

Apport d'énergie renouvelable à un bâtiment urbain par l'implantation d'un système de photobioréacteurs

Ing. P.-F. PILLONETTO
Ir G.JACOB
ISICHt-Mons

L'objet de cet d'article est de présenter la possibilité d'implanter un système de photobioréacteurs à un bâtiment urbain. Le défi de cette mission est d'obtenir un système rentable et présentant une balance énergétique positive. Pour ce faire, une première partie est réservée à l'étude bibliographique de cette biotechnologie. Ensuite, l'application à un immeuble est abordée dans la seconde partie et vise à optimiser la production d'énergie.

Mots clés : photobioréacteur, biotechnologie, microalgue, biomasse, énergie renouvelable, balance énergétique.

The aim of this article is to present the possibility of introducing a system of photobioreactors in urban buildings. The challenge of this task is to obtain a cost-effective system and a positive energy balance. The first part of the article is dedicated to the bibliographical review of this biotechnology. Application to a real building with the aim of optimising energy production is addressed in the second part of the article.

Keywords : photobioreactor, biotechnology, microalgae, biomass, renewable energy, net energy ratio

1. Introduction

En Europe, le secteur du bâtiment est constamment soumis à de nouvelles directives. Des normes européennes sont alors rédigées afin de respecter cette législation. A l'heure actuelle, la raréfaction et l'augmentation du coût des ressources énergétiques fossiles ainsi que les changements climatiques donnent naissance à de nouvelles normes environnementales. La certification P.E.B. résulte de ces exigences et constitue un bon exemple.

Dans la même optique, d'autres certifications, telles que BREEAM¹ et HQE², évaluent la performance environnementale des bâtiments mais ne sont pas obligatoires. Le respect de ces certifications est un objectif pour *THV Bolivar* (association momentanée de *CFE Brabant* et *Interbuild*) qui est actuellement chargée de la construction d'un immeuble de bureaux au nord de Bruxelles. Dans le cadre de ce projet, le maître d'ouvrage souhaite appliquer ces méthodes environnementales. Elles présentent un double avantage : plus-value patrimoniale du bâtiment et économies énergétiques.

Afin de répondre à ces exigences, plusieurs démarches sont entreprises dont l'apport d'énergie renouvelable qui est l'un des enjeux majeurs pour ce bâtiment. Des panneaux photovoltaïques et une installation géothermique sont déjà prévus mais dans le but de devenir une référence en matière de développement durable, un autre système peut être proposé.

Dans le monde entier, de nombreuses start-up développent de nouvelles technologies adaptables au bâtiment. Récemment, l'une d'entre-elles déclarait pouvoir commercialiser une biotechnologie : les photobioréacteurs. Ceux-ci peuvent produire de l'énergie verte en cultivant des microalgues qui consomment du dioxyde de carbone et des eaux usées. Cette nouvelle entreprise ajoute que ce système est capable de produire trois sources d'énergie (biomasse, huile et hydrogène) et de restituer une eau assainie. Néanmoins, aucun pilote de cette technique n'a été mis en test à ce jour. Il est donc essentiel d'accomplir une étude de faisabilité.

¹ **BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)** : certification britannique qui est la méthode la plus utilisée dans le monde pour mesurer et certifier la durabilité d'un bâtiment prêt à l'occupation (BREEAM International, 2009).

² **HQE (Haute Qualité Environnementale)** : démarche française qui vise à obtenir des bâtiments confortables, sains et plus respectueux de l'environnement.

2. Etude bibliographique

L'objectif de cette partie est de dresser un état des connaissances non exhaustif sur les microalgues, la technologie des photobioréacteurs et l'exploitation des énergies produites par cette technique de culture.

2.1. Culture des microalgues

Les microalgues, encore appelées « phytoplanctons », sont des micro-organismes unicellulaires autotrophes qui élaborent la photosynthèse comme processus métabolique. Rappelons que ce mécanisme sert à former de l'adénosine triphosphate (ATP) durant la phase claire et des glucides durant la phase sombre. De l'énergie biochimique est alors disponible. Cette énergie sera utilisée : soit immédiatement pour les besoins de la cellule, soit en différé par la mise en réserve de lipides (principalement des triglycérides) produits par biosynthèse.

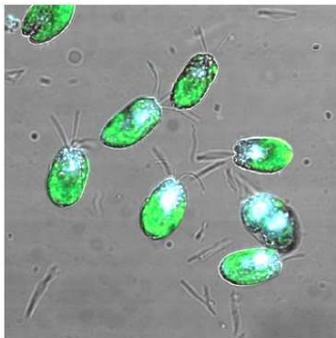
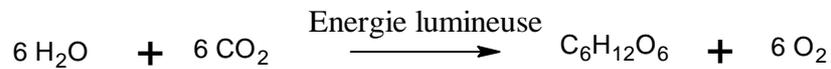


Figure 1 : Image agrandie au microscope représentant des microalgues d'espèce *Tetraselmis suecica* [6]

On peut souligner le caractère renouvelable de l'énergie produite car les microalgues peuplent de nombreux écosystèmes sur Terre et elles sont facilement cultivables. De plus, il est important de souligner que la photosynthèse consomme des « déchets ». En effet, comme le montre l'équation générale ci-dessous, cette synthèse utilise de l'eau pouvant être usée et du gaz carbonique pouvant être celui rejeté en grande quantité dans l'atmosphère par les industries (par exemple les centrales électriques).



