets récents dans le secteur des biocarburants algaux sont basés sur la culture d'algues dans l'obscurité. Ces approches de cultiver les algues hétérotrophes dans l'obscurité est une forme de «photosynthèse indirecte», où les glucides sont cultivés, en utilisant la canne à sucre, puis transformé en lipides par les algues. Les algues sont donc utilisées pour passer de glucides au lipide, la production mondiale de sucre est inférieure à 200 millions de tonnes dans le monde (actuellement le prix est autour de € 0,40 par kg), ce qui ne couvre que quelques jours de la consommation actuelle de pétrole à 85 millions de barils par jour. La Surface totale des productions est donc limitée à des niveaux proches de celui de l'éthanol à partir de sucre, vers 4000 L.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, ce qui représente 0,1% de l'efficacité de conversion de l'énergie du soleil à l'éthanol. L'utilisation de sucres obtenus à partir de matériaux celluloseux abondante et bon marché pourrait permettre des progrès significatifs, mais cette voie de production ne s'est pas avérée



## Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

### The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

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



économiquement viable à ce jour. La conversion directe de substrats cellulotiques par les algues représente une alternative intéressante [2].

D'autre part, la photosynthèse directe par les algues naturelles ou génétiquement modifiées, représente une voie intéressante pour la prochaine génération de biocarburants. En effet, si des solutions peuvent être trouvées sur plusieurs grandes questions qui affectent les entrées, la culture et de récolte, la photosynthèse des algues pourrait permettre l'utilisation des terres non agricoles et les rendements les plus élevés des procédés de conversion de soleil dans les biocarburants.

#### II.2-CULTURE EN PHOTOBIOREACTEURS UTILISANT L'ECLAIRAGE ARTIFICIEL

La plupart des recherches académiques sur les systèmes de culture d'algues ont été réalisées à petite échelle en utilisant la lumière artificielle. La diversité des systèmes d'éclairage utilisé et leurs caractéristiques spectrales ne simplifient pas les comparaisons,

Les LED ont été décrites comme une source de lumière remarquable, cela du à leur efficacité, durée de vie, les LED peuvent produire des préférences spectrales adaptées aux algues et elle peut apporter la lumière au milieu de culture, permettant d'augmenté la densité de culture [3]. D'un point de vue technique, les LED – flash sont également considérées comme une manière de résoudre le problème photosaturation des cellules d'algues individuelles (voir 3.1 ci-dessous) et pour optimiser la croissance [4].

Dans le secteur commercial, la compagnie Origin Oil (USA) , a conçu un photobioréacteur incorporant deux lumières bleu et rouge sur une matrice rotative pour la culture des algues à haute densité [5]. Ce système en forme d'hélice permet un contrôle précis de la longueur d'onde, l'intensité et les périodes d'illumination générée à partir d'une combinaison de LED ainsi que les CCFLs (cold cathode fluorescent light) or EEFLs (external electrode fluorescent light). Alternativement, l'utilisation du photobioréacteur basé sur les LED organiques (OLED) a également été décrite par la société Algae.Tec [6]. Diverses autres initiatives actuelles sont basées sur l'éclairage artificiel toutefois, comme indiqué dans le tableau 1, un bilan énergétique simple et met en évidence l'analyse des coûts de calcul que même sous des hypothèses de rendement très favorable, le prix marginal de simple achat d'électricité pour alimenter LED rende les systèmes de culture telle irréaliste pour la production de carburants ou de produits chimiques de base. Par ailleurs, ce calcul ne tient compte que

des prix de l'électricité marginale, en écartant les dépenses en capital ainsi que toutes les autres dépenses d'exploitation associées à la culture d'algues.

TABLEAU 1.

