

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



**LVALEF**

Département Génie Chimique  
Laboratoire de Valorisation des énergies fossiles  
Mémoire de Master  
pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Chimique

# **Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture**

Chourouk NAIT SAIDI

Sous la direction de Mme Faroudja MOHELLEBI Professeur

et Mr Toudert AHMED ZAID Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2016

## **Composition du Jury :**

Présidente	Mme Afia MEFTI	MCA	ENP
Rapporteurs/ Promoteurs	Mme Faroudja MOHELLEBI	Professeur	ENP
	Mr Toudert AHMED ZAID	Professeur	ENP
Examineurs	Mr Chems Eddine CHITOUR	Professeur	ENP
	Mr Ammar SELATNIA	Professeur	ENP
Invité	Mr Mohamed AMOURI	Attaché de recherche	CDER

ENP 2016

# *Dédicaces*

*A cœur vaillant rien d'impossible*

*A conscience tranquille tout est accessible*

*Quand il y a la soif d'apprendre*

*Tout vient à point à qui sait attendre*

*Quand il y a le souci de réaliser un dessein*

*Tout devient facile pour arriver à nos fins*

*Malgré les obstacles qui s'opposent*

*En dépit des difficultés qui s'interposent*

*Les études sont avant tout*

*Notre unique et seul atout .Ils représentent la lumière de notre existence*

*L'étoile brillante de notre réjouissance*

*Comme un vol de gerfauts hors du charnier natal*

*Nous partons ivres d'un rêve héroïque et brutal*

*Espérant des lendemains épiques*

*Un avenir glorieux et magique*

*Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis*

*Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri*

*Aujourd'hui, ici rassemblés auprès des jurys,*

*Je prie dieu que cette soutenance*

*Fera signe de persévérance*

*Et que je serais enchantée par mon travail honoré.*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents, dont nul mot ne peut exprimer mes sincères sentiments de reconnaissance, pour leur patience, pour leurs encouragements continus dès mon enfance, pour leurs aide et soutien moral dans les moments les plus difficiles, en témoignage de mon grand amour et de mon respect pour vous maman, papa.*

*Mes chers frères : Nada, Wiam, et Mohamed Islem, pour leur amour et leur soutien. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma grande gratitude.*

*Mes très chers amis et camarades : Tarek, Massi, Hamza, Rabia, Yasmine, Naziha, Imene, Semra, Bouchra, Kamel, Abir, Dalal, Fatima, Islam, Zak, Romaiassa, Wahiba, Anfel, Asma et Selma. Des amis que je n'oublierai jamais, merci d'avoir été présents, merci pour votre soutien, merci pour vos encouragements et merci pour les merveilleux moments passés ensemble, je vous adore.*

*A toute ma famille,*

*A tous ceux que j'aime, qui sans eux ce travail n'aurait jamais vu le jour.*

*Chourouk Nait Saïdi*

# *Remerciements*

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements pour toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Je tiens tout d'abord à remercier Mr Mohamed AMOURI doctorant à l'ENP et attaché de recherche au CDER, pour son aide, ses conseils, son encouragement et sa disponibilité dans ce mémoire de master.

Je remercie également mes encadreurs Pr Toudert AHMED ZAID et Pr Faroudja MOHELLEBI pour m'avoir encadrée, orientée, aidée, conseillée et pour tout le temps qu'ils m'ont consacré.

Je remercie chaque membre du jury pour avoir accepté d'examiner mon travail. Que Dr Afia MEFTI soit remerciée pour avoir accepté de présider le jury. J'exprime toute ma gratitude à Monsieur le Professeur Chems Eddine CHITOUR et à Monsieur le Professeur Ammar SELATNIA pour le temps qu'ils ont accordé à l'évaluation de ce travail.

Que le Pr Chems Eddine CHITOUR, soit remercié de m'avoir ouvert l'esprit vers un monde vert, vers une alternative pour sauver les réserves énergétiques. Si j'ai choisi d'effectuer ce travail, c'est avant tout grâce à vous, à vos conseils et à votre vision du futur.

Je présente mes sincères remerciements à mes professeurs Pr El Hadi BENYOUSSEF et Dr Fairouz KIES pour leurs encouragements, conseil et soutien moral, ainsi qu'à tous mes enseignants du département Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique, merci de m'avoir appris le nécessaire de la formation, de m'avoir toujours guidée et soutenue, car sans vous je ne serais jamais arrivée à réaliser ce travail.

## ملخص :

نظراً لكون الطحالب مصدراً هاماً لإنتاج الطاقات المتجددة، فقد استحوذت في السنوات الأخيرة على اهتمام كبير من طرف الباحثين. لكن حتى لو كان إنتاج الوقود الحيوي يساهم في التنمية المستدامة وممكناً من الناحية الاقتصادية إلا أنه يلزم تحسين وتعديل ظروف زراعة الطحالب. ولهذا اقترح العلماء دمج معالجة مياه الصرف الصحي وزراعة الطحالب. فبالفعل تعد زراعة الطحالب بديلاً لمعالجة مياه الصرف الصحي بطريقة حيوية بالإضافة لإنتاج كتلة حيوية قابلة للاسترداد يمكن استخدامها لإنتاج الوقود الحيوي. تقوم هذه الدراسة بتقييم الآثار البيئية لنظام معالجة مياه الصرف الصحي المدمج بإنتاج وقود الديزل الحيوي عن طريق تحليل دورة حياة النظام ومقارنتها بدورة حياة نظام إنتاج وقود الديزل الحيوي من الطحالب.

**الكلمات الدالة :** طحالب، الديزل الحيوي، مياه الصرف الصحي، تحليل دورة الحياة، آثار بيئية سلبية.

## **ABSTRACT Life cycle assessment of biodiesel from a chlorella compared analysis between two cultivation systems**

These last years the potential of microalgae as a source of renewable energy has received a considerable interest, but if microalgal biofuel production is to be economically viable and sustainable, further optimization of mass culture conditions are needed. That is why recent research has proposed integrating wastewater treatment with algae cultivation. Actually microalgal cultures offer an interesting alternative for waste water treatment (urban, industrial or agricultural effluents) because they provide a biotreatment coupled with the production of potentially valuable biomass, which can be used for biofuel production. This study evaluates the environmental performance of wastewater treatment-based algal biodiesel with a life cycle assessment (LCA) compared with a classic LCA algal biodiesel production.

**Key words: Microalgae, Biodiesel, Wastewater, LCA, Environmental impacts.**

## **RESUME Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture**

Le potentiel intéressant des microalgues comme source d'énergie renouvelable a reçu un intérêt considérable ces dernières années. Mais, même si la production des biocarburants est durable et économiquement viable, l'optimisation des conditions de culture est nécessaire. C'est pourquoi des chercheurs ont proposé d'intégrer le traitement des eaux usées avec la culture des microalgues. En effet, la culture des microalgues offre une alternative intéressante pour le traitement des eaux usées (effluents urbains, industriels ou agricoles) parce qu'elle fournit un biotraitement couplé à la production de biomasse valorisable qui peut être utilisée pour la production de biocarburants. Cette étude évalue la performance environnementale d'un système de traitement d'eaux usées domestiques – production du biodiesel à partir de microalgues à l'aide d'une analyse du cycle de vie (ACV) et la compare à une ACV du système de production classique du biodiesel à partir de microalgues.

**Mots clés : Microalgue, Biodiesel, Eau usée, ACV, Impacts environnementaux.**

Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse  
comparée de deux milieux de culture

# *Sommaire*

Dédicaces .....	2
Remerciements .....	4
Sommaire .....	6
Liste des tableaux .....	10
Liste des figures .....	11
Liste des abréviations .....	13
Introduction générale.....	14
Chapitre I Les biocarburants de 3 <sup>ème</sup> génération et le biodiesel.....	15
Introduction .....	15
I. 1. Définition du biocarburant .....	16
I. 2. Types de biocarburants.....	16
I. 2.1. Les biocarburants de 1 <sup>ère</sup> génération .....	16
I. 2.2. Les biocarburants de 2 <sup>ème</sup> génération .....	16
I. 2.3. Les biocarburants de 3 <sup>ème</sup> génération.....	16
I. 3. Le biodiesel .....	17
I. 4. La réaction de transestérification .....	18
I. 5. Les microalgues.....	18
I. 6. Le biodiesel à partir de microalgues .....	19
I. 7. Avantages des microalgues .....	20
I. 8. Cycle de production du biodiesel à partir de microalgues .....	21
I. 8.1. La culture d'algues .....	21
a. Les étangs (Bassins) à ciel ouvert de type Raceway .....	21
b. Les photobioréacteurs .....	22
I. 8.2. La récolte des microalgues .....	22
a. La floculation .....	23
b. La sédimentation .....	23
c. La centrifugation .....	23
I. 8.3. Le séchage des microalgues .....	23
I. 8.4. L'extraction des lipides .....	24
I. 8.5. La conversion du biodiesel.....	25

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture

a.	Effet de la teneur en acides gras libres sur la conversion des lipides en biodiesel	25
	Conclusion.....	25
	Chapitre II Démarche de l'analyse du cycle de vie.....	26
	Introduction .....	26
II.	1. Définition de l'ACV .....	27
II.	2. Les étapes de l'analyse du cycle de vie.....	28
II.	3. L'ACV normalisée (série ISO 14040) .....	29
II.	4. Applications de l'ACV.....	29
II.	5. Les étapes de la méthodologie normalisée de l'ACV .....	30
II.	5.1. Définition des objectifs et du champ de l'ACV .....	30
a.	Définition de l'objectif de l'étude .....	30
b.	Définition du champ de l'étude.....	30
c.	Définition de la fonction du système.....	31
d.	Définition de l'unité fonctionnelle et flux de référence .....	31
e.	Définition du système.....	32
f.	Définition des limites du système .....	32
II.	5.2. Inventaire des émissions et des extractions.....	33
II.	5.3. Evaluation de l'impact du cycle de vie .....	33
II.	5.4. Interprétation .....	34
	Conclusion.....	34
	Chapitre III Culture des microalgues et traitement des eaux usées.....	35
	Introduction .....	35
III.	1. Procédé de traitement des eaux usées urbaines .....	36
III.	1.1. Le prétraitement des eaux usées domestiques.....	36
III.	1.2. Le traitement biologique .....	38
III.	1.3. Le traitement tertiaire.....	38
III.	1.4. La clarification .....	38
III.	2. Conditions de culture des microalgues.....	39
III.	2.1. La lumière .....	39
III.	2.2. L'agitation.....	39
III.	2.3. Le CO <sub>2</sub> et le pH.....	40
III.	2.4. La température .....	40
III.	2.5. Les nutriments.....	40

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture

a.	Source d'azote .....	40
b.	Source de phosphore .....	40
III.	3. La <i>Chlorella Vulgaris</i> .....	41
III.	4. L'utilisation des microalgues pour le traitement des eaux usées .....	42
III.	5. Culture des microalgues dans les eaux usées urbaines.....	43
III.	5.1. Les bassins de traitement des eaux usées.....	43
III.	5.2. Chenal algal à haut rendement .....	43
III.	5.3. Culture des microalgues et traitement des eaux usées dans les CAHR .....	43
	Conclusion.....	45
	Chapitre IV Comparaison de l'ACV du biodiesel issu de deux milieux de culture.....	46
IV.	1. Définition des objectifs et du champ de l'étude .....	47
IV.	1.1. Définition des objectifs de l'étude .....	47
a.	Application envisagée .....	47
b.	Public ciblé.....	47
IV.	1.2. Définition du champ de l'étude.....	47
a.	Le système.....	47
b.	Fonction du produit .....	47
c.	L'unité fonctionnelle .....	47
IV.	1.3. Frontières et limites du système.....	48
a.	Limites géographiques.....	48
b.	Catégories d'impact prises en compte .....	48
IV.	2. Les hypothèses .....	50
IV.	2.1. Hypothèses de l'inventaire.....	50
IV.	2.2. Hypothèses des données Sima Pro.....	52
IV.	3. Inventaire du Scénario de traitement de 3000 m <sup>3</sup> d'eaux usées urbaines.....	52
IV.	4. Système de production du biodiesel avec une culture dans une eau douce et CO <sub>2</sub> industriel.....	54
IV.	4.1. Le système .....	54
IV.	4.2. Hypothèses de l'inventaire.....	55
IV.	4.3. Hypothèses des données Sima Pro.....	56
IV.	4.4. Inventaire du Scénario de l'ACV du biodiesel .....	57
IV.	5. Comparaison entre les deux systèmes de production pour 1 tonne de biodiesel .	58
IV.	6. Interprétation des résultats .....	60
	Conclusion générale .....	62

**Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse**  
**comparée de deux milieux de culture**

Perspectives et recommandations.....	63
Références bibliographiques .....	64

Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse  
comparée de deux milieux de culture

## *Liste des tableaux*

Tableau I.1 : Présentation des biocarburants .....	17
Tableau I.2 : Teneur et productivité en lipides de quelques espèces de microalgues.....	19
Tableau I.3 : les différentes méthodes d'extraction avec leurs avantages et inconvénients ...	24
Tableau II.1 : Principaux contributeurs aux catégories d'impact .....	34
Tableau III.1 : Fiche d'identité de la chlorella vulgaris .....	41
Tableau IV.1 : Les Paramètres des étangs à ciel ouvert de type Raceway utilisé .....	50
Tableau IV.2 : Consommation de nutriments pour 1 kg d'algues de type chlorella vulgaris...	51
Tableau IV.3 : Composition d'une eau usée urbaine.....	51
Tableau IV.4 : Inventaire du cycle de vie du biodiesel à partir de microalgues avec traitement des eaux usées domestiques.....	53
Tableau IV.5 : Inventaire du cycle de vie du biodiesel à partir de microalgues.....	58
Tableau IV.6 : Contribution des processus élémentaires dans les deux systèmes de production du biodiesel à partir des microalgues « Chlorella Vulgaris ».....	60

Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse  
comparée de deux milieux de culture

## *Liste des figures*

Figure I.1. Réaction de transestérification des triglycérides avec le méthanol.....	18
Figure I.2 : Système de culture en extérieur du type Raceway (à droite) et Schéma d'une vue de haut d'un étang ouvert (à gauche).....	21
Figure I.3 : Variété des configurations des photobioréacteurs : A Photobioréacteur à cuve agitée – B : Photobioréacteur de type colonne à bulle – C : Air-lift photobioréacteur – D : Photobioréacteur incliné – E : Photobioréacteur hélicoïdal tubulaire – F : photobioréacteur à plaque inclinée – G : Photobioréacteur horizontal commercial en cours de construction – H photobioréacteur tubulaire.....	22
Figure I.4 : Réaction de saponification des acides gras .....	25
Figure II.1 : Schéma descriptif des étapes d'une ACV.....	27
Figure II.2 : Schéma descriptif des phases de l'analyse du cycle de vie .....	28
Figure II.3. Exemple d'un ensemble de processus dans un système (ISO 14041).....	32
Figure II.4 : Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions.....	33
Figure III.1 : Station d'épuration des eaux usées .....	36
Figure III.2 : Schéma d'ouvrage de dessablage-déshuilage combinés .....	37
Figure III.3 : Vue microscopique d'une colonie de <i>Chlorella Vulgaris</i> .....	41
Figure III.4 : traitement des eaux usées dans les CAHR fonctionnant à St Helena (a) et Hilmer (b) en Californie .....	44
Figure III.5 : L'un des quatre procédés de traitements des eaux usées dans les CAHR (1,25 ha) avec addition du CO <sub>2</sub> à Christchurch, Nouvelle-Zélande .....	44
Figure IV.1 : Schématisation des limites du système considéré.....	49
Figure IV.2 : Schématisation des limites du système de production du biodiesel considéré...56	
Figure IV.3 : Contribution des processus élémentaires dans l'ACV de la production du biodiesel de 3 <sup>ème</sup> génération associée au traitement d'eau usée urbaine.....	61

## Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture

Figure IV.4 : Contribution des processus élémentaires dans l'ACV de la production du biodiesel de 3ème génération (Scénario de base).....61

Figure IV.6 : Comparaison entre le biodiesel issu de la « Chlorella vulgaris » avec une culture de microalgues associée au traitement des eaux usées urbaines et un système de production de base.....62

Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse  
comparée de deux milieux de culture

## *Liste des abréviations*

ACV : Analyse du cycle de vie

CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone

NO<sub>x</sub> : Les oxydes d'azote

SO<sub>x</sub> : Les oxydes de soufre

GES : Gaz à effet de serre

POP : Polluants organiques persistants

NaOH : Hydroxyde de sodium

KOH : Hydroxyde de potassium

AGL : Acide gras libres

ISO : Organisation internationale de normalisation

SETAC : Society of environmental toxicology and chemistry

R&D : Recherche et développement

ICV : Inventaire du cycle de vie

ACVI : Analyse de l'inventaire du cycle de vie

CFC : Chlorofluorocarbure

HCFC : Hydrochlorofluorocarbure

STEP : Station de Traitement des Eaux Polluées

CAHR : Chenal Algal à Haut Rendement

HRAP : Hate Rate Algal Ponds

N : Azote

P : Phosphore

tkm : unité pour le facteur de transport égale aux poids en tonnes fois la distance parcouru en km

ML : Millions de litres

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture

## *Introduction générale*

Les biocarburants visent à remplacer le carburant issu du pétrole. Ils sont une alternative durable aux énergies fossiles puisqu'ils sont renouvelables et moins toxiques pour l'environnement. Pour l'instant, ces biocarburants sont d'origine végétale et proviennent des cultures agricoles. Un problème majeur est posé par l'utilisation de terres à vocation agricole pour produire du biocarburant. De nombreuses études ont été menées pour contourner ce problème et parmi celles-ci, certaines proposent d'exploiter l'énorme potentiel des algues.

