

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة
UNIVERSITE 20 AOUT 1955-SKIKDA



Département des Sciences de la Nature et de la Vie
Mémoire Présenté en Vue de l'obtention du Diplôme de
Master

Filière: Biologie

Option: Microbiologie Appliqué

Intitulé

Production des biocarburants par les algues

Présenter par:

- AZOUZI ROUMAÏSSA
- FAGHROUR WIAM
- GHEMID HIND
- MERABTA KHAOULA

Membre de jury:

Président : Dr. BOUJELLAB. Z.E

MCB

U.20 aout 1955 Skikda

Directeur de mémoire : Dr. GHANNAM. M

MCB

U.20 aout 1955 Skikda

Examineur : Dr. ENNAGHRA. N

MCB

U.20 aout 1955 Skikda

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Au terme ; de ce travail ; Nous remercions tout d'abord « Allah » le tout puissant de nous avoir donné La foi,

*Qui nous a guidé et éclairé notre chemin ; et de nous avoir
Donné le courage, la force, la volonté et la patience pour La
réalisation et l'élaboration de notre travail.*

*Nous tenons à remercier profondément notre
encadreur Madame **Dr. GHANNAM. M** pour sa disponibilité, ses
efforts et ses encouragements qui nous ont permis de mener à bien
cette étude.*

*Nous tenons à remercier les membres de jury, qui vont évaluer
notre travail.*

*Nous remercions également tous nos professeurs pour leur générosité et
leur grande patience malgré leurs charges académiques et professionnelles. et
tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réussite de notre
parcours scolaire.*

*Enfin, nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui
ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et
qui nous ont encouragé et soutenu à tout moment.*

Un grand merci à tous!



Dédicaces

ألمسي

A.Roumaissa

Dédicaces

A l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, J'ai pu réaliser ce travail que je dédie :

A la lumière de mes yeux, l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie ma mère qui m'a apporté son appui durant toutes mes années d'étude, pour son sacrifice et soutien qui m'ont donné confiance, Courage et sécurité.

A mon cher père mon exemple éternel que dieu te garde dans son vaste paradis Aucun dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le respect que j'ai toujours eu pour vous.

A mes chères sœurs Khawla et Ines, A mes frères Mohamed « que dieu garde a son paradis Incha'a Allah et Oussama.

A la personne la plus chère a mon cœur Abdel illah et toute sa famille.

A mes amis Chaima et Roumaissa.

A tous les membres de la famille « Bouali »

A ma deuxième famille, mon oncle Houssine, ma tante Soumia et mon frère Haithem.

F. Wiam

Dédicaces

Je tiens c'est avec plaisir que je dédie ce modeste travail:

À l'être le plus cher de ma vie, ma mère.

Au meilleur homme du monde, à ma force et mon soutien, mon père.

*À mes chers Soeurs, et encore je dédie ce modeste travail à mon cher oncle
décédé.*

À tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom

GHEMID.

G. Hind

Dédicaces

Avec l'aide de Dieu tout puissant

Je dédie ce modeste travail à :

Mon cher Papa qui a mené durement sa vie pour me voir là où j'en suis maintenant et s'est sacrifié toujours à l'effet de me rendre heureuse ; Cher père je me rappelle toujours de tous les moments où tu m'a poussé à travailler et à réussir; Merci et j'espère que vous trouvez dans ce travail l'expression de ma gratitude et mon respect.

Ma chère mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute, son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon grand respect, Mon amour éternel, ma profonde gratitude, ma sincère reconnaissance pour les sacrifices, les instructions, et le soutiens que ma chère sœur m'ont porté.

Mon très cher frère, aucune dédicace ne pourrait exprimer ma loyale considération et mes profonds sentiments envers lui.