L'analyse des coûts des systèmes de culture d'algues à base de la lumière artificielle. Opt. min. : Minimum optimiste; Abs. min: minimale absolu

	Paramètre	Opt. min.	Abs. min.	Définition
1	fraction de l'huile dans la biomasse totale	0.5	1	huile / biomasses totale (en masse)
2	Contenu énergétique de la biomasse	5	10	kWh / kg
3	La densité de la biomasse	0.9	0.85	kg / L
4	Coût de l'électricité renouvelable	0.15	0.05	€ / kWh
5	L'efficacité quantique de la photosynthèse	0.25	0.35	L'énergie chimique stockée / énergie de la lumière entrante
6	L'efficacité optique de système	0.8	0.9	Les photons utilisés/ photons entrants
7	l'efficacité biochimique	0.5	0.9	Énergie accumulée dans la biomasse / énergie utilisée par les cellules
8	Rendement de conversion de l'énergie du système d'éclairage	0.3	1	L'énergie émise par la lumière/ énergie d'entrée
9	Électricité OPEX pour produire 1 kg de biomasse d'algues	26	1,8	€ / kg
10	Électricité OPEX par baril d'huile de la biomasse	4540	339	€ / barrel
11	L'électricité de l'énergie électrique nécessaire pour obtenir 1 kg de biomasse	171	36	kWh électricité/ kg de biomasse
12	L'énergie nécessaire pour remplacer la consommation mondiale de pétrole	57	10	L'actuelle production mondiale d'électricité

Dans le Scénario de "minimum absolu" (abs. min.), la biomasse était supposée être entièrement composée de l'huile (1), semblable au diesel ( pétrole), avec une teneur en énergie (2) de 39 MJ par kg (11 kWh par kg) et une densité (3) de 0,85 kg par litre. Le prix de l'électricité renouvelable (4) était supposé être 0,05 € par kWh, ce qui correspond à la plus basse pour les prix du marché actuels de l'industrie d'électricité non-renouvelable. Le rendement quantique de la photosynthèse (5) a été calculé pour être au mieux de 0,35 en supposant que pas plus de huit photons, tous dans le rouge (680 nm) ont été nécessaires pour consommer une molécule de CO<sub>2</sub> et de produire une molécule d'O<sub>2</sub>. Ce rendement quantique de la photosynthèse représente le facteur de perte la plus important dans ce calcul, et inférieur à huit fois expérimentalement jamais observé. Une efficacité optique quasi parfaite (6) de 90%, ainsi que d'une efficacité biochimique (7) quasi optimale de 90% a été prise. Par ailleurs, les LED sont supposés avoir une efficacité énergétique



## Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

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



de 100% de conversion (8). À notre connaissance, ces hypothèses ne laissent place à aucune autre amélioration à l'exception d'une modification génétique complète de la photosynthèse. De ce qui précède, nous avons calculé une électricité (9) OPEX (dépense d'exploitation) de € 1,9 par kg de biomasse. Cette électricité OPEX est équivalente à un coût marginal par baril (10) de plus de 3 fois le prix actuel du pétrole. Autant que 38 kWh d'électricité seraient alors nécessaires pour produire chaque kg de biomasse à l'échelle mondiale. L'énergie électrique nécessaire pour remplacer l'actuelle consommation mondiale de pétrole (12) représenterait alors 13 fois la production actuelle d'électricité du monde entier. Malgré des hypothèses extrêmement généreuses, le plus réaliste "minimum optimiste" scénario montre que les algues cultivées à base de LED pourraient avoir un sens économique si la biomasse pouvait être évaluée à un prix minimum de c. € 40 par kg. Cela limite l'application de tels systèmes à des productions de faible volume et de haute valeur.

En dépit des nombreux avantages technologiques offerts par l'éclairage artificiel, et étant donné l'économie de base exposés ci-dessus, l'utilisation de toute sorte d'illumination artificielle pour la culture des algues est inappropriée pour la production à grande échelle de combustibles ou de produits chimiques. En pratique, l'éclairage artificiel peut se révéler précieux pour les précultures, par exemple dans un processus en deux étapes où une culture à haute densité est cultivée en laboratoire et ensuite diluée dans le volume beaucoup plus important d'un bassin de plein air.