Afin de réaliser les différentes synthèses responsables de leur survie et leur développement, il est clair que les micro-organismes photosynthétiques nécessitent l'apport de différents éléments (eau, énergie lumineuse, source de carbone, source d'azote et éléments minéraux) remplissant chacun sa fonction. Mais soulignons qu'à l'instar des végétaux terrestres, les microalgues sont sensibles à leur environnement. Elles évoluent selon un rythme saisonnier, avec un maximum de divisions cellulaires au printemps et en fin d'été.

Pour optimiser la culture des microalgues, il est donc possible d'agir sur différents paramètres physico-chimiques. Mais il est primordial de souligner qu'ils dépendent du choix de l'espèce de phytoplancton.

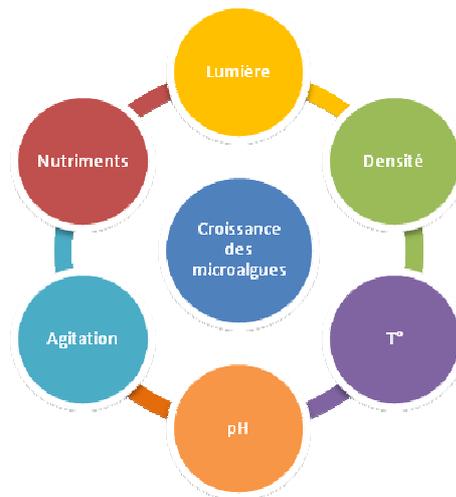


Figure 2 : Facteurs responsables de la croissance des microalgues

Tel qu'illustré par la figure ci-dessus, la croissance des microalgues peut donc être favorisée par plusieurs facteurs :

- une *intensité lumineuse* adéquate (de 50 à 200 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) et une longueur d'onde d'UV optimale (comprise entre 400 et 600 nm pour la photosynthèse) ;
- une *densité des cellules* de culture comprise entre 0,5 et 6 g/l afin d'éviter le phénomène d'auto-ombrage qui ralentit ou annule la croissance ;

- une *température* adéquate à l'espèce cultivée, généralement située entre 25 et 35°C ;
- un *pH* adéquat à l'espèce cultivée, généralement neutre ;
- une *agitation* visant un régime d'écoulement turbulent qui permet d'homogénéiser le milieu mais limité pour préserver l'intégrité cellulaire ;
- un bon *dosage des nutriments* tels que le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre, etc.

Cette croissance dépend également du milieu de culture. Il paraît logique que le temps de génération nécessaire au doublement de microalgues dans un milieu naturel est généralement plus long que celui obtenu dans un laboratoire. En effet, les conditions de culture idéales ne sont pas continues dans les milieux naturels, tandis que la culture en laboratoire offre la possibilité d'optimiser ces conditions et ainsi favoriser l'augmentation du taux de croissance. Néanmoins, il faut souligner que les milieux artificiels engendrent des coûts supplémentaires.

Outre les milieux naturels, il existe deux principaux moyens de culture exploités à l'heure actuelle. Le premier est le photobioréacteur qui est défini comme étant un système clos à l'intérieur duquel on peut contrôler les différents paramètres influençant la culture de micro-organismes photosynthétiques. Le deuxième est une solution intermédiaire et se nomme « raceway ». Tel que représenté sur la figure 3, il s'agit d'un « circuit » en boucle fermée et ouvert à l'air libre.

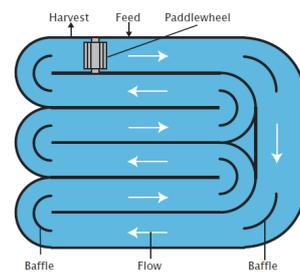


Figure 3: Raceway type

Chaque technique de culture offre ses avantages et ses inconvénients. D'une part, le principal avantage de cultiver en système ouvert est la réduction des coûts de mise en œuvre et de maintenance. Par contre, ce système comporte

plusieurs inconvénients : le risque de contamination, l'évaporation de l'eau chargée en CO_2 et des zones sombres limitant le rendement de la culture. D'autre part, cultiver en système clos permet d'éliminer les inconvénients liés au système ouvert. Les photobioréacteurs permettent donc d'obtenir un meilleur rendement de croissance. Finalement, notre intérêt se limitera aux photobioréacteurs car l'objectif est d'implanter la biotechnologie au bâtiment.