En effet, la fabrication des biocarburants à partir des microalgues est très attractive vu le rendement élevé de ces microorganismes en lipides. Cependant, la maîtrise de cette technologie est loin d'être acquise et le coût de son exploitation n'est pas très motivant pour les industriels. Pour cela, il a été proposé d'intégrer la culture des microalgues pour la production des biocarburants aux traitements des eaux usées, une technique utilisée par ailleurs depuis plus de 50ans.

Dans ce travail, nous étudierons le potentiel de la microalgue « *Chlorella vulgaris* » pour le traitement d'une eau usée domestique et la production d'un biodiesel. A cet effet, une analyse du cycle de vie du procédé a été effectuée en vue d'estimer les impacts environnementaux. L'ACV du procédé de production du biodiesel associé au traitement d'une eau usée domestique modélisé, permettra également d'évaluer la faisabilité de ce dernier tout en le comparant à un système de production de base (sans valorisation ou optimisation) du biodiesel à partir de la même microalgue.

Cette étude comportera quatre chapitres. Le premier chapitre donnera une idée générale sur les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération et le biodiesel. Le deuxième chapitre définira la démarche de l'analyse du cycle de vie. Le troisième chapitre définira le procédé de traitement des eaux usées dans une STEP révélant ainsi le potentiel des microalgues pour la dépollution des eaux. Enfin, le dernier chapitre portera l'étude du procédé modélisé et la comparaison des deux ACV du biodiesel issu de deux milieux de culture.

# *Chapitre I*

## *Les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération et le biodiesel*

### **Introduction**

Le pétrole étant une énergie non-renouvelable, plusieurs scientifiques adhèrent à la théorie du pic pétrolier fondée sur un modèle élaboré en 1950 par M. King Hubbert selon laquelle la production de pétrole atteint son maximum pour ensuite tendre à diminuer progressivement. Du fait du changement climatique et de la pollution atmosphérique engendrée par le transport et les carburants fossiles, plusieurs pays du monde investissent dans les programmes de recherche sur les énergies renouvelables tels les biocarburants : le bioéthanol et le biodiesel.

Cependant, les biocarburants de première génération et de deuxième génération ont un potentiel limité à remplacer les carburants d'origine fossile utilisés dans le transport.

Pour cela, depuis quelques années, les chercheurs se sont intéressés au domaine de la production de biodiesel à partir des microalgues. Il semblerait d'ailleurs qu'il s'agisse du seul biocarburant permettant éventuellement de complètement remplacer le diesel, et ce, sans affecter les ressources alimentaires, la consommation d'eau et la détérioration des sols cultivables [1].

## **I. 1. Définition du biocarburant**

Un biocarburant est un carburant liquide ou gazeux issu de la biomasse, c'est-à-dire obtenu à partir d'une matière première végétale, animale ou de déchets. Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable. Leur combustion ne produit que du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes azotés et soufrés (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) [2].

## **I. 2. Types de biocarburants**

### **I. 2.1. Les biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération**

La première génération de biocarburants est issue de produits alimentaires (blé, maïs, betteraves, colza) via des processus techniques simples. Les principales techniques de production sont :

**-A partir de plantes oléifères (filière huile) :** De nombreuses espèces végétales sont oléifères (elles contiennent une huile ou une graisse végétale) comme le palmier à huile, le tournesol ou le colza. L'extraction de l'huile végétale peut alors être effectuée par un simple pressage à froid – écrasement, ou par voie chimique, ou une combinaison des deux méthodes.

**-A partir de plantes "à sucre" (filière alcool) :** Des plantes dont la composition est riche en sucre comme la canne à sucre, la betterave sucrière, du maïs ou du blé sont utilisées pour être transformées en alcool via un processus de fermentation des sucres [3].

### **I. 2.2. Les biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération**

La différence entre les deux premières générations tient au fait que les biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération utilisent l'intégralité de la lignocellulose des plantes ou de la biomasse : bois, paille, déchets, résidus agricoles et forestiers, cultures dédiées. De ce fait, la culture des plantes utilisées devrait ne plus entrer en concurrence directe avec les cultures vivrières [4].

Les végétaux pouvant être exploités pour la production de biocarburants de deuxième génération et possédant un potentiel « biocarburant » important sont les suivantes [3] :

- Le Jatropha
- Le Miscanthus
- Le Switchgrass

### **I. 2.3. Les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération**

Les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération, pour lesquels il n'existe pas encore de consensus sur leur définition, se distinguent de la 2<sup>ème</sup> génération par le type de biomasse utilisée.

# Chapitre I : Les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération et le biodiesel

Cette dernière est issue des algues : microalgues et également macroalgues en condition autotrophe [4].

Le tableau I.1 représente les différentes filières des biocarburants et leurs voies de production [4].

**Tableau I.1 : Présentations des biocarburants [4].**

	<b>1<sup>ère</sup> génération</b>	<b>2<sup>ème</sup> génération</b>	<b>3<sup>ème</sup> génération</b>
<b>Origine des substrats</b>	Betterave, céréales - canne à sucre pour l'éthanol,  Colza, tournesol, Soja, palme pour le biodiesel.	Déchets organiques, partie ligno-cellulosique des végétaux, bois.	Microalgue et Macroalgues.
<b>Procédés mis en œuvre</b>	Fermentation, Transestérification.	Gazéification, Hydrolyse enzymatique, Méthanisation.	Méthanisation  Gazéification  Transestérification
<b>Produit final</b>	Bioéthanol, biodiesel	Bioéthanol, biodiesel	Bioéthanol, biodiesel
<b>Rendement Energétique TEP/ha/an</b>	1 à 4	3,5 à 5	20 à 40
<b>Stade de maturité technologique</b>	Industriel	Industriel à court terme/ pilote	Recherche

## **I. 3. Le biodiesel**

Le biodiesel est produit à partir de graisses animales, de déchets de graisses de cuisson, d'huiles provenant de plantes à graines ou d'algues combinées avec de l'alcool (habituellement le méthanol) [5]. La transformation de ces produits donne du biodiesel pur et de la glycérine brute comme produit final. Le biodiesel entre dans les perspectives de la réduction des gaz à effet de serre (GES), établies par le protocole de Kyoto [6] (développement de mécanismes propres, réduction des émissions de dioxines, des dérivées furane et des polluants organiques persistants ou POP originaires de la combustion du pétro

diesel). Les propriétés du biodiesel dépendent essentiellement de la matière première ainsi que de l'alcool utilisé. Il possède un indice de cétane élevé et ne contient ni soufre ni aromatiques. L'oxygène y résidant peut atteindre 11 % [7].

Le biodiesel peut à la fois servir de carburant de remplacement au diesel conventionnel ou d'additif.

## I. 4. La réaction de transestérification

La transestérification des triglycérides n'est pas un processus nouveau. Elle date de 1853 lorsque Patrick et Duffy ont mené cette réaction bien avant que le premier moteur Diesel soit fonctionnel [8].

Pour former un ester, on peut partir d'un ester existant et lui additionner un alcool, c'est la technique classique de production du biodiesel. La réaction de transestérification est réversible. Pour la rendre totale, on introduit l'alcool en excès, en se plaçant en milieu acide ou basique, pour catalyser la réaction selon le schéma sur la figure I.1.

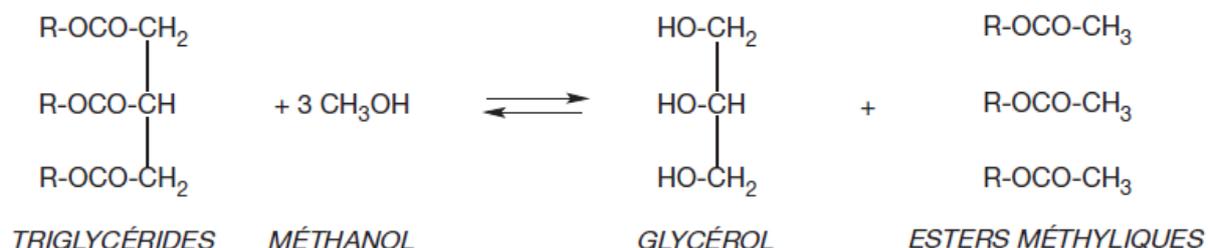


Figure I.1 : Réaction de transestérification des triglycérides avec le méthanol [9].

Les triglycérides des huiles sont des esters de glycérol encore désignés sous le nom de glycérine et d'acides gras R-COOH.

D'autres techniques permettent d'effectuer cette réaction en utilisant des technologies innovantes comme le chauffage par micro-ondes (avec des temps de catalyse fortement réduits) ou par catalyse enzymatique (avec, dans ce cas, des temps de séjour relativement longs). Il s'agit de technologies peu suffisamment avancées à l'heure actuelle pour être industrialisées dans un avenir proche [9].

## I. 5. Les microalgues

Les microalgues sont des organismes photosynthétiques qui utilisent la lumière du soleil comme source d'énergie pour fixer le dioxyde de carbone. Les lipides accumulés par les

# Chapitre I : Les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération et le biodiesel

microalgues, pouvant atteindre jusqu'à 80 % de leur poids sec, sont principalement des triglycérides. Ces derniers peuvent ensuite être utilisés pour produire du biodiesel via une réaction appelée transestérification [10]. Un des avantages de l'utilisation des microalgues pour la production de biodiesel est leur croissance extrêmement rapide puisque certaines espèces peuvent doubler leur biomasse de une à trois fois en 24 heures [11].

Les algues représentent une grande variété d'espèces photosynthétiques. Elles peuvent être cultivées suivant deux modalités :

- soit en **conditions photoautotrophes** : La lumière solaire sert de source d'énergie et, grâce à la photosynthèse, les algues élaborent leur propre substance à partir des éléments minéraux dissous dans l'eau et le CO<sub>2</sub> ;
- soit en **conditions hétérotrophes** : La matière organique est utilisée par fermentation comme source de carbone et d'énergie. Quelques espèces d'algues peuvent aussi utiliser les molécules de carbone, inorganiques et organiques, de l'environnement et ce processus est appelé **mixotrophie** [12].

**Tableau I.2 : La Teneur et la productivité en lipides de quelques espèces de microalgues [13,14,15].**

Espèces de microalgues	Teneur maximale en lipides (% poids sec)	Productivité en lipides (mg/L/jour)
<b>Chlorella emersonii</b>	28-32	50
<b>Chlorella protothecoides</b>	57,9	1214
<b>Chlorella vulgaris</b>	14-22	40
<b>Neochloris oleoabundans</b>	35-54	90-134
<b>Monodus subterraneus</b>	16	30,4

## **I. 6. Le biodiesel à partir de microalgues**

Le développement des biocarburants comme le bioéthanol, produit à partir du maïs, et le biodiesel, produit à partir de cultures comme le soja, ont toutefois entraîné l'apparition de plusieurs problématiques. En effet, l'essor de ces biocarburants a provoqué une hausse des prix des aliments présentant ainsi de nombreux impacts pour les populations, une utilisation

accrue des terres favorisant la déforestation à travers le monde ainsi qu'une augmentation de la pollution due à l'utilisation d'engrais et de pesticides. C'est donc en lien avec ces constats et la crise énergétique que d'autres efforts ont été fournis dans la recherche de solutions alternatives telles que la production de biodiesel à partir des microalgues.

Ces efforts de recherche se sont d'abord orientés vers la production de biocarburants à partir des microalgues à métabolisme autotrophe. Des résultats intéressants ont été obtenus tout en permettant une production sur des terres infertiles ou délaissées. Pour atteindre une productivité intéressante, ces microalgues doivent bénéficier toutefois d'un rayonnement solaire optimal retrouvé principalement dans la zone équatoriale.

## **I. 7. Avantages des microalgues**

- Les acides gras produits par les algues peuvent être à chaîne moyenne (C10- C14), à longue chaîne (C16-C18) et à très longue chaîne ( $\geq$ C20). Des dérivés d'acides gras sont également produits. Dans les conditions optimales de croissance, les algues synthétisent des acides gras qui constituent environ 5 à 20 % du poids sec de la cellule. Par contre, sous des conditions environnementales défavorables ou de stress, de nombreuses algues modifient leurs voies de biosynthèse des lipides vers la formation et l'accumulation de lipides neutres (20-50 % du poids sec de la cellule), principalement sous la forme de triglycérides [16],
- Les microalgues sont largement et principalement connues comme étant des organismes photo autotrophes,
- Les algues se développent beaucoup plus rapidement que les plantes terrestres et sur des surfaces qui n'entrent pas, ou peu, en compétition avec les surfaces agricoles,
- Différents types d'eau sont utilisables : douce, saumâtre, salée et même des eaux usées,
- La croissance des microalgues pour la production des lipides nécessitant d'importantes quantités de CO<sub>2</sub>, on peut envisager de recycler ainsi le CO<sub>2</sub> émis par des usines ou des centrales thermiques,
- Les microalgues ont une tolérance pour un vaste intervalle de salinité,
- Une surface de culture de microalgues peut produire jusqu'à 10 à 100 fois plus de lipides comparativement aux autres cultures oléagineuses, voire celles de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> générations. En outre, alors qu'un cycle de récolte terrestre prend de 3 mois à 3 ans pour être exploité, les algues commencent à produire des lipides entre 3 à 5 jours de culture, de plus la récolte peut se faire quotidiennement [17].

## I. 8. Cycle de production du biodiesel à partir de microalgues

La production de biocarburants à partir d'algues est divisée en cinq étapes :

- La culture d'algues ,
- La récolte de la biomasse et le séchage ,
- L'extraction de l'huile d'algue ,
- La conversion de l'huile et des résidus ,
- La répartition des bioproduits.

### I. 8.1. La culture d'algues

Industriellement, deux procédés de production des microalgues sont actuellement utilisés :

- Les Bassins à ciel ouvert,
- Les Photobioréacteurs.

#### a. Les étangs (Bassins) à ciel ouvert de type Raceway

Les étangs à ciel ouvert, utilisés pour la culture des microalgues, sont de conception commune, simple et économique. 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. Ces systèmes sont classés selon la source d'eau utilisée : eaux naturelles (lacs, lagunes et étangs) ou eaux usées. Ils sont généralement construits à côté des industries lourdes où il y'a un dégagement de dioxyde de carbone, source de nutrition principale des microalgues autotrophes et des NO<sub>x</sub>. La profondeur optimale de l'étang est de 15-50 cm et ce, afin de permettre facilement l'exposition des cellules à la lumière du soleil [18].