Tous les membres de ma famille et tous mes amis pour leur présence de tous les instants, leurs encouragements qu'ils m'ont apportés et pour les beaux souvenirs

M. Khaoula

Résumé :

La production des biocarburants par les algues

La majeure partie de l'énergie consommée dans le monde provient du pétrole. Cependant, cette source est limitée et pourrait être épuisée d'ici la fin du siècle prochain. Pour ces raisons, il est nécessaire de remplacer les combustibles fossiles par des sources d'énergie alternatives telles que les biocarburants. Le présent travail s'intègre dans cette démarche globale pour synthétiser du biocarburant et plus particulièrement du biodiesel à partir d'huile de macroalgues et de microalgues.

Les agrocarburants ne sont pas la solution aux problèmes à cause de leurs coûts, leurs contraintes de production et l'impossibilité actuelle de répondre à la demande mondiale. Ils constituent cependant une source d'énergie permettant de suppléer le pétrole et d'en limiter ainsi la dépendance.

Ce travail retrace les différentes étapes nécessaires à la production de biodiesel. Du choix de l'espèce, en passant par le choix du mode de production, l'optimisation de la culture, mais aussi par les différentes méthodes de récolte, de concentration et d'extraction, pour finir par les méthodes de transformation en carburant. On ne pourra que constater les difficultés que chaque phase génère. On remarquera aussi que des technologies de pointe pourront concourir au développement de cette filière et que l'harmonisation des divers acteurs sera indispensable pour faire avancer la recherche et le développement.

Mots clés : biodiesel, macro-algues, microalgue, remplacer les combustibles fossiles

المخلص:

إنتاج الوقود الحيوي بواسطة الطحالب

معظم الطاقة المستهلكة في العالم تأتي من النفط . ومع ذلك ، فإن هذا المصدر محدود ويمكن استنفاده بحلول نهاية القرن المقبل . لهذه الأسباب ، من الضروري استبدال الوقود الأحفوري بمصادر الطاقة بديلة مثل الوقود الحيوي . العمل الحالي هو جزء من هذا النهج العالمي لتجميع الوقود الحيوي وخاصة وقود الديزل الحيوي من الطحالب الكبيرة وزيت الطحالب الدقيقة .

لا يعتبر الوقود الحيوي هو الحل للمشكلات بسبب تكاليفه وقيود إنتاجه والاستحالة الحالية لتلبية الطلب العالمي . ومع ذلك، فإنها تشكل مصدرا للطاقة مما يجعل من الممكن تكملة الزيت وبالتالي الحد من الاعتماد عليه.

هذا العمل يعيد تتبع الخطوات المختلفة اللازمة لإنتاج وقود الديزل الحيوي . من اختيار النوع، من خلال اختيار طريقة الإنتاج، وتحسين الاستزراع، ولكن أيضا من خلال الطرق المختلفة للحصاد والتركيز و الاستخراج، حتى الانتهاء من طرق التحويل إلى وقود. يمكننا فقط رؤية الصعوبات التي تولدها كل مرحلة. وتجدر الإشارة أيضا إلى أن التقنيات المتطورة ستكون قادرة على المساهمة في تطوير هذا القطاع وأن التنسيق بين مختلف الجهات الفاعلة سيكون ضروريا للنهوض بالبحث و التطوير.

الكلمات المفتاحية : الديزل الحيوي ، الطحالب الكبيرة ، الطحالب الدقيقة ، استبدال الوقود الأحفوري

Abstract:

The production of biofuels by algae

Most of the energy consumed in the world comes from oil. However, this source is limited and could be exhausted by the end of the next century. For these reasons, It is necessary to replace fossil fuels with alternative energy sources such as biofuels. The present work is part of this global approach to synthesize biofuel and more particularly biodiesel from macroalgae and microalgae oil.

Agrofuels are not the solution to the problems because of their costs, their production constraints and the current impossibility of meeting global demand. They do, however, constitute a source of energy making it possible to supplement oil and thus limit dependence on it.