2.2. Production d'énergie grâce aux photobioréacteurs

La culture des microalgues en milieu clos et plus précisément en photobioréacteurs permet d'obtenir plusieurs sources d'énergie valorisables. La figure 4 expose différentes possibilités d'exploiter les potentielles sources d'énergie produites au sein des microalgues. Ces sources sont : la biomasse, les sucres, l'amidon, l'huile et le dihydrogène. La quantité produite de chacune de ces sources dépend du rendement photosynthétique de l'espèce cultivée et des conditions de culture. Trois sources sont couramment exploitées : la biomasse, l'huile et le dihydrogène. En effet, faisant l'objet de nombreuses études, elles sont considérées comme les plus avantageuses.

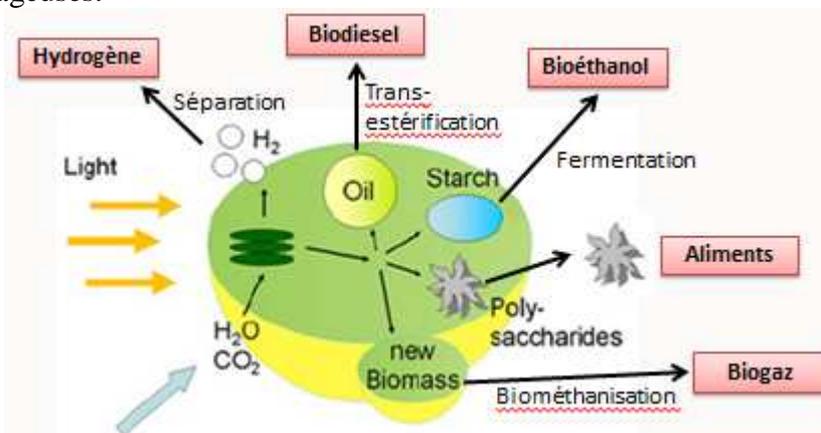


Figure 4 : Voies possibles pour la production d'énergie [9]

Pour avoir une idée de l'énergie récoltable par cette méthode, il faut tenir compte du taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie biochimique, le PCE (PhotoConversion Efficiency). Celui-ci est de 9% maximum pour les microalgues [9]. De plus, en Europe centrale, l'énergie solaire reçue au sol se chiffre à $1000 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. On peut dès lors déterminer l'énergie théorique maximale :

$$E_{th\ max} = E_{solaire} \times PCE_{max} = (1000 \times 3,6) \times 0,09 = 324 \text{ MJ}/(\text{m}^2.\text{an})$$

2.3. Exploitation des énergies produites

Comme la figure 4 l'expose (de façon non exhaustive), différentes voies existent pour valoriser l'énergie produite par la culture en photobioréacteur :

- la biomasse est valorisable soit par séchage, soit par transformation en biogaz grâce à la biométhanisation ;
- les polysaccharides représentent des nutriments exploitables dans le domaine alimentaire ;
- l'amidon est transformable en bioéthanol par fermentation ;
- l'huile est directement consommable ou transformée en biodiesel par transestérification ;
- le dihydrogène est, après séparation, directement utilisable.

Rappelons que la start-up propose la production simultanée d'hydrogène, d'huile et de biomasse. Or, les conditions de culture pour obtenir de l'hydrogène ne sont pas identiques à celles favorisant la production d'huile. Il est dès lors logique de privilégier l'une des voies et de nombreuses études démontrent qu'il est plus intéressant de favoriser la production d'huile.

2.4. Dimensionnement d'un photobioréacteur

Afin d'optimiser la rapidité de la culture et de conserver la qualité des matériaux cellulaires, plusieurs critères sont à considérer pour dimensionner un photobioréacteur :

- *Le rapport Surface illuminée/Volume du réacteur (S/V) :*
Plus ce rapport est élevé, plus la concentration en énergie au sein des cellules est élevée et plus la productivité est importante.
- *La technique d'agitation :*
Son choix est important pour assurer l'homogénéité du milieu. Les techniques suivantes sont envisageables : le pompage, l'agitation mécanique ou l'airlift qui injecte des bulles de gaz.
- *L'alimentation en CO₂ :*
Passive ou active, elle doit être conçue dans le but de maximiser le rendement de transfert de masse du gaz.
- *L'unité de dégazage :*
Etant donné que la photosynthèse libère du O₂, celle-ci doit être prévue entre l'entrée et la sortie du photobioréacteur.

- *Les matériaux de construction du réacteur :*
Le choix des parois est primordial, notamment en ce qui concerne sa transparence.
- *Les systèmes de régulation :*
Ils doivent être intégrés pour contrôler les conditions de culture telles que la densité, la température, le pH, le niveau d'eau et la quantité de gaz.