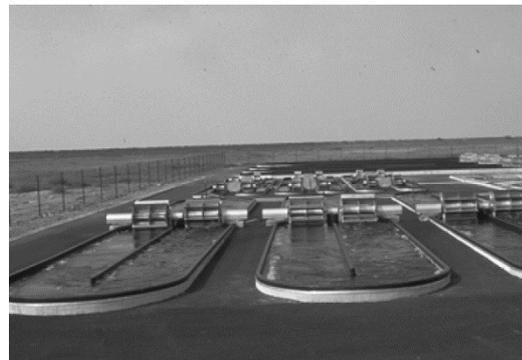
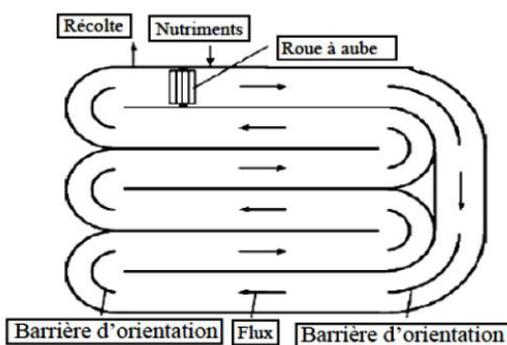
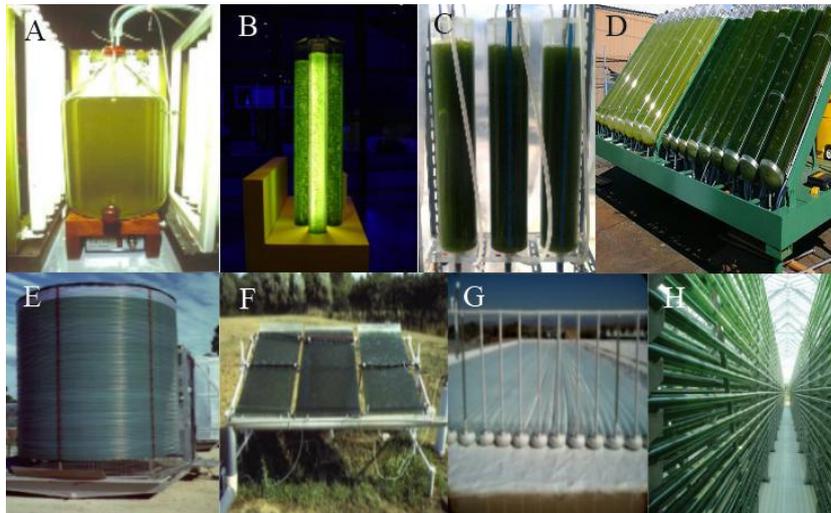


Figure I.2 : Système de culture en extérieur du type Raceway [10] (à droite) et Schéma d'une vue de haut d'un étang ouvert (à gauche) [19].

## b. Les photobioréacteurs

Les photobioréacteurs sont différents types de réservoirs ou systèmes fermés, exposés à la lumière et dans lesquels les algues sont cultivées. Cette technologie a été principalement mise en œuvre pour surmonter certains facteurs limitants dans les systèmes d'étangs ouverts. Dans ce type de réacteurs, les paramètres de croissance d'algues sont contrôlés (pH, intensité lumineuse, température, concentration de dioxyde de carbone) et peuvent être optimisés pour une production maximale de biomasse [18].



**Figure I.3 : Variété des configurations des photobioréacteurs : A Photobioréacteur à cuve agitée – B : Photobioréacteur de type colonne à bulle – C : Air-lift photobioréacteur – D : Photobioréacteur incliné – E : Photobioréacteur hélicoïdal tubulaire – F : photobioréacteur à plaque inclinée – G : Photobioréacteur horizontal commercial en cours de construction – H photobioréacteur tubulaire [20].**

## I. 8.2. La récolte des microalgues

La récolte des microalgues représente un facteur économique important pour la production de biodiesel puisqu'il s'agit d'une étape limitante dans la production de biocarburants. Certaines estimations permettent de conclure que la récolte représente 20 à 30% du coût total de production du biodiesel [10].

Les techniques de récupération de la biomasse peuvent être classées comme récolte primaire ou comme récolte secondaire. La récolte primaire se réfère à la séparation des cellules d'algues de leur milieu de croissance et peut être réalisée par sédimentation ou par floculation. Le produit de la récolte est une bouillie d'algues, avec une teneur totale en solides

comprise entre 0,5 et 6 %. Les systèmes de récolte secondaire servent à épaissir la boue pour obtenir une teneur en solides totaux entre 10 et 20 % en utilisant la centrifugation ou la filtration [21].

### **a. La floculation**

La floculation est utilisée pour agréger les cellules de microalgues dans le but d'augmenter la taille des particules. Elle facilite donc la sédimentation et la centrifugation. En général, le coût d'exploitation de la floculation est faible. Toutefois, ce procédé exige une longue période de traitement qui peut entraîner un risque de décomposition du produit bioréactif [22].

### **b. La sédimentation**

La sédimentation est un procédé peu coûteux qui permet la séparation des cellules d'algues en utilisant les forces de gravitation. Ce processus engendre généralement une boue volumineuse, principalement en raison de la lenteur de la sédimentation. L'efficacité de la sédimentation varie entre 65% et 90% [23] si elle est précédée par une floculation [24].

### **c. La centrifugation**

Pour les petites microalgues, c'est la centrifugation qui est le procédé le plus efficace. La centrifugation est un procédé de séparation qui utilise la force centrifuge pour séparer des solides en suspension dans des liquides. Alors que les systèmes de centrifugation sont très fiables et ont un pourcentage élevé de capture des solides, les coûts d'exploitation et d'entretien sont considérables [22].

## **I. 8.3. Le séchage des microalgues**

Certains procédés demandent la déshydratation de la biomasse ce qui augmente également sa durée de vie et celle du produit final. Plusieurs méthodes ont été employées pour le séchage des microalgues. Ces procédés courants sont le séchage par atomisation, le séchage dans des tambours, la lyophilisation et le séchage au soleil.

Grace au séchage, la concentration de la biomasse passe de 15-25 % au moment de la récolte, à une concentration d'au moins 90%. Par contre, le séchage nécessite beaucoup d'énergie. Quelle que soit la technologie utilisée, l'évaporation de 1 kg d'eau nécessite toujours le besoin d'au moins 800 kilocalories [24]. Il est important de trouver l'équilibre entre l'efficacité et le coût du séchage afin de maximiser le rendement de la stratégie de production de biocarburants à partir d'algues.

## **I. 8.4. L'extraction des lipides**

Il existe trois procédés d'extraction des huiles d'algue : le pressage mécanique, l'extraction par un solvant (hexane le plus souvent) et l'extraction au CO<sub>2</sub> supercritique.

Ces procédés nécessitent de l'énergie et possèdent des rendements différents. Dans le but d'obtenir quasiment 100% de rendement, une combinaison de deux techniques peut être utilisée comme le pressage et l'extraction par solvant [25]. Cependant, de nouvelles approches dans l'extraction des lipides de microalgues sont nécessaires afin que le coût total de production de biodiesel devienne commercialement compétitif [22].

Le tableau I.3 représente les différentes méthodes d'extraction.

**Tableau I.3 : Les différentes méthodes d'extraction avec leurs avantages et leurs inconvénients [26].**

<b>Méthodes d'extraction</b>	<b>Avantages</b>	<b>Limites</b>
<b>Pressage mécanique</b>	-Facile, -Pas d'utilisation de solvant.	-Une grande quantité d'échantillon, -Procédés lents.
<b>Extraction par solvant</b>	-Solvants utilisés peu coûteux avec possibilité de régénération.	-La plupart des solvants organiques sont très inflammables et toxiques, -La régénération du solvant est coûteuse et énergivore, -Un grand volume de solvant est nécessaire.
<b>Extraction par fluide super critique</b>	-Non toxique (absence de solvant organique dans le résidu ou extraits), -Non inflammable et simple en opération.	-Coûteux et utilisé pour des produits de hautes valeurs tels l'alimentation et les cosmétiques.

## I. 8.5. La conversion du biodiesel

La transformation des lipides en biodiesel par transestérification, en une étape, nécessite la déshydratation préalable de la biomasse algale parce que l'eau est un inhibiteur de la réaction. Cette conversion chimique implique la transestérification des triglycérides en biodiesel qui peut se faire en présence d'un catalyseur [27].

Généralement, après l'extraction de l'huile algale et avant sa conversion, une analyse du profil des acides gras dans l'huile est effectuée.

### a. Effet de la teneur en acides gras libres sur la conversion des lipides en biodiesel

Ces molécules, lors de la réaction de transestérification, forment des réactions secondaires indésirables (saponification). En effet, les AGL vont réagir avec la base forte utilisée comme catalyseur (NaOH ou KOH) dont le résultat est la formation d'un sel de carboxylate : le savon (figure I.4).

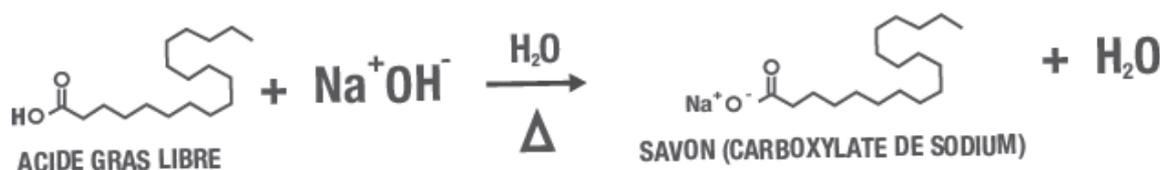


Figure I.4 : Réaction de saponification des acides gras [28].

La réaction compétitive de saponification réduit l'efficacité de production de biodiesel. Pour empêcher la perte de rendement de biodiesel due à la réaction de saponification, l'alcool doit être sec et l'huile doit avoir une quantité minimum d'acides gras libres. Le biodiesel est finalement récupéré par le lavage répété à l'eau pour enlever le glycérol, le savon et l'excès de méthanol [28].

## Conclusion

La filière de production du biodiesel à partir de microalgues est très promotrice sur le plan d'étude. Toutefois, pour mieux comprendre le système de production et connaître ces impacts environnementaux, il est nécessaire d'avoir recours à une analyse détaillée de son cycle de production. Pour cela une analyse de cycle de vie sera effectuée.

# *Chapitre II*

## *Démarche de l'analyse du cycle de vie*

### **Introduction**

L'ACV est considérée comme un outil d'aide à la décision dont les résultats permettent de comparer deux solutions ou produits. Elle peut être utilisée pour des besoins d'écoconception, d'affichage environnemental, ou encore d'orientation des politiques publiques : choix de filières de valorisation de déchets, critères d'écolabellisation des produits ou encore comparaison des agrocarburants avec les carburants fossiles.

Dans ce chapitre nous essayerons de répondre aux questions suivantes : Qu'est-ce qu'une ACV ? Comment se fait une démarche ACV ? Quel est l'intérêt et quelles sont les applications d'une ACV ?

### II.1. Définition de l'ACV

L'ACV permet de quantifier les impacts d'un « produit » (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service voire d'un procédé), depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation, soit « du berceau à la tombe » [29].

L'enjeu majeur de l'utilisation de l'ACV est d'identifier les principales sources d'impacts environnementaux et d'éviter, le cas échéant, d'arbitrer les déplacements de pollutions liés aux différentes alternatives envisagées.

Selon l'ISO, il s'agit de la compilation et de l'évaluation des consommations d'énergie, des utilisations de matières premières et des rejets dans l'environnement, ainsi que de l'évaluation de l'impact potentiel sur l'environnement associé à un produit, à un procédé ou à un service, sur la totalité de son cycle de vie". Le cycle de vie d'un produit, procédé ou service, rassemble les phases de fabrication, de transformation, d'utilisation et de destruction. La figure II.1 illustre les différentes étapes d'une ACV.

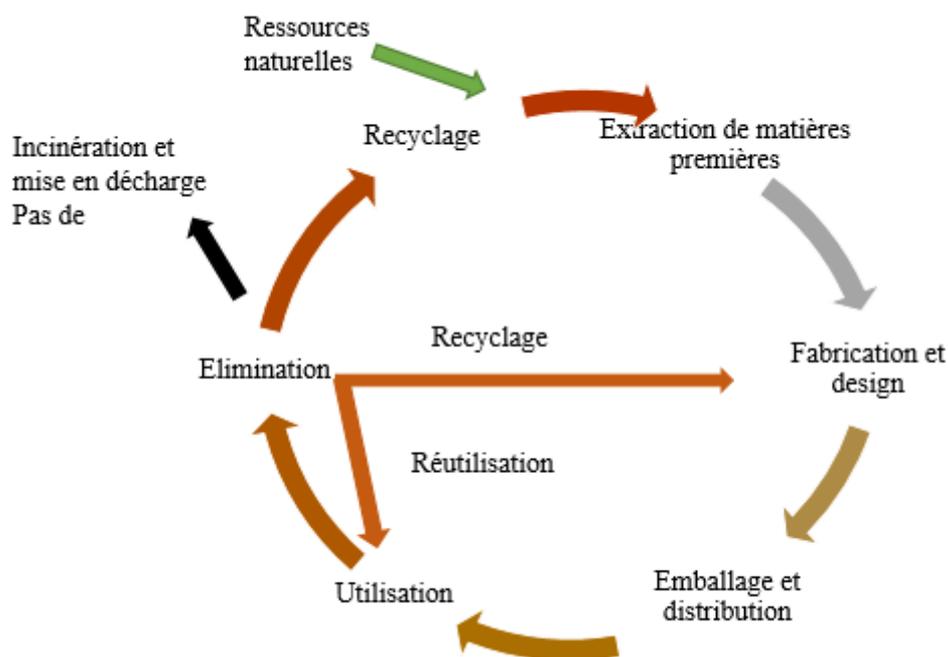


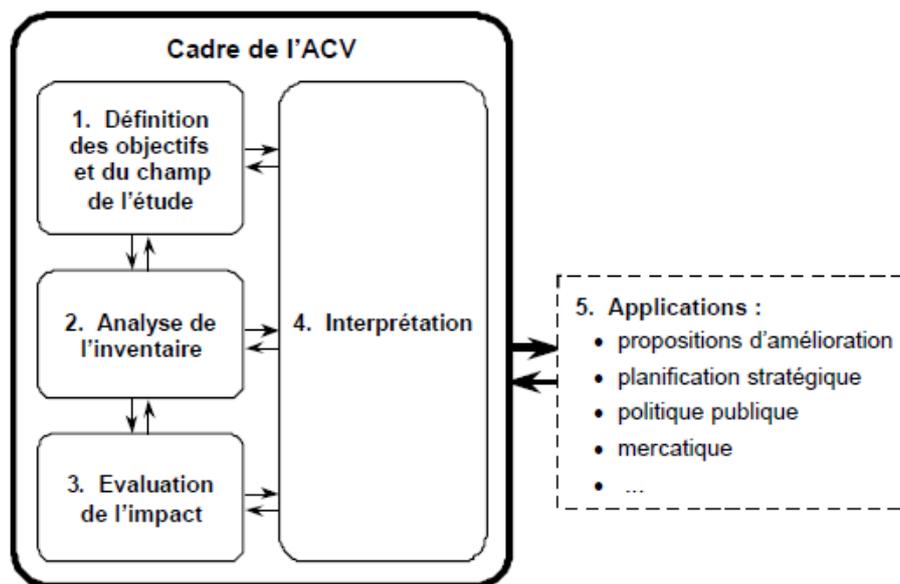
Figure II.1 : Schéma descriptif des étapes d'une ACV.

### II.2. Les étapes de l'analyse du cycle de vie

Cette méthode repose sur une démarche en 4 étapes [30] :

- **Étape 1** : Définition des objectifs et du champ de l'étude,
- **Étape 2** : Inventaire des flux matière et énergie associés aux étapes du cycle de vie rapporté à l'unité fonctionnelle retenue.
- **Étape 3** : Evaluation des impacts potentiels à partir des flux matière et énergie recensés,
- **Étape 4** : Interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs retenus : cette étape est itérative avec les 3 précédentes de manière à toujours valider les résultats obtenus qui permettent de répondre aux objectifs de l'étude (par exemple, il arrive que la non disponibilité de certaines données puisse conduire, en cours d'étude, à restreindre le champ de l'étude). C'est également ici que l'on tentera d'évaluer la robustesse des résultats.

Ces phases ne constituent pas seulement une succession de séquences, mais il s'agit également d'un processus itératif comme présenté sur la figure II.2.



*(rq : les applications ne rentrent pas dans le champ d'application des normes)*

**Figure II.2 : Schéma descriptif des phases de l'analyse du cycle de vie [29].**

### **II.3. L'ACV normalisée (série ISO 14040)**

Initialement les bases méthodologiques de l'ACV ont été posées par la SETAC. Aujourd'hui, l'ACV est définie par les normes internationales ISO 14040 (1997) à 14044 (2006), qui spécifient le cadre, les principes généraux ainsi que les exigences pour la réalisation d'ACV, et la communication relative à ces études.

Elle constitue encore aujourd'hui l'instance de référence pour de nouveaux développements. C'est donc une sorte d'enceinte de réflexions R&D, en amont de la normalisation internationale ISO.