This work retraces the different steps necessary for the production of biodiesel. From the choice of the species, through the choice of the mode of production, the optimisation of the culture, but also by the different methods of harvesting, concentration and extraction, to finish by the methods of transformation into fuel. We can only see the difficulties that each phase generates. It should also be noted that cutting-edge technologies will be able to contribute to the development of this sector and that the harmonization of the various actors will be essential to advance research and development.

Keywords: biodiesel, macroalgae, microalgae, replacing fossil fuels.

Liste des figures

Figure N°	Intitulée	Page
01	Les algues	03
02	Algue brune (phéophycée)	06
03	Algue rouge (rhodophycée)	06
04	Algue verte (chlorophycée)	07
05	Culture des macroalgues dans des bassins de type raceway	11
06	Photographie d'une cyanobactérie <i>anabaena</i>	11
07	Photographie d'une cyanobactérie <i>anabaena</i>	16
08	Schéma d'une structure de microalgue unicellulaire	17
09	Photographie d'une bacillariophycée <i>navicula</i>	17
10	Photographie d'une chlorophycée <i>chlorella vulgaris</i>	18
11	Photographie d'une chrysophycée <i>dinobryon</i>	18
12	Photographie d'une <i>rhodosorus marines</i> rhodophycée	18
13	Photographie d'une euglenophycée <i>euglena</i>	19
14	Bassins de culture de microalgues. A gauche bassin en boucle fermée, infrastructure de Roswell, Nouveau Mexique (USA) A droite : bassins circulaires d'environ 500 m ² , production de chlorelle	21
15	Bassins construits dans le cadre du projet salinalgue à gruissan.	22
16	Photographie de différentes installations de PBR tubulaires. A gauche : PBR hélicoïdal, vertical. A droite : PBR tubulaire horizontal immergé dans l'eau.	22
17	Schéma de principe d'une PBR	23
18	Biocarburant de première génération	27
19	Domaines d'utilisation du bioéthanol	31
20	Production mondiale de biodiesel	33
21	Principe de l'extraction par pression	37
22	Extraction soxhlet	39
23	Speed vac système (évaporateur centrifuge)	42
24	La récolte des algues	42
25	Système d'extraction par solvant	43
26	Unités d'extraction à l'eau subcritique	44
27	Système d'extraction de fluide supercritique	45
28	Diagramme des différents états d'un corps pur	46
29	Extraction d'huile par CO ₂ supercritique	47
30	Opérations d'obtention du biodiesel	49

Liste des tableaux

Tableau N°	Intitulé	Page
01	Caractéristiques importants des groupes d'algues	05
02	Caractéristiques importants des groupes des microalgues	15
03	Les principaux avantages et inconvénient des biocarburants	30
04	Caractéristiques d'une huile végétale et le biodiesel comparées au gasoil	32
05	Caractéristiques du gasoil et du biométhane	35