Ces critères mènent à imaginer différents designs de photobioréacteurs. A ce jour, il en existe déjà plusieurs, illustrés par les figures 5 et 6, mais des modèles sont encore développés afin de combiner haute productivité et basse consommation d'énergie avec un faible coût pour la fabrication à grande échelle.

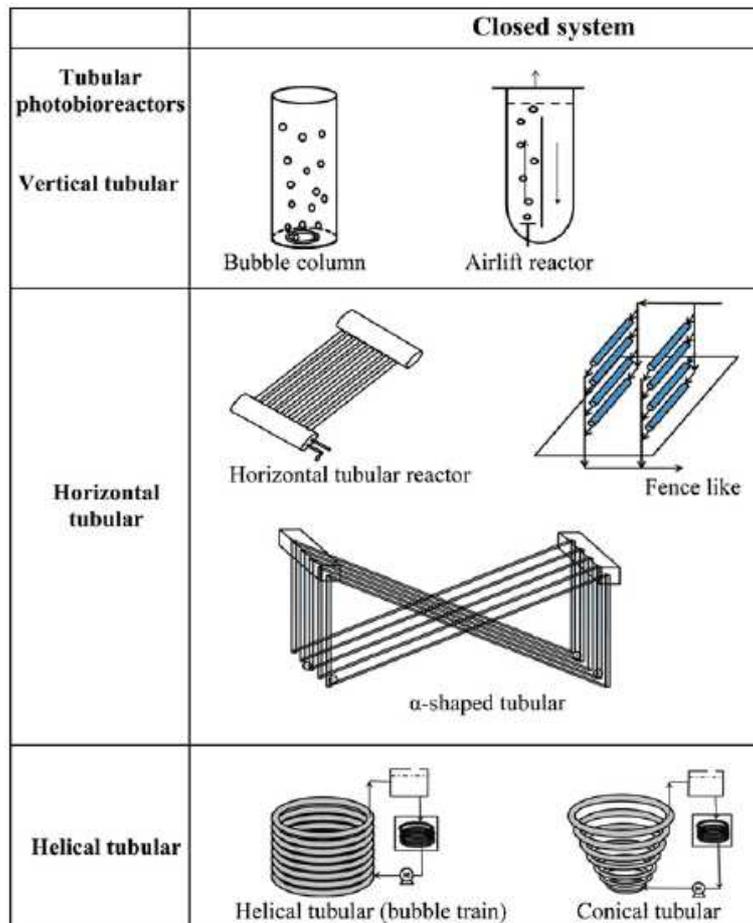


Figure 5 : Différents designs de photobioréacteurs [10]

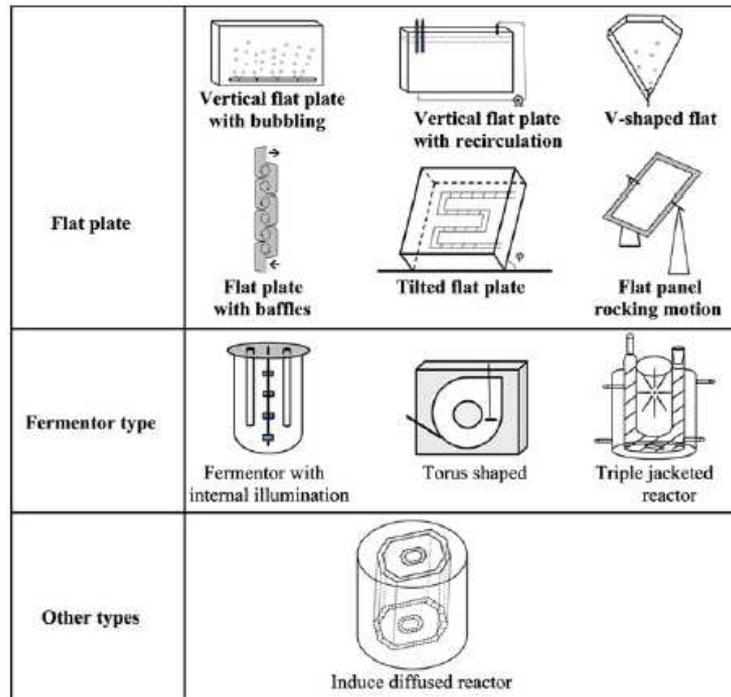


Figure 6 : Différents designs de photobioréacteurs [10]

2.5. Etapes de production

La production d'énergie grâce au photobioréacteur se déroule en quatre étapes : la culture, la récolte, l'extraction et la transformation (schématisées sur la figure 7).



Figure 7 : Etapes de production d'énergie algale

Avant tout, le choix d'une espèce de microalgues est primordial. En effet, cette espèce doit réaliser un bon compromis entre haut taux de croissance et production élevée de lipides. Plusieurs études révèlent d'ailleurs que ces deux facteurs sont antagonistes. La première étape consiste donc à cultiver

l'espèce choisie dans les conditions optimales visant la production intensive de lipides.