- La Norme ISO 14040 : « Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadres » décrit les caractéristiques essentielles de l'ACV et les bonnes pratiques de conduite d'une telle étude et rend obligatoire la déclaration de la procédure utilisée et de la mise à disposition du public d'un rapport complet sur les résultats de l'étude,

- La Norme ISO 14041 couvre les deux premières phases de l'ACV (objectifs, champs de l'étude et inventaire),

- La Norme ISO 14042 décrit les lignes directrices de la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie,

- La Norme ISO 14043 spécifie les exigences et les recommandations en vue de l'analyse des résultats de l'inventaire et de l'évaluation de l'impact du cycle de vie,

- La Norme ISO 14044 couvre l'évaluation du cycle de vie (ACV) des études et de l'inventaire du cycle de vie (ICV) études [31].

### **II.4. Applications de l'ACV**

Une ACV permet de comprendre quels sont les étapes et les aspects environnementaux clés. Selon son importance, nous pouvons distinguer différentes applications [32] :

- La réduction de l'impact environnemental en prenant en compte de l'environnement dès l'étape de conception d'un nouveau produit ,
- L'élaboration des stratégies de marketing en améliorant la position de marché de certains produits en mettant en avant les avantages environnementaux associés à leurs produits ,
- La diffusion de l'information aux responsables de la prise de décision tant aux privés qu'aux gouvernements ,

## Chapitre II : Démarche de l'analyse du cycle de vie

- La sélection (le choix) du produit ou du procédé le plus respectueux de l'environnement parmi plusieurs solutions proposées (en comparant leurs cycles de vie) ,
- La proposition de réglementations concernant l'environnement par comparaison d'ACV de plusieurs procédés rendant le même service ,
- L'évaluation de plusieurs scénarios alternatifs ,
- L'identification des risques énergétiques et environnementaux.

### **II. 5. Les étapes de la méthodologie normalisée de l'ACV**

#### **II. 5.1. Définition des objectifs et du champ de l'ACV**

La définition des objectifs et du système « champ de l'étude de l'ACV » est la première phase de l'ACV. Elle peut paraître triviale, mais elle est de fait essentielle pour la qualité de l'étude. Cette phase détermine une série d'éléments cruciaux : la fonction du système, l'unité fonctionnelle à laquelle les émissions seront ensuite rapportées. Elle définit également les limites du système considéré. C'est aussi dans cette étape que les scénarios de base et les alternatives à étudier sont définis en détail [29].

##### **a. Définition de l'objectif de l'étude**

Comme l'explique la norme ISO 14040, la définition des objectifs d'une ACV doit indiquer, sans ambiguïté, les éléments suivants :

- l'application envisagée ,
- l'application conduisant à réaliser l'étude,
- le public concerné, c'est-à-dire les personnes auxquelles il est envisagé de communiquer les résultats de l'étude ,
- l'utilisation des résultats dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public.

##### **b. Définition du champ de l'étude**

La définition du champ de l'étude d'une ACV doit prendre en compte les éléments suivants et les décrire clairement comme l'explique la norme ISO 14040 :

- Le système de produits à étudier ,
- Les fonctions du système ou des systèmes dans le cas d'études comparatives,
- L'unité fonctionnelle,
- La frontière du système,
- Les règles d'affectation,
- La méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impact,

## Chapitre II : Démarche de l'analyse du cycle de vie

- L'interprétation à utiliser,
- Les exigences portant sur les données,
- Les hypothèses,
- Les choix de valeurs et les éléments facultatifs,
- Les exigences de qualité des données,
- Le type de revue critique, le cas échéant,
- Le type et le format du rapport spécifié pour l'étude.

### **c. Définition de la fonction du système**

La fonction du produit ou du système étudié doit être clairement définie car elle sert de base pour déterminer deux éléments essentiels de l'ACV : l'unité fonctionnelle et les limites du système. Afin de conserver une approche critique vis-à-vis d'une application, il est très profitable de réfléchir à la fonction avant d'avoir défini l'unité fonctionnelle ou les limites du système.

Il n'est pas toujours facile de cerner la fonction exacte d'un système car un seul produit peut avoir une fonction multiple. Dans ce cas, on distinguera entre fonction principale et fonction secondaire. La fonction principale doit être, par définition, commune aux différentes alternatives [29].

### **d. Définition de l'unité fonctionnelle et flux de référence**

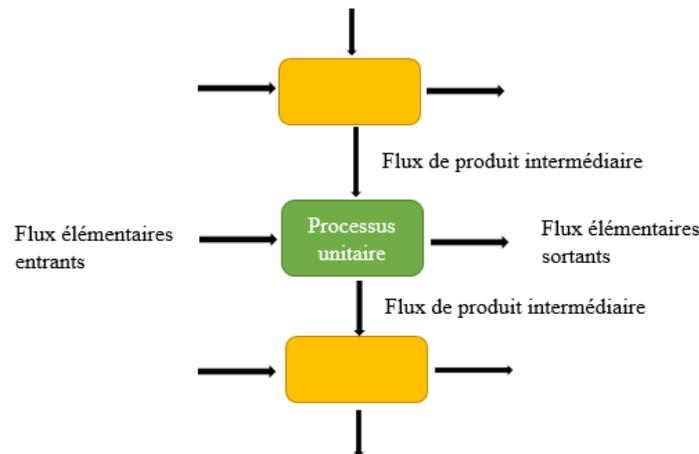
Une fois la fonction du système définie, l'unité fonctionnelle peut être dérivée. Cette unité est la grandeur quantifiant la fonction du système sur la base de laquelle les scénarios sont comparés. Son rôle est d'offrir une référence à laquelle tous les flux de l'inventaire sont rapportés. Par conséquent, l'unité fonctionnelle est la même dans les différents scénarios. C'est une grandeur, définie en cohérence avec les objectifs de l'étude, qui doit être mesurable et additive et elle n'est donc pas un rapport : l'impact de deux unités fonctionnelles doit être le double de l'impact d'une unité fonctionnelle [29].

Selon la norme ISO 14044 [2006], l'unité fonctionnelle est la performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une ACV.

Pour une unité fonctionnelle donnée, on mesure pour chaque scénario les flux de référence, c'est-à-dire les quantités de produits nécessaires et achetées pour remplir cette fonction. Ces flux doivent être quantifiés et peuvent varier d'un scénario à l'autre. Sur la base des flux de référence, il deviendra possible de faire l'inventaire des flux entrants (inputs) et des flux sortants (outputs) du système nécessaires à la réalisation de la fonction (ISO 14040).

### e. Définition du système

Un système est plus que la somme de tous ses éléments, il doit être considéré dans sa totalité, dans sa complexité et dans sa dynamique. Bien définir le système revient à déterminer l'ensemble des processus unitaires requis à l'accomplissement de sa fonction. Les processus unitaires sont associés entre eux par des flux intermédiaires et reliés à l'environnement par des flux élémentaires comme le schématise la figure II.3 [33].



**Figure II.3 : Exemple d'un ensemble de processus dans un système (ISO 14041).**

### f. Définition des limites du système

Les limites du système déterminent la portée de l'enquête, les processus unitaires qui seront inclus dans l'ACV et d'autres qui seront exclus. Il est important de préciser les critères de cette décision. A ce stade, il convient de définir l'horizon temporel et géographique.

Selon la Norme ISO 14044, la frontière du système est l'ensemble de critères qui spécifient quels processus élémentaires font partie du système de produits [29].

Plusieurs facteurs déterminent les limites du système tels que l'application envisagée de l'étude, les hypothèses émises, les critères d'exclusion, la qualité des données, le public et des contraintes économiques. En s'appuyant sur la définition donnée pour l'unité fonctionnelle, plusieurs types de frontières peuvent être fixés :

- Frontière temporelle : la durée de vie considérée ,
- Frontière géographique : par exemple la production des matières premières peut être faite en des lieux différents ,
- Frontière technologique.

### II. 5.2. Inventaire des émissions et des extractions

L'inventaire des flux élémentaires ou inventaire des extractions et des émissions est la description quantitative des flux de matière, d'énergie et de polluants qui traversent les limites du système. Il regroupe donc les quantités de substances polluantes émises ainsi que les ressources extraites (minerais, vecteurs énergétiques, surfaces de sol) au cours du cycle de vie du produit ou du service analysé [29].

### II. 5.3. Evaluation de l'impact du cycle de vie

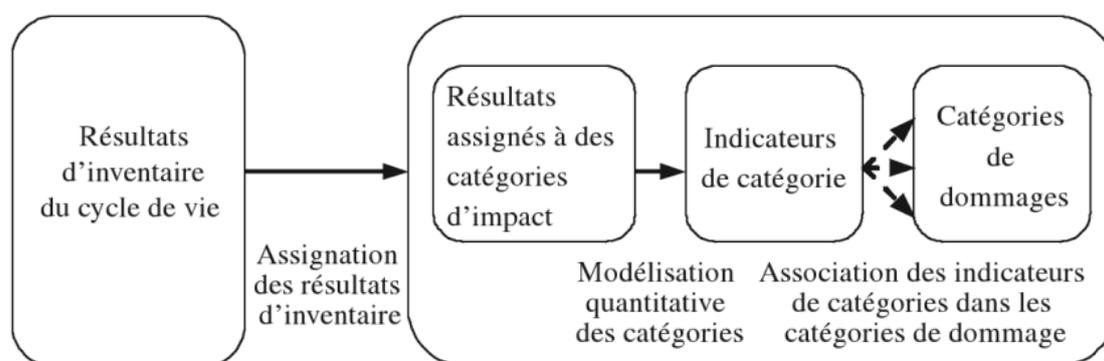
L'évaluation des impacts du cycle de vie vise à transformer un inventaire de flux en une série d'impacts potentiels clairement identifiables. Par rapport au système de produits analysé, les résultats de cette étape peuvent servir pour :

- Identifier et aider à classer les opportunités d'amélioration,
- Caractériser la performance environnementale du produit,
- Le comparer à d'autres systèmes de produits ayant la même fonction,
- Indiquer les points environnementaux nécessitant une action éventuelle (peut-être l'éco-conception ou la ré-conception du produit).

L'évaluation des impacts s'appuie sur l'Unité Fonctionnelle. Elle prend, comme données d'entrée, l'analyse de l'Inventaire du Cycle de Vie.

Les méthodes d'analyse de l'impact vont modéliser les voies d'impact des différentes substances et relier, autant que possible, chaque donnée d'inventaire à ses dommages environnementaux potentiels [29].

De manière schématique, la démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions correspond à l'illustration de la figure II.4. Le tableau II.1 montre les principaux contributeurs aux catégories d'impact.



**Figure II.4 : Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions [31].**

**Tableau II.1 : Principaux contributeurs aux catégories d'impact [29].**

Catégories d'impact	Principales substances ou espèces chimiques recensées
Épuisement des ressources abiotiques	Ressources minérales et fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole)
Changement climatique	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, CFC, HCFC
Diminution d'ozone stratosphérique	CFC, H CFC, Halon
Toxicité humaine	Nombreux composés chimiques (dont notamment NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , CO, HAP, COV, métaux lourds), pesticides, particules
Écotoxicité	
Formation de photo-oxydants	COV, NO <sub>x</sub>
Acidification	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , HCl, HF
Eutrophisation	Composés azotés (dont NO <sub>x</sub> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) et phosphorés (dont P0 <sub>4</sub> <sup>3+</sup> )
Impact des radiations ionisantes	Ensemble des isotopes radioactifs

### II. 5.4. Interprétation

L'interprétation est la dernière phase de l'Analyse du Cycle de Vie. Durant cette étape, les résultats de l'inventaire et de l'évaluation de l'impact du cycle de vie (ACVI) sont combinés. Le but est de vérifier la cohérence des résultats avec les objectifs et le champ de l'étude et de conclure en expliquant les limites et en fournissant des recommandations [29].

La phase d'interprétation du cycle de vie d'une étude type Analyse du Cycle de Vie comprend plusieurs éléments :

- L'identification des enjeux significatifs,
- La vérification par des contrôles de complétude, de sensibilité et de cohérence,
- Des conclusions, limitations et recommandations.

### Conclusion

La méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie ne couvre pas l'ensemble de la problématique environnementale, seuls les aspects quantitatifs (mesurables) et extensifs (sommables) sont pris en compte. Des aspects comme : l'impact des activités sur les paysages, le bruit, les odeurs, le temps, la toxicité des produits émis (incertitudes importantes), ne sont pas considérés de façon directe dans les ACV, selon la méthodologie actuellement en vigueur. C'est pourquoi, l'ACV se heurte encore souvent avec des personnalités réticentes au changement, qui évoqueront le manque de données disponibles ou le fait qu'on parle d'impacts potentiels afin de justifier la non application des nouveaux concepts sur lesquels l'Analyse du Cycle de Vie est fondée qui sont la vision "cycle de vie" et "multi-critères".

# *Chapitre III*

## *Culture des microalgues et traitement des eaux usées*

### **Introduction**

La pollution des eaux d'une réserve naturelle (superficielle ou profonde) a pour conséquence la perturbation, à plus ou moins longue échéance, de l'équilibre biologique de cette eau, ce qui la rendra susceptible de provoquer des dommages ou des désordres. C'est pourquoi, aujourd'hui, on a recours au traitement des eaux usées. Cependant, le traitement de ces eaux nécessite des étapes physico-chimique et biologique pour dégrader la matière organique et éliminer les polluants chimiques à l'aide des microorganismes tel que les microalgues. Cela dit, des chercheurs ont étudié la possibilité d'exploiter ces microalgues après l'étape de traitement pour la production des biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération afin de minimiser les coûts de cette filière.

Alors, quelles sont les conditions de culture des microalgues ? Et comment peut-on associer le traitement des eaux usées domestiques avec la culture des microalgues pour la production du biodiesel ?

### III. 1. Procédé de traitement des eaux usées urbaines

Les étapes classiques du traitement des eaux usées domestiques sont [34] :

- Le prétraitement qui comprend le dégrillage, le dessablage et le déshuilage,
- Le traitement biologique,
- Le traitement tertiaire,
- La clarification.

La figure III.1 donne une vue globale d'une unité de traitement des eaux usées urbaines.

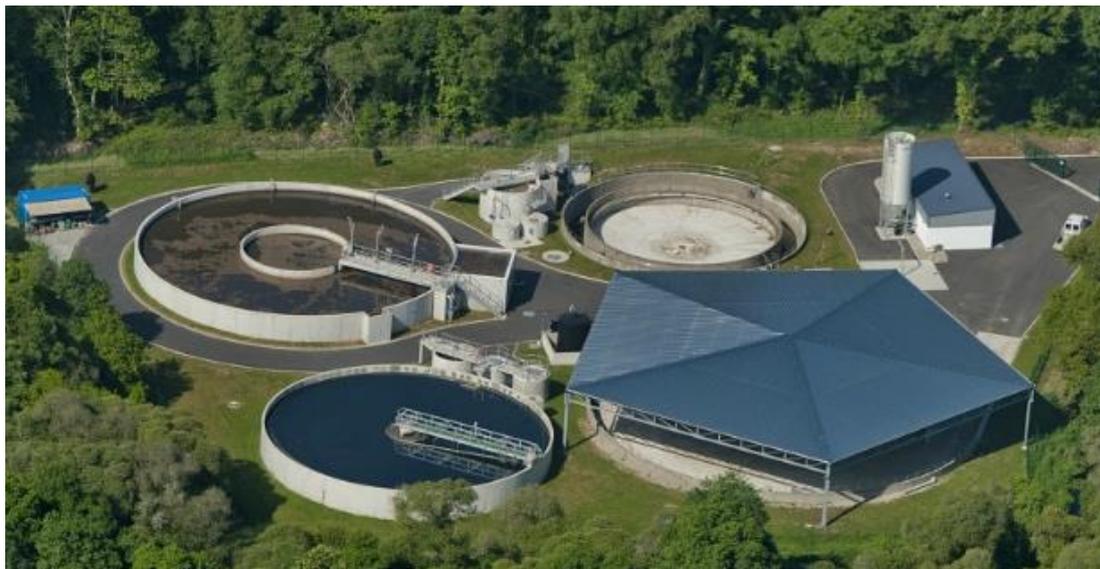


Figure III.1 : Station d'épuration des eaux usées [35].

#### III. 1.1. Le prétraitement des eaux usées domestiques

Tout traitement de dépollution doit comporter, ce qu'il est convenu d'appeler, un prétraitement qui consiste en un certain nombre d'opérations mécaniques ou physiques destinées à extraire le maximum d'éléments dont la nature et la dimension constitueraient une gêne ultérieurement. Ces opérations sont : le dégrillage, le dessablage et le déshuilage.