### II.3 LA CULTURE DES ALGUES SOUS LA LUMIERE DE SOLEIL

Comme expliqué précédemment, la photosynthèse indirecte (lumière du soleil pour le sucre, les algues) est confrontée aux problèmes de tout processus à base de sucre, tandis que l'éclairage artificiel (c. à d. utilisant une source d'électricité pour produire la lumière, ensuite les algues et puis l'huile) est loin d'être économiquement viable à grande échelle. Ainsi, la seule stratégie prometteuse reste à cultiver des algues en utilisant la lumière naturelle pour promouvoir la photosynthèse. Il ne faut pas ignorer que, cela n'a pas été démontré pour être économiquement viable non plus, malgré certaines affirmations non vérifiées dans les médias au cours de ces dernières années. Cependant, diverses améliorations liées à la lumière pourraient aider à progresser vers cet objectif à long terme.

Afin d'établir une limite supérieure à la capitale des dépenses nécessaires à la fabrication d'un photobioréacteur ou un système de culture en plein air pour les biocarburants à base d'algues, on peut estimer un revenu supérieur par unité de surfaces générées par une bio-raffinerie sous une hypothèse que ce dernier travaillant à l'efficacité théorique maximale. Les premiers calculs sur les principes d'une telle limite supérieure théorique ont été montrés à 240 à 350 kL d'huile d'algues par hectare et par an [7]. En supposant une efficacité réelle qui est la moitié de cette limite supérieure, à un prix de vente du pétrole d'algues de 1 € le litre, un chiffre d'affaires net de 0,5 € par litre (frais une fois opérationnels fixés, par exemple, 50% ont été soustraits), et une vie système 10 ans, financé à un taux d'intérêt de 5%, on obtient une estimation de 100 à 140 € par mètre carré pour les dépenses en capital. Cela montre que seuls des systèmes de culture relativement simples peuvent être envisagés.

### III. QUESTIONS DE DILUTION DE LUMIERE

Les prédictions pour la limite théorique de rendement en huile des algues [7] [8] ne prennent pas en compte un problème majeur qui se produit lorsque les algues sont exposées au soleil: photosaturation et photoinhibition. La forme simplifiée d'une irradiation habituelle par rapport à l'activité photosynthétique (P-I) est donnée dans figure 1. Pour les conditions de culture typiques (concentration d'algues, et la géométrie du système de culture), l'activité photosynthétique des algues augmente linéairement avec l'intensité lumineuse (en nombre de photons) mais ils atteignent rapidement son maximum sous un éclairage énergétique ou PPF (photosynthetic photon flux density) d'environ 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ceci est environ 10 fois plus faible que le rayonnement réel du soleil. Au-dessus de 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , l'activité photosynthétique sature et plus tard diminue. Une exposition prolongée à une forte intensité lumineuse conduit à des dommages de l'appareil photosynthétique par un mécanisme appelé photo-oxydation. Diluer la lumière du soleil dans un système de culture est donc essentiel afin d'optimiser la croissance des algues sans saturation. Une estimation approximative basée sur une concentration de lumière de surface optimale de 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , en supposant que 90% de la lumière est absorbée sur une profondeur de 10 mm pour une concentration d'algues typique d'environ 2% en masse, le rendement optimal de la



## Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

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



concentration volumétrique de lumière et d'environ  
 $20 \mu\text{mol.L}^{-1}.\text{s}^{-1}$ .