Une fois que le taux de croissance des microalgues est à son maximum, la récolte peut avoir lieu. Cette étape est la plus gourmande en énergie. De la moins à la plus énergivore, plusieurs techniques de récolte sont possibles : la floculation, la flottation, la filtration et la centrifugation.

Après récolte, l'objectif est d'extraire le matériel énergétique des cellules. Dans notre cas, il s'agit de l'huile. Plusieurs méthodes sont envisageables : l'extraction par solvant, l'extraction par fluide supercritique ou l'extraction mécanique.

Finalement, de l'huile et des déchets de biomasse sont à disposition. Ces deux sources d'énergie doivent subir une transformation afin d'être exploitées.

3. Application au projet étudié

L'objectif de cette partie est d'étudier la faisabilité de l'implantation de photobioréacteurs aux projets *North Light* et *Pole Star* représentés sur la figure 8. Ces deux bâtiments sont destinés à former un seul immeuble de bureaux possédant les caractéristiques suivantes : une capacité d'environ 3100 personnes, une surface de bureaux de 75 000 m², 14 niveaux hors sol et 2 niveaux sous-sol.



Figure 8 : Représentation des projets North Light et Pole Star [8]

3.1. Caractéristiques de la culture

Choix de l'espèce

Avant tout, il faut procéder à la sélection de la variété de microalgue. Or, les eaux usées n'étant pas salées, la sélection se limite aux espèces d'eau douce. Cependant, cette sélection est délicate à effectuer car il reste des milliers d'espèces à étudier et les chercheurs procèdent à des modifications génétiques en laboratoire pour favoriser les rendements lipidiques. Ce choix sera donc laissé aux chercheurs et ingénieurs spécialisés en biochimie.

Etant donné qu'aucune espèce n'est sélectionnée, l'énergie de production sera considérée comme l'énergie théorique maximale pouvant être produite en Belgique. Rappelons que cette valeur s'estime à $324 \text{ MJ}/(\text{m}^2.\text{an})$, soit $0,89 \text{ MJ}/(\text{m}^2.\text{jour})$.

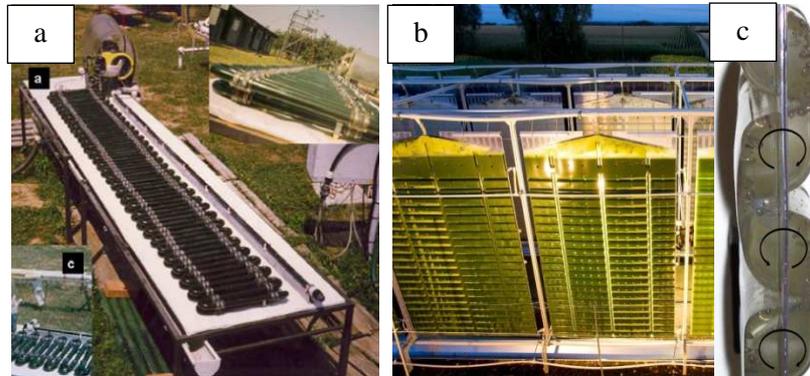
Remarque : en guise de comparaison, aujourd'hui, les meilleurs panneaux photovoltaïques monocristallins peuvent atteindre un rendement de

conversion de 20%, soit le double du rendement des microalgues qui de plus ne produisent pas d'énergie électrique directement!

Choix du photobioréacteur

L'étape suivante est le choix du réacteur qui est aussi critique que celui de l'espèce car il régit les conditions de croissance des micro-organismes. Les réacteurs actuels les plus performants sont les tubulaires et les panneaux plats.

La figure 9 illustre un photobioréacteur tubulaire « classique » (figure 9-a) ainsi que qu'un photobioréacteur plat de nouvelle génération (figure 9-b) qui pourraient être implantés dans le bâtiment étudié. Comme le montre la figure 9-c, les parois en plastique du plat de nouvelle génération sont profilées par emboutissage afin d'obtenir des mélangeurs statiques. Ceux-ci induisent des vortex qui permettent une agitation « gratuite ».



*Figure 9: a. Photobioréacteur tubulaire [1]
 b. Photobioréacteur plat
 c. Profil embouti des parois du photobioréacteur plat [13]*

Avant de pouvoir comparer ces photobioréacteurs, voyons où implanter le système. Comme illustré sur la figure 10, les espaces entre les châssis sur les façades les plus ensoleillées sont disponibles.