- Le dégrillage : L'eau brute passe à travers des grilles composées de barreaux placés verticalement ou inclinés de 60 à 80° sur l'horizontale. L'espacement des barreaux varie de 6 à 100 mm. Les matériaux de dégrillage constituent un produit gênant qui est composté ou évacué par camions.

- Le dessablage : Il s'effectue sur des particules de dimensions supérieures à 200 mm. Les sables et graviers se déposent au fond de bassins conçus à cet effet et sont ensuite évacués.

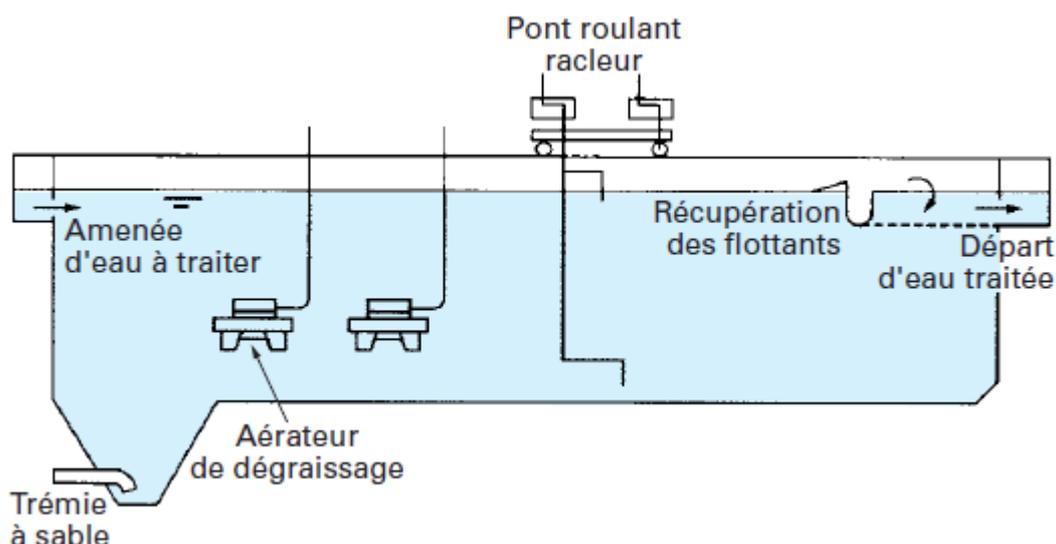
- Le déshuilage : Le déshuilage-dégraissage se rapporte à l'extraction de toutes les matières flottantes d'une densité inférieure à celle de l'eau. Ces matières sont de natures

### Chapitre III : Culture des microalgues et traitement des eaux usées

très diverses et leurs quantités s'estime par la mesure des « matières extractibles par solvants ». La teneur des eaux usées en matières extractibles est de l'ordre de 30 à 75 mg/L. Les huiles et graisses, lorsqu'elles ne sont pas émulsionnées, sont séparées sous forme de boues flottantes dans des ouvrages comportant une zone d'aération où les bulles d'air augmentent la vitesse de montée des particules grasses et une zone de tranquillisation où s'effectue la récupération. Le temps de séjour dans ce type d'ouvrage est de 5 à 12 min. Le débit d'air insufflé est de l'ordre de 0,2 m<sup>3</sup> par mètre cube d'eau et par heure.

Le plus souvent, les fonctions de dessablage et de déshuilage sont combinées dans un même ouvrage qui met en œuvre les principes de fonctionnement cités précédemment (figure III.2).

Parfois, afin d'enlever plus de la moitié des matières en suspension, le prétraitement est suivi par une décantation.



**Figure III.2 : Schéma d'ouvrage de dessablage-déshuilage combinés [34].**

La décantation dite primaire permet d'éliminer environ 70% des matières en suspension. Celles-ci se déposent au fond du bassin : ce sont les boues primaires. Elles sont ensuite récupérées par raclage du fond du bassin, puis envoyées dans des épaisseurs. Les performances de la décantation peuvent être améliorées par l'adjonction de réactifs chimiques, qui permet, après coagulation et floculation, de capter jusqu'à 90% des matières en suspension [34].

### **III. 1.2. Le traitement biologique**

L'épuration biologique a pour but d'éliminer la matière polluante biodégradable contenue dans l'eau domestique (décantée ou non) en la transformant en matières en suspension : micro-organismes et leurs déchets, plus facilement récupérables.

La dégradation peut se réaliser par voie aérobie (en présence d'oxygène) ou anaérobie (en l'absence d'oxygène). Dans ce dernier cas, les réactions s'effectuent à l'abri de l'air, le carbone organique, après dégradation, se retrouve sous forme de CO<sub>2</sub>, méthane et biomasse. Ce type de traitement appelé « digestion anaérobie » n'est utilisé que pour des effluents très concentrés en pollution carbonée, de type industriel [34].

L'élimination biologique de l'azote se réalise en deux étapes qui sont chronologiquement la nitrification et la dénitrification. La nitrification consiste en l'oxydation de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> par l'intermédiaire de deux espèces de bactéries autotrophes. La dénitrification consiste en la réduction des nitrates formés en azote gazeux par des bactéries hétérotrophes placées dans un milieu pauvre en oxygène. Le principe de la déphosphatation biologique consiste en une suraccumulation de phosphore dans une biomasse [34].

### **III. 1.3. Le traitement tertiaire**

Ce traitement est employé lorsque certains constituants d'eaux usées ne peuvent être éliminés. Pour cela, des procédés de traitement individuels sont nécessaires pour éliminer l'azote, le phosphore, les solides en suspension qui restent, les matières organiques réfractaires, les métaux lourds et les solides dissous.

Ce traitement est toutefois coûteux et nécessite un appareillage spécifique, l'utilisation de produits chimiques et beaucoup d'énergie.

### **III. 1.4. La clarification**

Cette étape permet de séparer, par décantation, l'eau dépolluée et les boues ou résidus secondaires issus de la dégradation des matières organiques. Cette décantation est opérée dans des bassins spéciaux, les "clarificateurs".

L'eau, dans la plupart des cas, peut alors être rendue au milieu naturel, dans une rivière, à la mer ou à l'océan [35].

### **III. 2. Conditions de culture des microalgues**

Plusieurs facteurs influencent la croissance des algues [36] :

- les facteurs abiotiques tels que la lumière (qualité, quantité), la température, la concentration en nutriments (Azote et phosphore), en O<sub>2</sub> et en CO<sub>2</sub>, le pH, la salinité, et la présence de produits chimiques toxiques,
- les facteurs biotiques comme les agents pathogènes (bactéries, champignons, virus) et la concurrence d'autres algues,
- les facteurs opérationnels tels que le cisaillement produit par le mélange du milieu de culture, le taux de dilution, la profondeur, la fréquence de récolte et l'ajout de bicarbonate.

#### **III. 2.1. La lumière**

Comme tout organisme photosynthétique, une microalgue trouve sa source d'énergie dans la lumière. Celle-ci a une influence notable sur la composition de la biomasse produite et sur la vitesse de croissance. En absence de lumière, il n'y aura pas de production de matière organique et un excès de l'intensité lumineuse provoque un phénomène de saturation des systèmes photosynthétiques ou une photo inhibition. Les meilleures vitesses de photosynthèse vont s'obtenir avec une alternance de périodes de lumière et d'ombre [37]. Les réactions photochimiques de la photosynthèse vont permettre la réduction du CO<sub>2</sub> et la formation de glucides. Ce recyclage est réalisé grâce au cycle de Calvin Benson.

#### **III. 2.2. L'agitation**

L'homogénéité du milieu de culture représente un point fondamental afin d'assurer une productivité optimale de biomasse et une capacité importante de fixation de CO<sub>2</sub>. En effet, une faible agitation entraîne une difficulté d'accès aux nutriments et à la lumière, des phénomènes de décantation de la biomasse et la création de zones « stagnantes » au sein desquelles les conditions de cultures sont défavorables pouvant conduire à une mortalité cellulaire à travers l'accumulation de produits toxiques. D'autre part, une agitation trop élevée conduit à un cisaillement des cellules algales qui engendre des déficiences physiologiques et métaboliques ainsi que des dommages structuraux. En conséquence, le choix d'un système d'agitation adapté doit répondre à un compromis entre ces deux types de contrainte [20].

### **III. 2.3. Le CO<sub>2</sub> et le pH**

Le CO<sub>2</sub> est un facteur important et limitant de la photosynthèse. Pour les microalgues, une concentration de CO<sub>2</sub> de 1 à 5% en volume donne une efficacité maximum. Une grande quantité de CO<sub>2</sub> permet d'améliorer l'efficacité de la photosynthèse et donc d'obtenir une grande quantité de biomasse. L'ajout de NaHCO<sub>3</sub> au milieu de culture permet non seulement d'apporter du CO<sub>2</sub> pour augmenter la productivité mais aussi de contrôler le pH du milieu (agent tampon) [38].

La gamme de pH toléré par les microalgues se situe entre 7 et 9 avec un optimum généralement compris entre 8,2 et 8,7 [39,40]. Néanmoins, il existe quelques espèces qui prospèrent bien dans des milieux acides ou basiques. La défaillance d'une culture peut être due à un problème de non maintenance d'un pH acceptable. Le maintien du pH se fait par l'aération de la culture. Dans le cas d'une densité cellulaire élevée, l'addition de CO<sub>2</sub> permet de rectifier le pH qui pourrait atteindre une valeur de 9 durant la croissance de la culture [41].

### **III. 2.4. La température**

Après la lumière, la température est le facteur limitant le plus important pour la culture des algues. Beaucoup de microalgues peuvent facilement supporter des températures allant jusqu'à 15°C en dessous de leur température optimale, mais la hausse de la température de seulement 2 à 4 °C au-dessus de leur température optimale peut entraîner la perte totale de la culture [22].

### **III. 2.5. Les nutriments**

#### **a. Source d'azote**

L'azote est un élément essentiel des protéines de structure et de fonctionnement, c'est l'élément le plus important après le carbone. Le taux de croissance des microalgues est à peu près identique selon les sources d'azote utilisées (urée, nitrate de sodium ou de potassium ou le nitrate d'ammonium) [42].

#### **b. Source de phosphore**

La carence en phosphore ressemble beaucoup à celle en azote. La teneur initiale en cet élément modifie la phase exponentielle de croissance et influence la biomasse obtenue en fin de culture. La croissance cellulaire se voit limitée à des concentrations égales ou inférieures à 30 mg/L [43].

### III. 3. La *Chlorella Vulgaris*

*Chlorella vulgaris* est une microalgue du genre chlorelle (figure III.1). Elle peut vivre dans les eaux douces, les eaux salées ou aussi les eaux usées. Chlorella a longtemps été utilisée comme organisme modèle pour comprendre la photosynthèse et l'assimilation du carbone dans les microorganismes. Elle possède les avantages suivants [38] :

- Un simple cycle de vie ,
- Un taux de croissance élevé ,
- Une teneur en protéines élevée ,
- Un taux élevé en minéraux et vitamines ,
- Une teneur en lipide élevée jusqu'à 50% et principalement des triglycérides sous des conditions de stress.



**Figure III.3 : Vue microscopique d'une colonie de *Chlorella Vulgaris* [44].**

Le tableau III.1 représente la fiche d'identité d'une microalgue de souche *Chlorella Vulgaris*.

**Tableau III.1 : Fiche d'identité de la *Chlorella vulgaris* [45].**

La souche d'algue	<i>Chlorella vulgaris</i>
Composition élémentaire de la biomasse	$C_{106}H_{181}O_{45}N_{16}P$
Diamètre	entre 2 à 10 $\mu m$
Productivité	Entre 15 et 25 g /m <sup>2</sup> / j
Pourcentage des lipides contenu dans la biomasse sèche	18% *
Densité	920 kg/ m <sup>3</sup> (146,268 kg-oil /j)
Rendement d'huile qui peut être extraite	58% *
Température optimale	Entre 25 et 30 °C

\*Estimation par rapport aux données locales.

### **III. 4. L'utilisation des microalgues pour le traitement des eaux usées**

Les microalgues sont utilisées depuis des décennies pour le traitement des eaux usées dans le cadre du lagunage. L'optique actuelle est de dépolluer en transformant les déchets en produits valorisables, comme les biocarburants ou la biomasse pour produire du biogaz.

De nombreuses espèces de microalgues peuvent être cultivées dans les conditions difficiles (toxicité, pH, métaux lourds...) des eaux usées par le biais de leur capacité à utiliser le carbone organique, l'azote et le phosphore présents dans le milieu. L'utilisation des microalgues pour le traitement des eaux usées a été depuis longtemps revendiquée par Oswald et al, et ce, depuis 1957. Cependant, le traitement chimique des déchets ou la génération des boues activées est le procédé de traitement conventionnel.

Bien que l'application de microalgues reste encore assez limitée, les algues sont utilisées, dans le monde entier, pour le traitement des eaux usées mais à une échelle relativement faible. C'est soit par l'oxydation classique dans des étangs de stabilisation ou bien dans des systèmes plus développés dits HRAP (High Rate Algal Ponds) qui se sont révélés être très efficaces pour le traitement des eaux usées.

Une exigence majeure du traitement des eaux usées est la nécessité d'éliminer des concentrations élevées en substances nutritives, en particulier N et P dont la présence peut entraîner des risques d'eutrophisation si elles s'accumulent dans les rivières et les lacs.

Le phosphore est particulièrement difficile à enlever des eaux usées. Pour la plupart des traitements d'eaux usées commerciales, le phosphore est précipité avec l'utilisation de produits chimiques pour former une fraction solide insoluble, ou il est par la suite transformé en une boue activée par l'activité microbienne. Cependant, le phosphore récupéré par ces méthodes n'est pas entièrement recyclable.

Les microalgues sont efficaces pour éliminer l'azote, le phosphore et les métaux toxiques des eaux usées. Elles ont le potentiel de jouer un rôle important d'assainissement particulier lors du traitement et surtout dans la phase tertiaire.

L'avantage significatif dans le traitement des eaux usées par les microalgues, par rapport au procédé classique à base de produits chimiques et aux méthodes conventionnelles, est le gain en termes de coût et d'énergie due à la technologie de niveau inférieur qui est utilisée, rendant cette approche plus attrayante pour les pays en voie de développement [46].

### **III. 5. Culture des microalgues dans les eaux usées urbaines**

#### **III. 5.1. Les bassins de traitement des eaux usées**

Les bassins de traitement des eaux usées reposent sur la capacité des algues à exploiter l'énergie lumineuse pour fournir de l'oxygène aux bactéries aérobiques dont le rôle est de dégrader la matière organique présente dans le milieu. Les autres nutriments des microalgues présents dans les eaux usées et libérés par les bactéries sont, à leur tour, assimilés par la biomasse algale.

Cependant, les bassins de traitement classique, de profondeur de 1m, non agité et largement utilisés dans le monde, ne fournissent pas systématiquement un niveau élevé d'élimination des nutriments et ont une très faible productivité d'algues [47].

#### **III. 5.2. Chenal algal à haut rendement**

Les chenaux algaux à haut rendement ou en anglais « high rate algal ponds » sont des bassins agités, peu profonds et ouverts de type Raceway. Ils ont été développés à la fin des années 1950 pour le traitement des eaux usées par Oswald et ces collègues de l'Université de Californie à Berkeley.

Les CAHR utilisés, de par le monde, pour le traitement des eaux usées ont révélé une grande efficacité pour traiter une variété de déchets agricoles et industriels.

Les CAHR sont également utilisés, par la majorité des fermes d'algues, pour une production à grande valeurs soit comme compléments alimentaires, composés pharmaceutique, produits cosmétiques ou comme produits chimiques.

Les chenaux algaux à haut rendement se caractérisent aussi par un faible coût comparativement aux photobioréacteurs fermés. Cependant, par rapport au prix courant des combustibles fossiles, il est peu probable qu'ils soient utilisés pour la production de biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération sans la production de coproduits hautement valorisables tel que le traitement des eaux usées [47].

#### **III. 5.3. Culture des microalgues et traitement des eaux usées dans les CAHR**

Les chenaux algaux à haut rendement (figure III.4), utilisés dans le traitement des eaux usées domestiques en Nouvelle Zélande, ont donné des rendements d'algues d'environ 0,2 tonnes/ML d'eaux usées et une productivité annuelle de 30 tonnes/ha/an. Cependant, la production d'algues dans ces étangs est limitée par le faible rapport carbone/azote des eaux usées domestiques estimé à 4/1 au lieu d'être entre 10/1 et 5/1 [47].