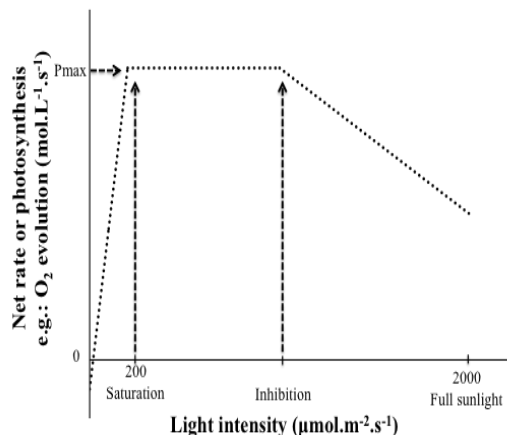


Figure 1

Dans cette perspective, Trösch et al. [9]. Ont décrit une géométrie tubulaire de photobioréacteur ou ils proposent l'utilisation d'un système d'onde-shifting à l'intérieur du photobioréacteur pour distribuer la lumière du soleil à l'intérieur.

Alternativement, ces guides de lumière peuvent être utilisés pour transporter l'eau à l'intérieur d'une culture d'algues, sans mélange. Ils sont généralement constitués de tiges d'acrylique ou de cônes incorporant un ensoleillement collecté côté extérieur de l'eau, et certaines caractéristiques favorisant la sortie de lumière localisée dans l'eau. Une telle variété de systèmes, ainsi que d'autres méthodes possibles à être utiliser dans des photobioréacteurs ou des bassins sont développées par la société américaine Biovanitas [10].

Mis à part la dilution spatiale, une méthode de dilution temporelle peut être utilisée pour distribuer la lumière entre les cellules des algues en croissance. L'eau est ainsi passée assez rapidement dans le système de culture afin que les algues soient exposées alternativement à un cycle (lumière - obscurité). Toutefois, les coûts opérationnels associés à ces techniques de mélange sont élevés, et l'effet potentiel de fort mélange de cellules et la période optimale des cycles restent à être optimisée.

La technique de déplacement spectral (spectral shifting) améliore le rendement de culture davantage, cette technique et compatible avec l'ensemble de systèmes de culture basés sur la lumière du soleil plusieurs molécule et matériaux

luminescents sont potentiellement utilisable et capable de déplacé le spectre solaire. Ont cite l'exemple des colorants organiques, organométalliques et quantum dots par exemple, le spectre d'absorption et d'émission de deux colorants coumarin 343 et Oxazine sont représenté sur la figure 2 - illustrant ainsi le potentiel d'évolution spectrale pour la photosynthèse. L'utilisation de combinaisons optimisées de ces composés luminescents peut être directement intégrée dans des matrices en plastique telles que le PMMA, afin de générer un spectre sur mesure qui correspond à la spécificité de chaque algue. Les composés utilisés sont très dilués et donc l'augmentation des coûts par rapport aux matériaux non-dopés reste très modeste.

Nous estimons que le taux de croissance entre 25 et 75 % pourrait être atteint figure 3, par rapport aux mêmes matériaux standards.

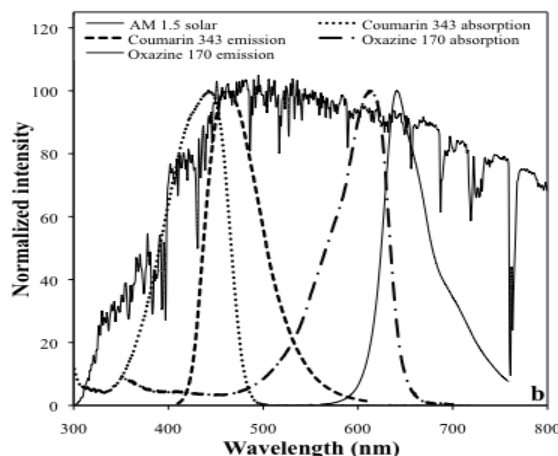


Figure 2 le spectre d'absorption et d'émission de deux colorants coumarin 343 et Oxazine [11]