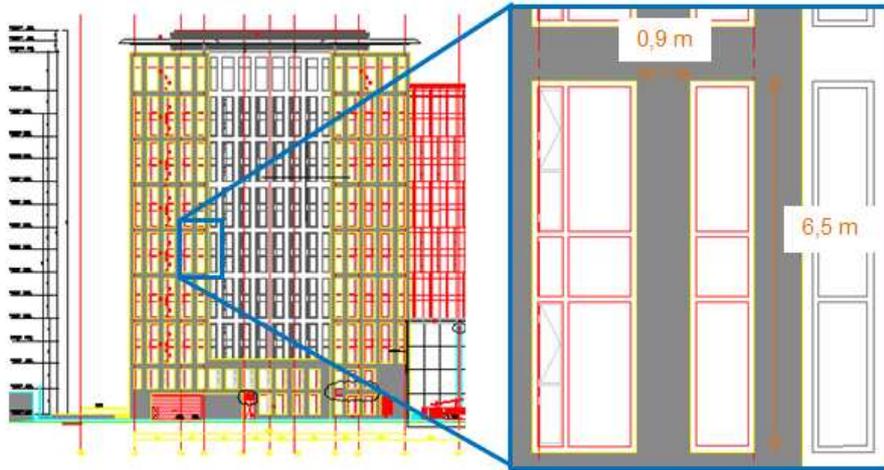


Figure 10 : Façade sud du bâtiment Pole Star et zoom [8]

Etant donné que ce sont des espaces libres de $0,9 \times 6,5 \text{ m}^2$, considérons donc des surfaces de $0,7 \times 6 \text{ m}^2$ pour y fixer les photobioréacteurs.

La sélection peut alors s'établir à partir des critères de dimensionnement présentés dans l'étude bibliographique et à partir d'études de recherche. Le tableau 1 propose, pour une même surface, une comparaison des photobioréacteurs à partir des deux critères les plus pondérants : le rapport S/V et l'agitation.

	PBR tubulaire (PVC transparent, $D_i=2,6\text{cm}$, $Re=19500$, $L=80\text{m}$)	PBR plat de nouvelle génération
Surface	0,7x6 m ²	
Rapport S/V ¹	89 m ⁻¹	27 m ⁻¹
Agitation	Pompage	Airlift + Vortex
$E_{\text{agitation}}$ ²	2,08 MJ/(m ² .jour)	0,64 MJ/(m ² .jour)
$E_{\text{th max}}$	0,89 MJ/(m ² .jour)	

¹ Valeurs calculées à partir de la surface considérée et de données fournies par divers études et fournisseurs.

² Valeurs calculées à partir de données fournies dans divers études et de l'abaque fournissant les pertes de charge dans les tubes en PVC réservés à la distribution d'eau.

Tableau 1: Comparaison entre les photobioréacteurs (PBR) tubulaire et plat

Le rapport S/V du tubulaire est clairement plus important que celui du plat et donc plus avantageux. Néanmoins, le pompage pour le tubulaire nécessite plus d'énergie que le système combinant l'airlift et les vortex des panneaux plats de nouvelle génération.

La sélection du photobioréacteur doit donc s'établir sur un compromis entre haut rapport S/V et système d'agitation peu énergivore. Il est alors important de souligner que ces critères dépendent surtout de l'énergie produite qui a été évaluée à $0,89 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{jour})$ dans le cas le plus idéal. Or, pour cette valeur, nous constatons que le photobioréacteur plat est le plus viable.

3.2. Implantation des photobioréacteurs

Connaissant la surface exploitable entre châssis (qui correspond à des murs en béton) et sachant qu'elle est constante pour toutes les façades, déterminons l'espace totale disponible. Comme le montre la figure 11, toutes les façades, prévues avec un revêtement en pierre par le maître d'ouvrage, sont orientées favorablement par rapport au soleil.

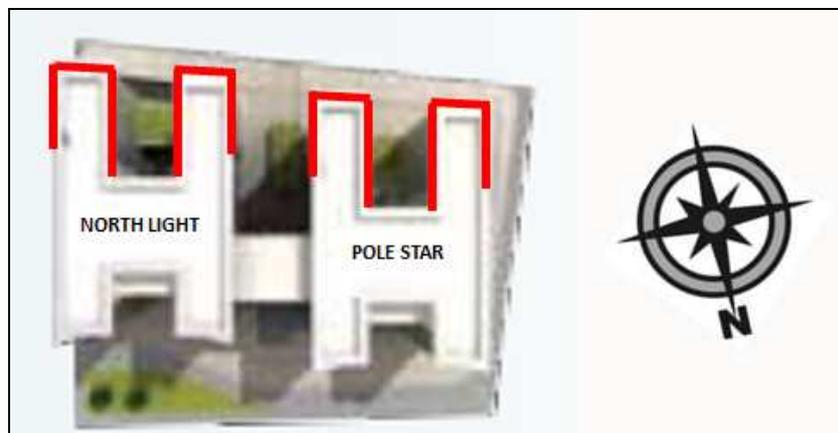


Figure 11 : Représentation schématique de la vue du dessus des bâtiments North Light et Pole Star [8]

En se référant à la vue du dessus, on répertorie : 4 façades intérieures et 4 façades extérieures orientées favorablement nord-sud ainsi que 4 façades extérieures orientées est-ouest. Après examen des façades types, on obtient 616 espaces de $0,7 \times 6 \text{ m}^2$ soit une surface totale exploitable d'environ 2600 m^2 pour y fixer les photobioréacteurs.