### Chapitre III : Culture des microalgues et traitement des eaux usées

Donc, les eaux usées domestiques ne contiennent pas suffisamment de carbone pour l'assimilation d'azote par les microalgues. C'est pourquoi, l'addition de  $\text{CO}_2$  dans les CAHR, pour traiter les eaux usées, serait nécessaire pour augmenter le taux de carbone et par conséquent améliorer la production d'algues et l'efficacité d'élimination des nutriments. De plus par l'ajout du  $\text{CO}_2$ , il a été constaté que la productivité des microalgues a doublé. De nos jours l'ajout du  $\text{CO}_2$  est pratiqué dans toutes les fermes d'algues commerciales comme le montre la figure III.5 [47].



**Figure III.4 : Traitement des eaux usées dans les CAHR fonctionnant à St Helena (a) et Hilmer (b) en Californie [47].**



**Figure III.5 : L'un des quatre procédés de traitements des eaux usées dans les CAHR (1,25 ha) avec addition du  $\text{CO}_2$  à Christchurch, Nouvelle-Zélande [47].**

### Chapitre III : Culture des microalgues et traitement des eaux usées

Le taux d'assimilation des nutriments azote et phosphore par les microalgues peut atteindre 24kg.N/ha/jour et 3kg.P/ha/jour, avec un taux de productivité maximale de 30g/m<sup>2</sup>/jour de microalgues (poids sec) [47].

## **Conclusion**

L'optique actuelle de l'utilisation des microalgues pour dépolluer les eaux usées en transformant les déchets en produits valorisables, comme les biocarburants ou la biomasse pour produire du biogaz, est une voie très prometteuse. Pour ce faire, des cultures mixtes contenant, entre autres, des microalgues et bactéries, sont mises en œuvre dans des CAHR, chenaux algaux à haut rendement (High rate algal ponds), tout en essayant d'atteindre un maximum de productivité et un maximum de dépollution.

## *Chapitre IV*

### *Comparaison de l'ACTV du biodiesel issu de deux milieux de culture*

## **IV. 1. Définition des objectifs et du champ de l'étude**

### **IV. 1.1. Définition des objectifs de l'étude**

#### **a. Application envisagée**

L'objectif est d'évaluer les impacts environnementaux d'un biodiesel issu de la culture d'une microalgue verte nommée « *Chlorella Vulgaris* » dans des eaux usées urbaines avec valorisation de la biomasse résiduelle et de les comparer avec les impacts environnementaux du biodiesel issu par la même microalgue cultivée dans une eau douce.

#### **b. Public ciblé**

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un master dans le seul but de fournir des informations sur la faisabilité du système qui seront divulguées au public dans l'intérêt de la recherche.

### **IV. 1.2. Définition du champ de l'étude**

#### **a. Le système**

Notre système concerne la production de biodiesel de 3<sup>ème</sup> génération. Les étapes qui décrivent le processus de fabrication sont les suivantes :

- Le prétraitement de l'eau usée domestique,
- La culture d'algues dans l'eau usée domestique,
- La récolte de la biomasse et le séchage,
- L'extraction de l'huile d'algue,
- La conversion de l'huile par transestérification,
- Le transport du biodiesel.

#### **b. Fonction du produit**

Le procédé envisagé a pour but la production du biodiesel qui servira de carburant.

#### **c. L'unité fonctionnelle**

L'unité fonctionnelle est 1 tonne de biodiesel.

#### **IV. 1.3. Frontières et limites du système**

##### **a. Limites géographiques**

La validité géographique de l'étude se limite à la production du biodiesel en Algérie.

##### **b. Catégories d'impact prises en compte**

Dans le cas de cette étude, seuls les impacts du changement climatique et de l'utilisation de l'énergie non renouvelable ont été pris en considération. La catégorie de dommage sur la santé humaine n'a pas été prise en compte de même pour la distribution du biodiesel et l'impact de son utilisation.

L'eau usée après traitement par les microalgues peut subir un traitement supplémentaire qui n'est pas pris en compte.

La figure IV.1 schématise les limites de notre système.

Dans le système de traitement les processus considéré sont les suivants :

- Un prétraitement qui comprend le dégrillage, le dessablage et le déshuilage,
- Une décantation primaire,
- Un traitement biologique par les microalgues en condition de mixotrophie.

Le traitement par les microalgues remplacera les traitements biologique et physico chimique.

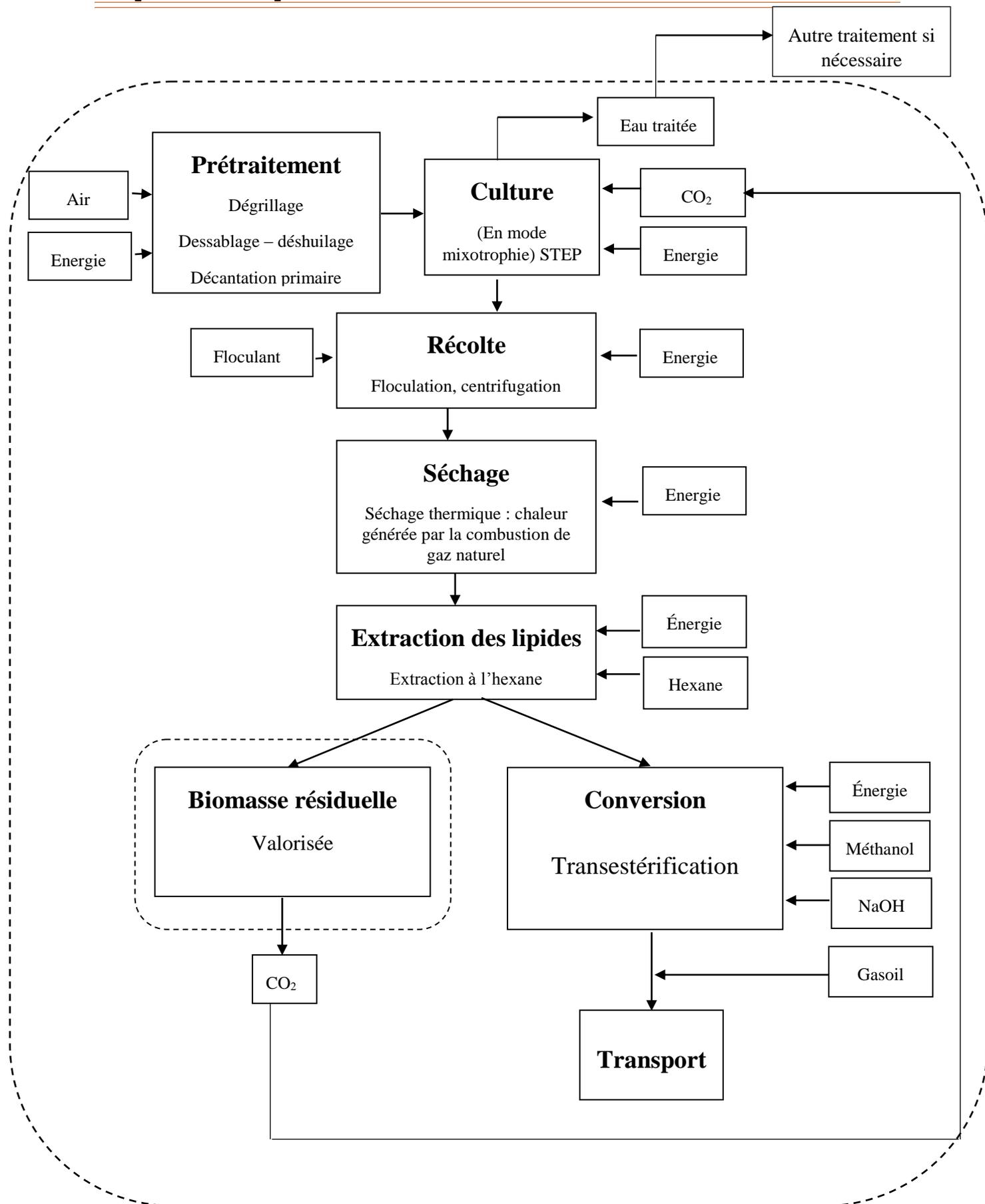


Figure IV.1 : Schématisation des limites du système considéré.

### IV. 2. Les hypothèses

#### IV. 2.1. Hypothèses de l'inventaire

- La productivité d'algues est estimée entre 13,6 et 24,7 g/m<sup>2</sup>/jour [48] soit en moyenne 20 g/m<sup>2</sup>/jour,
- On traitera 3000 m<sup>3</sup> d'eau usée domestique soit l'équivalent d'une culture d'1 hectare,
- Le rendement du contenu des lipides dans la biomasse sèche est de 18%,
- Le rendement de la floculation est estimé à 72% [23],
- Le rendement de la centrifugation est estimé à 90% [23],
- Le rendement de l'extraction est estimé à 80% [23],

D'après ces hypothèses, pour avoir 1 tonne de biodiesel, il faut 11 tonnes d'algues, nous supposons la culture de 12 tonnes d'algues avec pertes estimées.

- Les hypothèses pour le type d'étang Raceway ou CAHR utilisé sont représentées sur le tableau V.1.

**Tableau IV.1 : Les Paramètres des étangs à ciel ouvert de type Raceway utilisé. [49].**

Paramètres	Unités	Raceway type
Profondeur	m	0,3
Longueur	m	190
Largeur	m	20
Profondeur hydraulique	m	0,28
Surface de l'étang	ha	0,88
Volume de l'étang	m <sup>3</sup>	2651

- L'énergie nécessaire pour le pompage d'eau usée de l'égout jusqu'au dessableur-déshuileur est calculée par rapport à une distance de 20 m,
- La quantité d'air injecté dans le dessableur-déshuileur est de 0,2 m<sup>3</sup> d'air/ m<sup>3</sup> d'eau usée soit 600 m<sup>3</sup> d'air avec une énergie de 22 wh pour l'injection d'1 kg d'air sec [34],
- Le pH du milieu est maintenu entre 7,5 et 8,5 [47] et la température est entre 25 et 35 °C,
- La biomasse résiduelle contient 50% de CO<sub>2</sub> séquestré,
- La biomasse sèche est estimée à 6000 kg par rapport aux rendements de la floculation, de la centrifugation et du 1<sup>er</sup> séchage,
- Les émissions de CO<sub>2</sub> dégagé par la valorisation de la biomasse résiduelle sèche seront égales à la quantité du CO<sub>2</sub> séquestrée soit 3000 kg de CO<sub>2</sub>,

- Le procédé de valorisation de la biomasse résiduelle n'est pas pris en compte (voir les limites du système).
- Quantité de nutriments nécessaire pour la croissance d'1 kg de *Chlorella Vulgaris* (tableau IV.2) :

**Tableau IV.2 : Consommation de nutriments pour 1 kg d'algues de type *Chlorella Vulgaris* [50].**

Paramètre de croissance	Quantité kg
Consommation d'azote	$8,85 \cdot 10^{-3}$
Consommation de phosphore	$2,69 \cdot 10^{-3}$
Consommation de potassium	$1,15 \cdot 10^{-3}$
Consommation de CO <sub>2</sub>	1,172

- La composition moyenne de l'eau usée domestique est donnée en tableau IV.3.

**Tableau IV. 3 : Composition d'une eau usée urbaine [51].**

Paramètre estimé dans l'eau usée urbaine	Taux moyen
DBO mg O <sub>2</sub> /L	560
DCO mg O <sub>2</sub> /L	750
Ammonia-N mg/L	45
N total mg/L	60
P total mg/L	15

- Les microorganismes bactériens hétérotrophes aérobiques présents dans l'eau usée oxydent la matière organique en CO<sub>2</sub> qui servira de source de nutriments pour les microalgues estimée à 21,6 % de la quantité de CO<sub>2</sub> nécessaire.
- L'assimilation des nutriments pour une productivité de 20g/m<sup>2</sup>/jour est de 100% par rapport au besoin nécessaire soit 106 kg de N et 45 kg de P,
- Une décantation sera faite avant la culture d'algues,
- La centrifugation se fait dans un décanteur centrifuge,
- Afin d'atteindre une efficacité de séchage de 90% [52], les sécheurs utilisés seront de type « Belt Dryer ». Ils sont caractérisés par une consommation d'électricité de 400Wh et une consommation de chaleur de 13,8 MJ par kg de matière séchée,

- L'huile extraite a un contenu de  $2,6 \pm 0,3$  % d'acides gras libres [53]. Donc le contenu est inférieur à 5% [54] ce qui implique que la réaction secondaire de saponification n'aura pas un grand impact sur la qualité de biodiesel après sa conversion. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à la réaction d'estérification pour le procédé de conversion,
- Dans le procédé d'extraction, la régénération du solvant « hexane » est incluse. La chaleur fournie est destinée à la distillation du mélange huile-hexane,
- La conversion de l'huile algale en biodiesel est totale, rendement de 100%, soit la quantité de l'huile extraite est la même que celle du biodiesel « 1tonne »,
- La distance de transport des inputs chimiques, l'huile et le biodiesel est supposée ne pas dépasser les 100 km.

### **IV. 2.2. Hypothèses des données Sima Pro**

- Le CO<sub>2</sub> utilisé est supposé issu d'une production industrielle. En raison de l'indisponibilité des données locales, nous avons utilisé des données européennes disponibles sur la base de données Ecoinvent v2,
- L'électricité utilisée tient compte des données locales disponibles dans la base de données Ecoinvent v2. L'électricité est produite essentiellement à partir de gaz naturel,
- La chaleur est principalement générée par la combustion du gaz naturel,
- La méthode utilisée pour l'évaluation des impacts est « IMPACT 2002+ ».

### **IV. 3. Inventaire du Scénario de traitement de 3000 m<sup>3</sup> d'eaux usées urbaines**

Le tableau IV. 4 résume les différents phases et quantités nécessaires pour la production d'une tonne de biodiesel par la culture de 12 tonnes de microalgues de type *Chlorella Vulgaris* dans une eau usée.

**Tableau IV.4 : Inventaire du cycle de vie du biodiesel à partir de microalgues avec traitement des eaux usées domestiques.**

Etape	Paramètre	Donnée	Unité	Références
<b>Culture <i>Chlorella Vulgaris</i></b>				
<b>Eau usée urbaine</b>	L'azote	135	kg	[51]
	Le phosphore	45	kg	[51]
	Eau usée	3000	m <sup>3</sup>	
	Quantité de CO <sub>2</sub> organique	2244	kg	Estimé à partir de la DBO
	CO <sub>2</sub> Par valorisation de la biomasse résiduelle	3000	kg	
<b>Inputs chimiques</b>	Le CO <sub>2</sub>	5156	kg	<b>50% des besoins nécessaires [50]</b>
<b>Energie</b>	L'énergie pour l'injection du CO <sub>2</sub>	154,7	kWh	<b>50% des besoins nécessaires [50]</b>
	L'énergie pour l'injection de l'air dans le déssableur- déshuileur	13,5	kWh	[34]
	L'énergie pour le pompage d'eau	163,2	kWh	[55]
	L'énergie pour l'agitation	2400	kWh	[50]
	Energie totale	2732	kWh	
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	515,6	tkm	
<b>Sortant</b>	Eau traitée	3000	m <sup>3</sup>	

<b>Récolte de la biomasse algale</b>				
<b>Inputs chimiques</b>	Floculant (sulfate d'Aluminium)	260	kg	[49]
<b>Energie</b>	Floculation	0,5	GJ	
	Centrifugation	504	kWh	[50]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	26	tkm	

<b>Extraction de l'huile algale</b>				
<b>Inputs chimiques pour l'extraction</b>	Hexane	3	kg	[49]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	0,3	tkm	
<b>Energie pour l'extraction</b>	Chaleur	1,7	GJ	[49]
	Electricité	0,2	GJ	[49]
<b>Energie pour le séchage</b>	Chaleur	81,8	GJ	[52]
	Electricité	8,52	GJ	[52]

<b>Conversion de l'huile en biodiesel</b>				
<b>Entrants chimiques</b>	Méthanol	110	kg	[49]
	NaOH	10,5	kg	[56]
<b>Energie</b>	Chaleur	1.6	GJ	[49]
	Electricité	0,2	GJ	[49]
<b>Outputs</b>	Biodiesel	1	tonne	
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	112,05	tkm	

## **IV. 4. Système de production du biodiesel avec une culture dans une eau douce et CO<sub>2</sub> industriel**

### **IV. 4.1. Le système**

Ce système concerne la production du biodiesel de 3<sup>ème</sup> génération. Les étapes qui décrivent le processus de fabrication sont les suivantes :

- La culture d'algues dans une eau douce,
- La récolte de la biomasse et le séchage,
- L'extraction de l'huile d'algue,
- La conversion de l'huile par transestérification,
- Le transport du biodiesel.