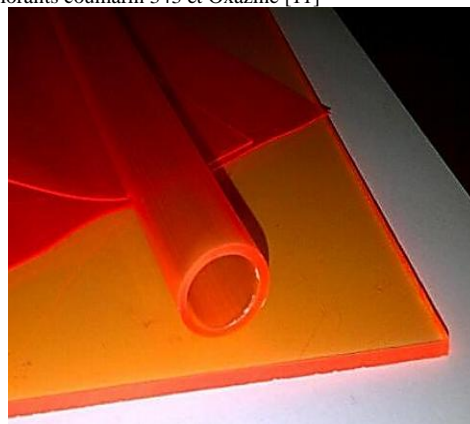


Figure 3 - Exemple de matériaux luminescents pour la culture d'algues



## Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

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

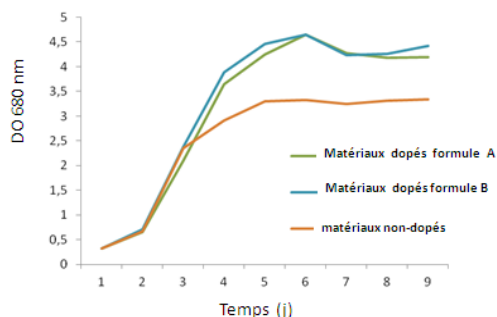


Figure 4 rendement de la culture avec matériaux dopés et non dopés

Comme le montre la figure 4, la culture de la chlorella sous une lumière solaire modifiée par des matériaux dopés par des molécules lumineuses

### CONCLUSION

Les algues photosynthétiques ont le potentiel pour être une solution alternative dans le domaine de l'énergie. Toutefois, les questions de coûts sont d'une importance primordiale dans ce domaine, et toute nouvelle approche photonique pour la culture de microalgues pour la production de produits tels que le carburant doit en tenir compte. À ce jour, la plupart des expériences ont été menées dans le laboratoire, de techniques sophistiquées, photobioréacteurs coûteux, avec des sources de lumière artificielle. Ce document a montré que l'utilisation de la lumière du soleil et des systèmes de culture relativement simples est les seules options économiquement réalistes compte tenu des limites strictes sur la productivité photosynthétique. La productivité actuelle est fortement affectée par la photosaturation et les effets de photoinhibition, le potentiel d'amélioration du rendement de la culture avec la technique de décalage spectral ( spectral shifting ) a été démontré. Parmi les options photoniques, évolutives et à faible coût, les systèmes basés sur les matériaux dopés avec des molécules lumineuses nous apparaissent comme les plus prometteuses. Aujourd'hui, l'adaptation spectrale et la dilution de lumière restent parmi les

solutions à être adaptées à une diversité de systèmes de culture.

### REFERENCES

- [1] Lundquist, T. J., Woertz, I. C., Quin, N. W., and Benemann, J. R. *A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production*. University of California, Berkeley: Energy Biosciences Institute 2010.
- [2] Trimbur, D., Im, C. S., Dillon, H. F., Day, A., Franklin, S., and Coragliotti, A. Brevet n° US2011/0014665. USA 2010.
- [3] Lee, C.-G. L. and Palsson, B. Ø. (1994). *High-density algal photobioreactors using light-emitting diodes*. *Biotechnology and Bioengineering* , 44 (10), 1161-1167.
- [4] K.Y. Park, C.-G. L. *Optimization of algal photobioreactors using flashing light*. *Biotechnology and bioprocess engineering* , 186-190, 2000.
- [5] Shigematsu, S and Eckelberry, N. Brevet n° 20090291485. USA 2009.
- [6] Stroud, R. Brevet n° WO2008151376. PCT 2008.
- [7] K. M. Weyer, D. R. *Theoretical Maximum Algal Oil Production*. *Bioenergy Research* , 3 (2), 204 – 213, 2010
- [8] D. E. Robertson, S. F. *A new dawn for industrial photosynthesis*. *Photosynthesis Research* 2011.
- [9] Trösch, W., Schmid-staiger, U., Zastrow, A., Retze, A and Brucker, F. Brevet n° US6509188. USA 2001.
- [10] Wilkerson, B. and Watters, W. Brevet n° US12/184,64. USA, 2008.
- [11] ASTM. (s.d.). Reference AM1.5 Solar Spectrum. <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>