3.3. Principe de fonctionnement

Pour gérer le fonctionnement des 616 photobioréacteurs, un principe a été imaginé. Il se décompose en 3 phases.

Phase 1 : La croissance débute dès que les premiers rayons du soleil rencontrent les parois des bioréacteurs. Durant toute la matinée, chaque milieu est agité grâce à son airlift qui injecte du gaz enrichi en CO₂ et à ses mélangeurs statiques. Les conditions idéales de cultures sont maintenues grâce à des systèmes de régulation.

Phase 2 : La récolte journalière a lieu au moment où le taux de croissance est à son maximum. De plus, étant donné que le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest, la récolte suivra cet ordre et sera réalisée par série (étage) de réacteurs. Le photobioréacteur est alors vidé des 2/3 de sa capacité grâce à un circuit hydraulique commandé par des électrovannes. Le fluide évacué est dirigé vers le filtre qui est chargé de récolter la biomasse algale. La séparation terminée, l'eau assainie peut soit alimenter une citerne, soit être rejetée à l'égout.

Phase 3 : Pendant la nuit, l'airlift injecte de l'air comprimé pour maintenir l'agitation du système et alimenter les microalgues en oxygène qui réalisent la phase sombre de la photosynthèse.

3.4. Bilan énergétique

L'analyse énergétique d'un tel système s'effectue en déterminant le rapport net en énergie (NER pour Net Energy Ratio) :

$$\begin{aligned} \text{NER} &= \Sigma (\text{Energies produites}) / \Sigma (\text{Energies consommées}) \\ &= E_{\text{th max}} / (E_{\text{Airlift}} + E_{\text{circulation}} + E_{\text{transport CO}_2} + E_{\text{supplémentaires}}) \end{aligned}$$

Les énergies consommées supplémentaires sont :

- l'énergie électrique nécessaire à l'alimentation de plusieurs dispositifs (exemples : capteurs, électrovannes, etc.) ;
- l'énergie nécessaire à la récolte et à l'extraction ;
- l'énergie de captage du CO₂ ;
- l'énergie dépensée pour la maintenance.

La valeur de ces énergies n'est pas aisée à déterminer. C'est pour cette raison que nous ferons l'impasse dessus et calculerons le NER maximal pour une surface illuminée de 3500 m² ($= n_{\text{PBR}} \times S_{\text{IPBR-illuminé}} = 616 \times 5,78 \text{ m}^2$).

L'énergie produite correspond à l'énergie théorique maximale calculée. L'énergie d'agitation a été calculée précédemment et vaut 0,64 MJ/(m².jour).

L'énergie de circulation correspond à l'énergie moyenne nécessaire à l'alimentation en eaux usées qui sont stockées dans la citerne de 160 m³ située au niveau -1 du *Pole Star*. Elle a été estimée à 7,3 MJ/(m².jour).

L'énergie de transport du CO₂ correspond à la dépense nécessaire à l'apport de ce gaz contenu dans les fumées de la centrale TGV de Drogenbos par exemple. Elle a été déterminée et vaut 3,1 MJ/(m².jour) (hypothèses : camion-citerne de 15 m³ pour le transport ; fréquence de livraison = une fois tous les 96 jours ; consommation moyenne = 30 l/100km ; capacité énergétique d'1 l de diesel = 38 MJ ; distance du trajet aller-retour entre la centrale et le bâtiment = 26 km).

$$\text{NER}_{\text{max}} = (0,89 \times 3500) / (0,64 \times 3500 + 7,3 \times 3500 + 3,12) = 0,11$$

Le système consommera donc environ 9 fois la quantité d'énergie produite. Cela implique que, même si l'on arrive à atteindre l'énergie de production maximale $E_{\text{th,max}}$, le système présentera une balance énergétique négative. De plus, comme l'énergie consommée n'est pas entièrement comptabilisée, ce rendement est encore plus faible.

A l'heure actuelle, cette tendance négative est la conclusion de plusieurs études. Néanmoins, de nombreux laboratoires entreprennent des recherches intensives dans le but de faire basculer cette balance énergétique.

D'une part, les chercheurs tentent de diminuer la consommation d'énergie des photobioréacteurs. Ils imaginent notamment de nouveaux designs de réacteurs moins énergivores. D'autre part, des recherches sont menées dans le but d'augmenter la quantité d'énergie produite. Une des voies favorisées est la modification génétique des micro-organismes cultivés. Récemment, *Jay Kiesling*, chercheur actif dans la filière des biocarburants élaborés à partir de bactéries, a réussi à tripler le rendement d'une souche d'*Escherichia coli*. Le rendement de cette variété de bactérie est passé de 9,4% à 28%. Il y est parvenu en lui ajoutant un système de régulation

génétique autonome qui lui permet de travailler et de se nourrir plus efficacement [5]. Cela renforce l'idée qu'il est utile d'encore plus investiguer cette voie d'amélioration.