Les limites du système considéré sont représentées dans la figure IV.2.

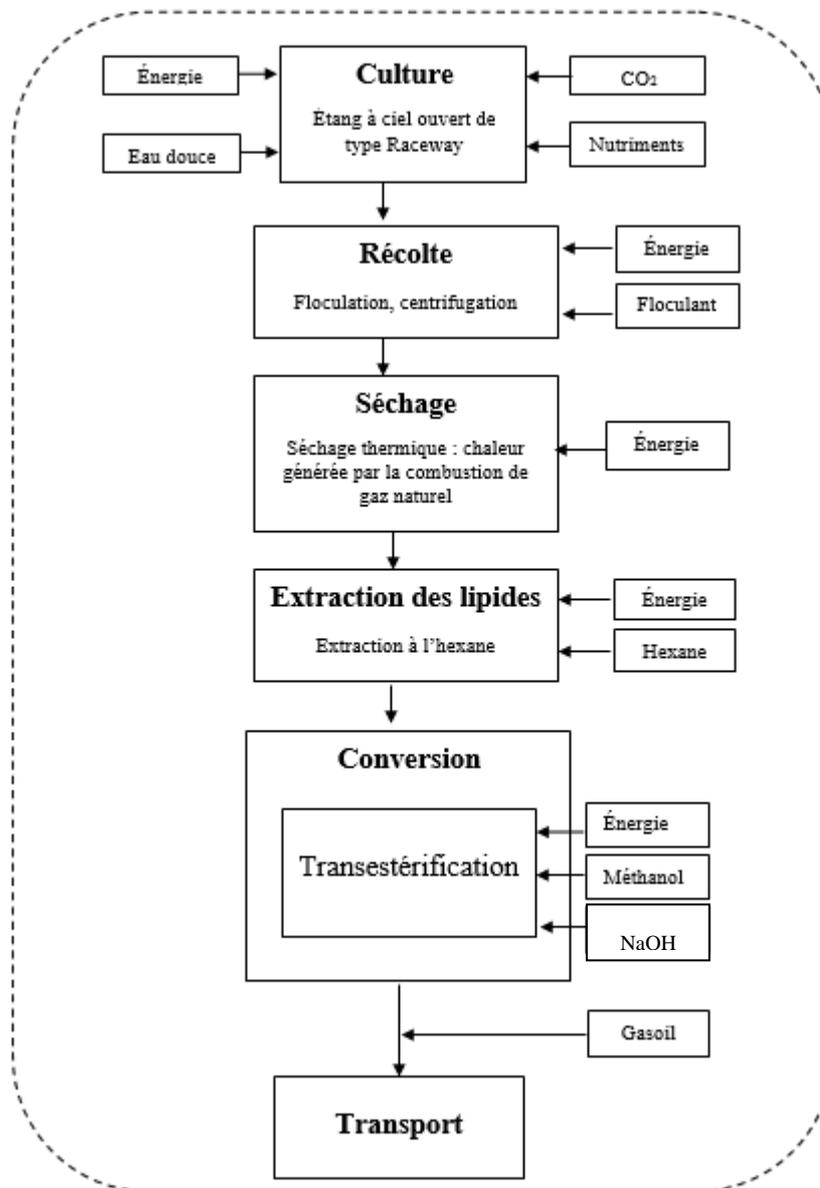


Figure IV.2 : Schématisation des limites du système de production du biodiesel considéré.

#### IV. 4.2. Hypothèses de l'inventaire

- La productivité d'algues est estimée à 24 g/m<sup>2</sup>/jour [50],
- Le rendement du contenu des lipides dans la biomasse sèche est de 18%,
- Le rendement de la floculation est estimé à 72% [23],
- Le rendement de la centrifugation est estimé à 90% [23],
- Le rendement de l'extraction est estimé à 80% [23],

D'après ces hypothèses, pour avoir 1 tonne de biodiesel, il faut 11,25 tonnes d'algues soit près de 12 tonnes,

- La quantité d'eau nécessaire pour remplir les bassins est estimée à 3000 m<sup>3</sup> pour une production d'une tonne de biodiesel,

- La centrifugation se fait dans un décanteur centrifuge,
- Afin d'atteindre une efficacité de séchage de 90% [52], les sécheurs utilisés seront de type « Belt Dryer ». Ils sont caractérisés par une consommation d'électricité de 400Wh et une consommation de chaleur de 13,8 MJ par kg de matière séchée,
- L'huile extraite a un contenu de  $2,6 \pm 0,3$  % d'acides gras libres [53]. Donc, le contenu est inférieur à 5% [54] ce qui implique que la réaction secondaire de saponification n'aura pas un grand impact sur la qualité de biodiesel après sa conversion. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à la réaction d'estérification pour le procédé de conversion,
- Dans le procédé d'extraction, la régénération du solvant « hexane » est incluse. La chaleur fournie est destinée à la distillation du mélange huile-hexane,
- La conversion de l'huile algale en biodiesel est totale, rendement de 100%, soit la quantité de l'huile extraite est la même que celle du biodiesel « 1 tonne »,
- La distance de transport des inputs chimiques, l'huile et le biodiesel est supposée ne pas dépasser les 100 km.

### **IV. 4.3. Hypothèses des données Sima Pro**

- Le type de fertilisants est choisi parmi ceux disponibles sur le marché Algérien, en l'occurrence le fertilisant « Fertial » :
  - ✚ Sulfate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$  à 21% de N (Engrais azotés simple)
  - ✚ Triple super phosphate TSP  $\text{P}_2\text{O}_5$  à 46%
  - ✚ Sulfate de potassium  $\text{K}_2\text{O}$  à 50%
- Le  $\text{CO}_2$  utilisé est supposé issu d'une production industrielle. En raison de l'indisponibilité des données locales nous avons utilisés des données européennes disponible sur la base de données Ecoinvent v2,
- L'eau douce utilisée est issu des ressources d'eau superficielle soit rivière ou lac disponible sur la base de données Ecoinvent v2,
- L'électricité utilisée tient compte des données locales disponibles dans la base de données Ecoinvent v2. L'électricité est produite essentiellement à partir de gaz naturel,
- La chaleur est principalement générée par la combustion du gaz naturel, La méthode utilisée pour l'évaluation des impacts est « IMPACT 2002+ ».

**IV. 4.4. Inventaire du Scénario de l'ACV du biodiesel**

**Tableau IV.5 : Inventaire du cycle de vie du biodiesel à partir de microalgues.**

Etape	Paramètre	Donnée	Unité	Références
<b>Culture <i>Chlorella Vulgaris</i></b>				
<b>Entrants chimiques</b>	L'azote	106,2	kg	[50]
	Le phosphore	32,30	kg	[50]
	Le potassium	13,8	kg	[50]
	Le CO <sub>2</sub>	10400	kg	[52]
<b>Eau superficielle</b>	Eau douce	3000	m <sup>3</sup>	
<b>Energie</b>	L'énergie pour l'injection du CO <sub>2</sub>	312	kWh	[50]
	L'énergie pour l'agitation	2400	kWh	[50]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	1055	tkm	

<b>Récolte de la biomasse algale</b>				
<b>Inputs chimiques</b>	Floculant (sulfate d'Aluminium)	260	kg	[49]
<b>Energie</b>	Floculation	0,5	GJ	
	Centrifugation	504	kWh	[50]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	26	tkm	

<b>Extraction de l'huile algale</b>				
<b>Inputs chimiques pour l'extraction</b>	Hexane	3	kg	[49]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	0,3	tkm	
<b>Energie pour l'extraction</b>	Chaleur	1,7	GJ	[49]
	Electricité	0,2	GJ	[49]
<b>Energie pour le séchage</b>	Chaleur	81,8	GJ	[52]
	Electricité	8,52	GJ	[52]

<b>Conversion de l'huile en biodiesel</b>				
<b>Entrants chimiques</b>	Méthanol	110	kg	[49]
	NaOH	10,5	kg	[56]
<b>Energie</b>	Chaleur	1,6	GJ	[49]
	Electricité	0,2	GJ	[49]
<b>Outputs</b>	Biodiesel	1	tonne	
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	112,05	tkm	

## IV. 5. Comparaison entre les deux systèmes de production pour 1 tonne de biodiesel

Les résultats obtenus pour la comparaison à l'aide du logiciel Simapro sont représentés dans le tableau IV en % de contribution des différents processus élémentaires de chaque procédé, en émission de CO<sub>2</sub> eq et en consommation d'énergie primaire et dans les figures IV.3 et IV.4 pour les deux systèmes de production.

**Tableau IV.6 : Contribution des processus élémentaires dans les deux systèmes de production du biodiesel à partir des microalgues « *Chlorella Vulgaris* ».**

Processus élémentaire	Pourcentage de contribution %		Emissions en kg CO <sub>2</sub> eq		Consommation d'énergie primaire GJ	
	Scénario STEP	Scénario de base	Scénario STEP	Scénario de base	Scénario STEP	Scénario de base
CO <sub>2</sub> (liquide industriel)	35,63	47	3290	6630	57,6	116
Azote : sulfate d'ammonium	/	2,1	/	286	/	5,07
Phosphore : Triple super phosphate	/	0,75	/	65,3	/	1,09
Potassium : sulfate de potassium	/	0,21	/	20,4	/	0,35
Sulfate d'aluminium (floculant)	2,26	1,48	126	126	2,43	2,43
Eau superficielle	/	6,23	/	458	/	14,6
Hexane industriel	0,07	0,05	2,62	2,62	0,18	0,18
Méthanol industriel	1,48	0,96	73,6	73,6	4,32	4,32
NaOH	0,12	0,08	8,87	8,87	0,2	0,2
Electricité : Electricité-Gaz naturel (Algérie)	11,95	7,78	1270	1270	21	21
Chaleur par la combustion de gaz naturel	44,8	29,31	4950	4950	86,8	86,8
Transport : camion de 3.5 -16t	3	3,64	203	377	3,46	3,46
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>9980</b>	<b>14300</b>	<b>177</b>	<b>260</b>

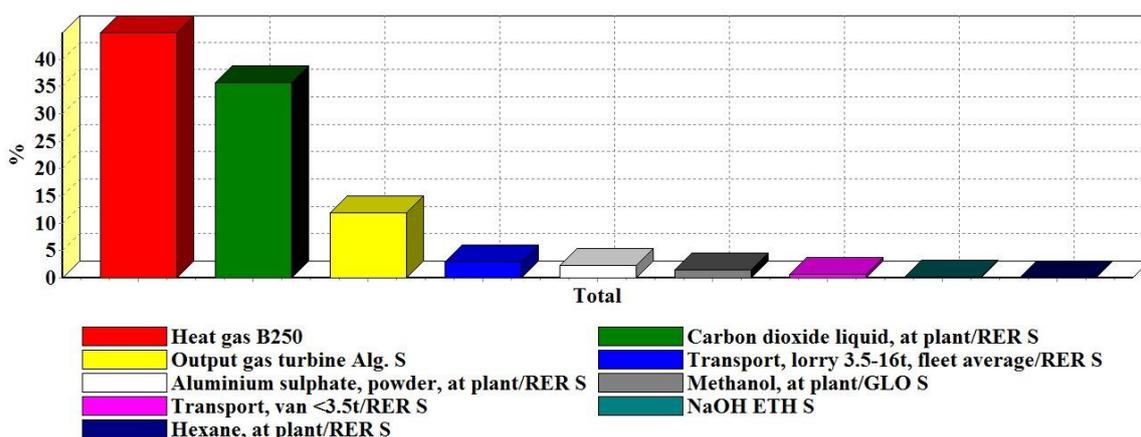


Figure IV.3 : Contribution des processus élémentaires dans l'ACV de la production du biodiesel de 3<sup>ème</sup> génération associée au traitement d'eaux usées urbaines.

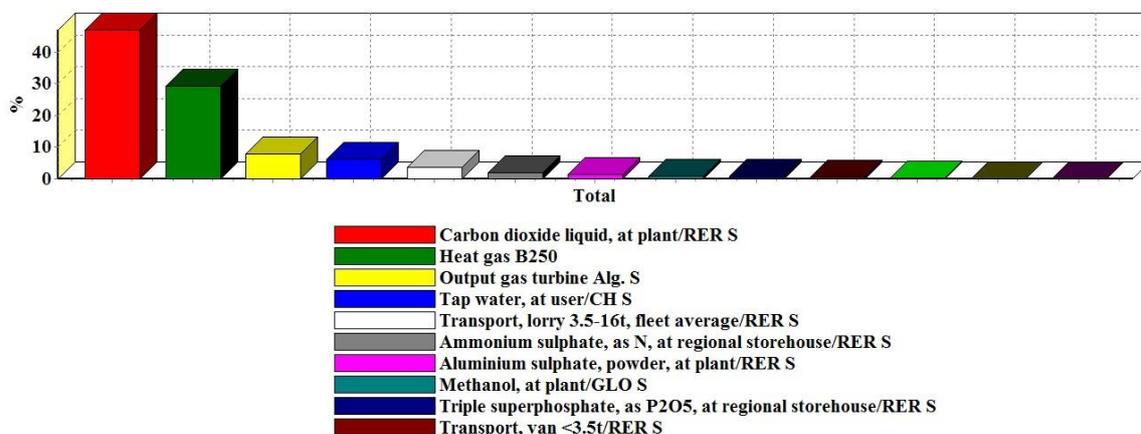
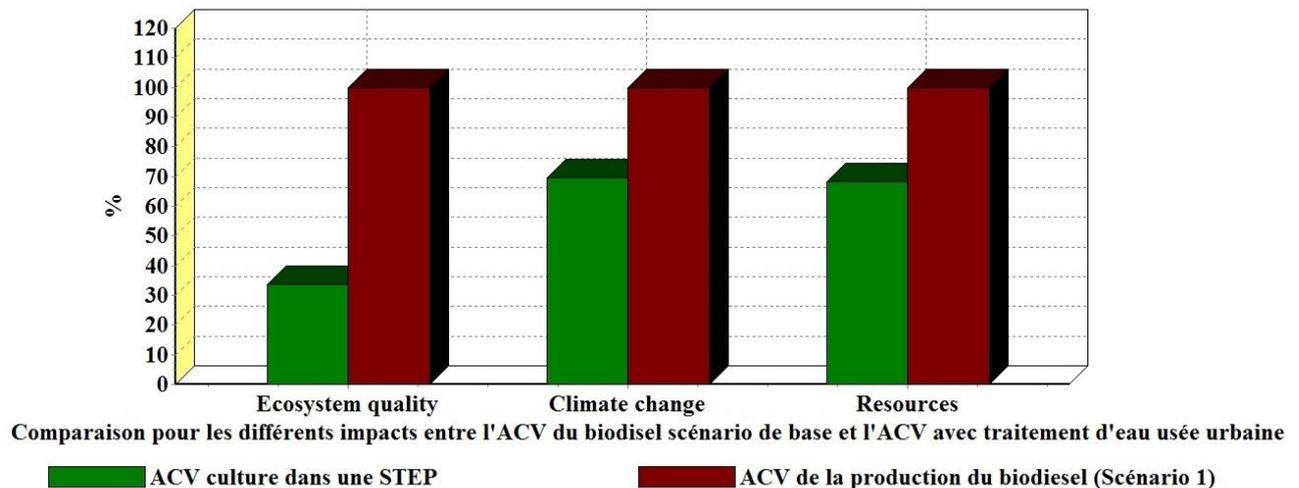


Figure IV.4 : Contribution des processus élémentaires dans l'ACV de la production du biodiesel de 3<sup>ème</sup> génération (Scénario de base).

La figure IV.5 montre les résultats de la comparaison entre les deux systèmes de production du biodiesel à partir de la microalgue « *Chlorella Vulgaris* » pour les 3 catégories d'impacts qualité du système, changement climatique et ressource énergétique primaires non renouvelables.



**Figure IV.5 : Comparaison entre le biodiesel issu de la « *Chlorella Vulgaris* » avec une culture de microalgues associée au traitement des eaux usées urbaines et un système de production de base.**

### IV. 6. Interprétation des résultats

A partir des résultats obtenus dans le tableau IV.6 et à partir des histogrammes figures IV.3 et IV.4, le processus élémentaire qui a le plus d'impact sur le système de production du biodiesel avec culture en STEP est l'utilisation de la chaleur générée par le gaz naturel avec une contribution de 45%. Dans notre cas, nous n'avons étudié que l'impact de la culture associée au traitement des eaux usées qui minimise à la fois l'utilisation des engrais chimiques, l'utilisation du CO<sub>2</sub> industriel, l'utilisation des ressources d'eau superficielle et les rejets d'eau usée dans l'environnement.

De plus, nous remarquons que dans un système de base, l'utilisation du CO<sub>2</sub> industriel est plus importante et elle est estimée à 47% du total. Ce facteur a été réduit dans le système de culture en utilisant les eaux usées urbaines d'une STEP.

A partir de la figure IV.3, la réduction d'impact sur la qualité de l'écosystème est bien visible et est estimée à 66% par rapport à l'impact engendré dans le système de base. Pour les impacts sur le changement climatique et la consommation d'énergie primaire non renouvelable, la diminution est de 30% pour les deux.

Les résultats obtenus montrent que la production du biodiesel à partir des microalgues associée au traitement des eaux usées domestiques avec valorisation de la biomasse résiduelle contribue positivement à l'étape de culture en réduisant la consommation des ressources

## Chapitre IV : Comparaison de l'ACV du biodiesel issu de deux milieux de culture

hydriques et des ressources énergétiques tout en diminuant l'impact du changement climatique. En plus de ce gain, nous avons réduit la pollution des eaux contribuant ainsi à la préservation de l'écosystème aquatique.

Toutefois, il est bien de préciser que cette étude n'est qu'une simple modélisation d'un système mixte dans le but d'une étude préliminaire de la faisabilité du système.

Les résultats obtenus semblent encourageants, mais nécessite d'être compléter par une étude socio-économique.

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture

## *Conclusion générale*

Le but de ce master était de comparer et d'évaluer l'impact environnemental entre deux procédés de production du biodiesel à partir de microalgues dans deux milieux de culture différents et ce, à l'aide d'une analyse de cycle de vie. Les résultats obtenus montrent que sur la catégorie de préservation des ressources naturelles soit hydrique ou énergétique, le système ne peut qu'être rentable. De plus, avec une culture d'algues associée au traitement des eaux usées domestiques, nous avons constaté que le procédé contribue à la réduction de la pollution aquatique et de là à la préservation de l'écosystème.

Ainsi l'étude montre que les microalgues sont capables de se développer avec des eaux usées comme milieu de culture. Elles utilisent les nutriments présents dans le milieu et permettent, à cette occasion, le traitement des eaux usées. L'avantage principal est l'utilisation du dioxyde de carbone organique pour la croissance des algues. Théoriquement, la quantité de CO<sub>2</sub> émise lors de la combustion du biocarburant issu des microalgues sera minimisée par le fait que ces mêmes algues auront captées du CO<sub>2</sub> pour leur croissance. De plus, la valorisation de la biomasse algale permet de recycler encore du CO<sub>2</sub> et de le réinjecter dans le système de culture.

La composition de l'eau usée considérée dans ce travail peut ne pas refléter celle d'une eau usée locale. Aussi, les résultats obtenus concernant la productivité de la microalgue ne reflètent pas nécessairement le potentiel algérien.

Cette étude n'est en fait qu'une simple modélisation faite dans l'unique intérêt de contribuer à la recherche scientifique dans notre pays et à aider à la prise de décision au cas où la filière du biodiesel de 3<sup>ème</sup> génération serait envisagée dans le mix énergétique de l'Algérie.

## *Perspectives et recommandations*

- La filière de production du biodiesel à partir de microalgues est très prometteuse en termes de réduction d'impact sur le changement climatique et de préservation des ressources naturelles non renouvelables. Pour cela, il faut maîtriser l'efficacité énergétique des différentes phases, notamment le séchage vu que c'est l'étape la plus énergivore dans un système associé au traitement des eaux usées.
- La valorisation de la biomasse résiduelle doit toujours être prise en compte dans la filière des biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération si on veut obtenir un rendement important. Pour cela, les différentes valorisations qui peuvent se faire sont la fermentation de la biomasse algale pour la production du Biogaz, utilisé pour la production d'énergie et de CO<sub>2</sub> pour l'étape de culture, ou bien la combustion de la biomasse algale pour un système de cogénération (chaleur et électricité) ainsi les fumées générées peuvent être valorisées comme source de CO<sub>2</sub>.
- Il serait également intéressant de calculer le potentiel de biodiesel pouvant d'être atteint et ce en évaluant les surfaces disponibles susceptibles de recevoir ce genre de projet. Ce n'est que de cette façon qu'on pourra apprécier la part de cette filière dans le mix énergétique du futur.
- Dans notre travail, nous n'avons pas étudié le coût du système. Nous avons remarqué que l'intégration de deux procédés différents dans un même endroit est économique mais seule une étude socio-économique peut en définir l'ampleur.

## *Références bibliographiques*

1. Yusuf Chisti. Research review paper Biodiesel from microalgae. Institute of Technology and Engineering, Massey University, Private Bag 11 222, Palmerston North, New Zealand, *Biotechnology Advances* 25 (2007) 294–306. doi:10.1016/j.biotechadv.2007.02.001.
2. Dossier : Les agrocarburants sur actu environnement.com, publié le 07/11/2007 [en ligne], [http://www.actuenvironnement.com/ae/dossiers/agrocarburants/focus\\_agrocarburants.php4](http://www.actuenvironnement.com/ae/dossiers/agrocarburants/focus_agrocarburants.php4) consulté en mai 2016.
3. Romain Guillo, Article sur ecosources.info, Portails des énergies renouvelables et de l'écoconstruction/ énergie renouvelable/ biomasse/ biocarburants [En ligne] <http://www.ecosources.info/biocarburants> consulté en mai 2016.
4. Helga-Jane Scarwell « Biocarburant : chronique d'un éternel retour annoncé », *Pollution atmosphérique* [En ligne], N° 217, mis à jour le : 10/04/2013, Scarwell Laboratoire TVES EA 4477.URL : <http://lodel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=860> consulté Mai 2016.
5. J.S. Yuan. Plants to power: bioenergy to fuel the future – A review. *Trends in Plant sciences* 13, 421-429 (2008).
6. Kyoyo Protocol, Kyoto Protocol of the United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto, 1997.
7. M. Canakci and J. Van Gerpen. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *American Society Agricultural Engineering*, Vol. 44, N°6, pp. 1429-1436, 1999.
8. Berna Hamad. Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard - Lyon I, 2009.
9. D. Ballerini et N .Alazard-Toux. Les Biocarburants état des lieux, perspectives et enjeux du développement. Paris : IFP Publication, 2006. 369p. ISBN : 2-7108-0869-2.

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture

10. J. P. Cadoret and O. Bernard. La Production De Biocarburant Lipidique Avec Les Microalgues: Promesses et Défi, Journal De La Société Biologique, 201-211, 2008.
11. Giuliana Patricia et Becerra Celis. Proposition de stratégies de commande pour la culture de microalgues dans un photobioréacteur continu, avril 2009. Thèse de doctorat. Ecole Centrale Des Arts Et Manufactures « Ecole Centrale Paris » Chapitre 2 Page 39 – 60 : 265.
12. Isabelle Cantin. La Production de biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe. Centre universitaire de formation en environnement. Université de Sherbrooke, Québec, Canada, Juillet 2010. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement.
13. Barnabas Gikonyo, Phd. Advances in biofuel production algae and aquatic plants. Apple Academic Press, Toronto, 2014. ISBN: 978-1-4822-3276-9.
14. T.M. Mata, A.A. Martins. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. 14(1):217–232.
15. K.G. Satyanarayana, A.B. Mariano, J.V.C. Vargas. A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials. International Journal of Energy Research. 2011. 35(4):291-311.
16. Hu Q. Sommerfeld. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. The Plant Journal. 2008. 54:621–639.
17. G. Luis, Torres Erick and R. Bandala. Energy and environment nowadays energy science. Engineering and Technology, Nova Science 2014.
18. Carl Safi. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*. Renewable and sustainable Energy reviews, 2014.
19. M.E.A. Belkadi. Etude technique pour la valorisation énergétique des microalgues. Mémoire de magister en management des projets énergétiques. Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 49 P., 2009.

## Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture

20. Rayen FILALI. estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO<sub>2</sub>. Thèse de doctorat à l'école doctorale « Sciences et technologies de l'information des télécommunications et des systèmes ». Supélec, 2012.
21. Wiley P.E., Campbell J.E., Mckuin B. Production of biodiesel and biogas from algae. A Review of Process Train Options. Water Environment Research. 2011. 83(4):326-38.
22. Françoise Lohéziec, Pierre-François, Master Biologie Gestion - Synthèse Bibliographique « Les Algues Comme Biocarburant » - Mars 2012, Université De Rennes 1. disponible sur :  
[www.geneve-villesetchamps.ch/wp-content/uploads/2014/09/Les-algues-comme-biocarburant.pdf](http://www.geneve-villesetchamps.ch/wp-content/uploads/2014/09/Les-algues-comme-biocarburant.pdf) (Consulté en mars 2016).
23. Collet. P, Arnaud Hélias, Laurent Lardon, Jean-Philippe Steyer, Olivier Bernard. Recommendations For Life Cycle Assessment Of Algal Fuels Applied Energy 154 (2015) 1089–1102.
24. Singh A., Nigam P.S., Murphy J.D. Mechanism and Challenges In Commercialisation Of Algal Biofuels. Bioresource Technology. 2011. 102:26–34.
25. Satyanarayana K.G., Mariano A.B., Vargas J.V.C. A Review On Microalgae, A Versatile Source For Sustainable Energy And Materials. International Journal Of Energy Research. 2011. 35(4):291-311.
26. Jasvinder Singh, Sai Gu A Commercialization Potential Of Microalgae For Biofuels Production Renewable And Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 2596–2610
27. Warabi Y., Kusdiana D., Saka S. Reactivity Of Triglycerides And Fatty Acids Of Rapeseed Oil In Supercritical Alcohols. Bioresource Technology. 2004. 91(3):283–7.
28. MESBAHI Dalila. La transestérification hétérogène de l'huile de tournesol sous alumine : production du Biodiesel EEHV. Mémoire de magister, l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. Faculté des sciences. Département de Chimie. 2012.
29. O.Jolliet, M.Saade, P.Crettaz, S. Shaked. Analyse Du Cycle De Vie – Comprendre Et Réaliser Un Eco-Bilan, 2ème Edition. Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes, 2010. 289 p. ISBN : 978-2-88074-886-9.

## Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture

30. N.Boeglin et D.Veuillet. Rapport ADEME : Notes de synthese externe, département Eco-Conception & Consommation Durable, Introduction à l'Analyse de cycle de vie (ACV). Mai 2005. Disponible sur : [http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/noteACVexterne\\_ADEME\\_mai\\_2005.pdf](http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/noteACVexterne_ADEME_mai_2005.pdf) (Consulté en mars 2016).
31. Norme ISO : Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices. Catalogue ISO [En ligne] mise à jour en 2010. Disponible sur : [http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=38498](http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38498) (Consulté en mars 2016).
32. Y.Loerincik et O. Jolliet. ACV et Ecoconception : Comparaison des filières de production d'électricité, eointesys-life cycle systems. Parc Scientifique De l'EPFL Lausanne, mars 2007.
33. Le Moigne J.L, La Modélisation Des Systèmes Complexes, Dunod, 1990.
34. Traitement des eaux usées urbaines par Abdelkader GAÏD, Ingénieur Process, Direction technique, Omnium de Traitement et de Valorisation (OTV), Mise à jour du texte de J. SIBONY et B. BIGOT paru en 1993, Techniques de l'Ingénieur Doc. C 5 220.
35. Les eaux usées. Le traitement des eaux usées, par le centre d'information sur l'eau, Article [En ligne], publié le 26 septembre 2013 09:52: <http://www.cieau.com/les-eaux-usees/le-traitements-des-eaux-usees> consulté Mai 2016.
36. T.M. Mata, A.A. Martins, N.S. Caetano. Microalgae for biodiesel production and other applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. 14(1):217–232.
37. J. Masojídek, M. Koblížek and G. Torzillo. « Photosynthesis In Microalgae », In: Handbook Of Microalgal Culture: Biotechnology And Applied Phycology, Richmond A. (Ed.), Blackwell Publishing Ltd., Oxford, Pp. 3-19, 2004.
38. ZHU J, RONG J, ZONG B. Factors in Mass Cultivation Of Microalgae For Biodiesel. Chin J Catal. 2013 Jan;34(1):80–100.
39. W. Fulks, K.L MAIN. The design and operation of commercial scale live feeds production systems, 1991. Rotifer and microalgae culture systems, Proc. US/Asia Workshop. The Oceanic Institute, Hawaiï : 3-52.

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture

40. E. Stengel. 1970. Anlagentypen Und Verfahren Der Technische Algen massenproduktion Ber. Dtsch. Bot. Bd. 83 (11): 589-606.
41. L. Barsanti and P. Gualtieri. Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology. Taylor & Francis Group (2006).
42. Aurélie LUCCHETTI. Thèse sur la modélisation et conception d'un système de culture de microalgues, Chapitre I. Microalgues : biologie et moyens de culture - système expérimental, page 18. l'école nationale supérieure des mines de Paris. Spécialité " Energétique et Procédés ", Avril 2014.
43. S.L.Estrada Duran. Simulation dynamique des photobioréacteurs : étude de l'influence de l'azote et du phosphore sur la croissance de porphyridium purpureum. Thèse doctorale, Ecole Centrale de Paris, France, 2007.
44. [Dr. Frank Liebke. Chlorella Vulgaris - Medicinal Food.Preface and important background information. http://www.klinghardtacademy.com/articles/chlorella-vulgaris-medicinal-food.html \(consulté en avril 2016\).](http://www.klinghardtacademy.com/articles/chlorella-vulgaris-medicinal-food.html)
45. J.N. Rogers and Al. A Critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. Algal Res. 2013.
46. Jon K. Pittman, Andrew P. Dean, Olumayowa Osundeko, The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources, Bioresource Technology 102 (2011) 17–25, doi:10.1016/j.biortech.2010.06.035.
47. Developments in Applied Phycology 5, Algae for Biofuels and Energy, Michael A. Borowitzka and Navid R. Moheimani, Springer Dordrecht Heidelberg New York London 2013, 301p, chap 9. ISBN 978-94-007-5479-9.
48. Dongyan Mu, Min Min, Brian Krohn, Kimberley A. Mullins, Roger Ruan, and Jason Hill, Life Cycle Environmental Impacts of Wastewater-Based Algal Biofuels, Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, St. Paul, Minnesota 55108, United States, American Chemical Society (2014), dx.doi.org/10.1021/es5027689 | Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 11696–11704.
49. Anna L. Stephenson. Life Cycle Assessment of potential algal biodiesel production in the United Kingdom: a comparison of raceways and airlift tubular bioreactors. Energy Fuels 2010, 24, 4062–4077.

## Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle analyse comparée de deux milieux de culture

50. Collet. P Life-Cycle Assessment Of Microalgae Culture Coupled To Biogas Production Bioresource Technology, 2011.
51. Mogens Henze. Biological Wastewater Treatment Chap 3 : Principles Modelling and Design. Edited by M. Henze, M.C.M. van Loosdrecht, G.A. Ekama and D. Brdjanovic. Published by IWA Publishing, 2008, London, UK. ISBN: 9781843391883.
52. Laurent Lardon Life-Cycle Assessment of biodiesel production from microalgae. INRA, UR50 laboratoire de biotechnologie de l'environnement. France Policy Analysis 2009.
53. Farooq Ahmad. Transesterification of oil extracted from different species of algae for biodiesel production. Gc University, Sustainable Development Study Centre, Lahore, Pakistan, 2013.
54. Jon Van Gerpen. Biodiesel processing and production. University of Idaho, Moscow, Fuel Processing Technology 86 (2005) 1097– 1107.
55. Wiki de l'énergie [En ligne]: <http://www.japprends-lenergie.fr/ressources/wiki-energie#ressource/production-electrique/centrales-hydrauliques/step>, consulté en mai 2016.
56. Gnansounou. Comparative Life Cycle Assessment of biodiesel from algae and jatropha: a case study of India. Bioresource Technology 150 (2013) 429–437.