4. Conclusion et perspectives

Le développement durable, se manifestant notamment par l'apport d'énergie renouvelable au bâtiment, constitue un enjeu essentiel pour les générations futures. En conséquence, la recherche de nouvelles technologies est déjà au centre de nos intérêts. La technique innovante étudiée, annoncée comme exploitable dès aujourd'hui par une start-up, méritait notre intérêt.

Au cours de l'étude, le photobioréacteur plat avec airlift a été sélectionné à partir de critères fondamentaux. Le but était d'obtenir une quantité d'énergie produite supérieure aux consommations énergétiques nécessaires. Cependant, malgré toutes les solutions proposées pour diminuer ces dépenses, le système imaginé est caractérisé par une balance énergétique négative.

Les chiffres positifs annoncés par certaines entreprises optimistes ne concordent ni avec cette étude ni avec les autres études réalisées dans le domaine depuis 30 ans. Actuellement, un tel procédé ne peut donc pas être intégré aux bâtiments urbains construits en Europe centrale. Néanmoins, l'avenir de cette biotechnologie est loin d'être compromis et de nombreuses recherches sont en cours afin de la rendre viable.

Ces investigations soumettent des perspectives intéressantes : le design de nouveaux photobioréacteurs plus performants ; des techniques de production intensive en milieu naturel et la modification génétique d'espèces de micro-organismes visant à accroître principalement le rendement photosynthétique.

L'implantation géographique joue également un rôle fondamental pour l'apport des déchets, comme les eaux usées et le gaz carbonique. Si le système est installé sur des superficies planes à côté d'une centrale thermique ou d'une station d'épuration, la balance énergétique pourrait être positive. Finalement, ce système est annoncé rentable pour des installations pilotes fabriquant du biocarburant. L'espoir de voir un jour ces systèmes contribuer à nos besoins énergétiques reste donc intact.

5. Remerciements

Mes remerciements vont à l'Ing. D. ANCELOT pour m'avoir accueilli et permis de réaliser cette étude au sein de la société *CFE Brabant*.

6. Sources

[1] CARLOZZI P., 2008, *Closed Photobioreactor Assessments to Grow, Intensively, Light Dependent Microorganisms: A Twenty-Year Italian Outdoor Investigation*, *The Open Biotechnology Journal* 2, 63-72.

[2] DAMIEN A., 2008, *La biomasse énergie : définition, ressources, usages*, Paris, DUNOD.

[3] ENNESYS, 2011, *Ennesys Corporate au 14 juin 2011*.

[4] FOUCAUD-SHEUNEMANN C. & HELINCK S., 2009, *Les micro-organismes au cœur des biotechnologies*, Techniques de l'ingénieur.

[5] FUTURA-SCIENCES, 2001-2012, consulté en novembre 2011 sur Futura-Sciences : <http://www.futura-sciences.com/>

[6] GREENWELL H. & al., 2009, *Placing microalgae on the biofuels priority list : a review of the technological challenges*, *Journal of The Royal Society Interface* 7, 703-725.

[7] JENCK J. & al., 2011, *Valorisation industrielle des microalgues photosynthétiques*, Techniques de l'ingénieur.

[8] M. & J-M. Jaspers – J. Eyers & Partners, 2011, *Plans d'exécution du Pole Star et du North Light*, Plans d'architecture, Bruxelles: M. & J-M. Jaspers – J. Eyers & Partners.

[9] MORWEISER M. & al., 2010, *Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production*, *Appl Microbiol Biotechnol* 87, 1291-1301.

- [10] NAG DASGUPTA C. & al., 2010, *Recent trends on the development of photobiological processes and photobioreactors for the improvement of hydrogen production*, International journal of hydrogen energy 35, 10218-10238.
- [11] PRUVOST J. & al., 2011, *Production industrielle de microalgues et cyanobactéries.*, Techniques de l'ingénieur.
- [12] SEVIGNE ITOIZ E. & al., 2012, *Energy balance and environmental impact analysis of marine microalgal biomass production for diesel generation in a photobioreacteur pilot plant*, Biomass and bioenergy 39, 324-335.
- [13] SUBITEC GmbH, 2012, *The technology of Subitec GmbH for the producing of micro-algae*, sur Subitec - Sustainable Biotechnology: <http://en.subitec.com/microalgae-technology/>
- [14] TREDICI M. & ZITTELLI G., 1998, Efficiency of Sunlight Utilization: Tubular Versus Flat Photobioreactors, Biotechnology and bioengineering 57(2).
- [15] XU L. & al., 2009, Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities, Energy Life Science, 178-189.
- [16] ZENG X. & al., 2011, *Microalgae bioengineering : From CO2 fixation to biofuel production*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 3252-3260.