Liste des abréviations

AGPI: Acide gras polyinsaturés

AG: Acide gras

MS: Matière sèche

DHA: Docosahexaénoïque

EPA: Acide eicosapentaénoïque

HC: Hydrocarbures

PBR: Photobioréacteur tubulaire

CO₂: Dioxyde de carbone

NO_x: D'oxydes azotés

SO_x: D'oxydes soufrés

ETBE: Éthyle-tertio-butyl-éther

HVP: L'huile végétale pure

HVB: L'huile végétale brute

EMHV: Esters d'huile végétale méthyliques

EEHV: Esters d'huile végétale éthyliques

BTL: Biomasse To liquide

GES: Gaz à effet de serre

C°: Degré Celsius

KG: kilogramme

ML: Milliards de litres

ASTM: American society for testing and materials

DOD: Département of defense

NREL: National renewable energy laboratory

GNV : Gaz naturel pour véhicules

M2P2 : Mécanique, modélisation et procédés propre

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction01

Chapitre I : Généralités sur les algues

I.1.Définitions.....03

I.2.Groupes d'algues.....04

I.2.1.macroalgues04

I.2.1.1.Classification.....04

I.2.1.2.Composition biochimiques des macroalgues07

I.2.1.3.Culture des macroalgues10

I.2.1.4.Application des macroalgues12

I.2.2.microalgues.....13

I.2.2.1. Classification14

I.2.2.2.Composition biochimiques des microalgues.....19

I.2.2.3.Culture des microalgues.....20

I.2.2.4.Application des microalgues.....23

Chapitre II : Biocarburants

II.1.Définitions.....27

II.2.Différents générations des biocarburants.....27

II.2.1.Biocarburants de première génération27

II.2.2.Biocarburants de deuxième génération29

II.2.3.Biocarburants de troisième génération.....30

II.3.Avantages et inconvénients des biocarburants.....	30
II.4.Applications des biocarburants	31
II.4.1.Application du bioéthanol.....	31
II.4.2.Application d'huile végétale carburant.....	32
II.4.3.Application du biogaz.....	33

Chapitre III : production de biocarburants par les algues

III.1.Extraction des huiles.....	37
III.1.1.Extraction par pressage	37
III.1.2.Extraction par solvant.....	38
III.1.2.1.Percolation.....	38
III.1.2.2.Macération.....	38
III.1.2.3.Extraction par Soxhlet.....	38
III.2.Exemple de biocarburant : biodiesel à partir des microalgues.....	39
III.2.1.Principaux joueurs.....	39
III.2.2.Récolte des algues.....	42
III.2.3.Extraction des huiles algales.....	43
III.2.3.1.Extraction par solvants organiques.....	43
III.2.3.2.Extraction à l'eau subcritique.....	44
III.2.3.3.Extraction avec des fluides supercritiques.....	45
III.2.3.4.Extraction au CO2 supercritique.....	46
III.2.4.Mode de production.....	47
Conclusion.....	51

Référence bibliographiques

Introduction

Introduction

Les algues sont des organismes photosynthétiques d'une grande diversité qui regroupent de nombreuses espèces (entre 300 000 et 1 million). Les algues représentent une part importante de la biomasse végétale de la terre et sont utilisées depuis des millénaires dans les alimentations humaine et animale, comme combustible, ou encore comme engrais. Les algues sont capables de se développer dans une large gamme de conditions, grâce à leur étonnant système d'adaptation ainsi que leur variabilité. De ce fait, on les retrouve dans tous les environnements humides depuis les milieux marins et les eaux douces de surface jusqu'aux milieux extrêmes tels que les milieux acides (algues acidophiles), les milieux fortement salés (algues halophiles) ou encore les eaux profondes jusqu'à 250 m (algues rouges, algues brunes) (**Aurore Villay, 2013**).

Parmi les algues, les microalgues présentent un intérêt grandissant dans de nombreux domaines. En effet, du fait de l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique, les microalgues apparaissent comme une solution d'avenir, pour leur capacité à fixer le CO₂ (puits de carbone) et également dans le domaine de la bioconversion des eaux usées. De plus, les microalgues sont des organismes producteurs de nombreuses molécules pouvant présenter un intérêt en termes de valorisation en plusieurs domaines : alimentaire, cosmétique, les domaines médicaux et pharmacologiques (**Aurore Villay, 2013**).

Les microalgues peuvent également produire de l'hydrogène, du méthane et des hydrocarbures de nature lipidique. Dans un contexte de diminution des stocks d'énergies fossiles, la production de biocarburants par ces microorganismes suscite donc un intérêt croissant et de nombreuses investigations, notamment pour le développement d'une bio raffinerie dédiée à la production de biocarburant de troisième génération. En effet la culture de ces organismes ne rentre pas en compétition avec les plantes terrestres dédiées à l'alimentation humaine pour l'occupation de terres arables et semble donc une alternative à haut potentiel par rapport aux biocarburants de premières et secondes générations (**Aurore Villay, 2013**).

L'objet de ce travail est de montrer l'intérêt des microalgues comme alternative aux biocarburants fossiles. Après avoir évoqué le choix des algues, nous allons décrire les différentes étapes de production d'un biocarburant, depuis la culture des algues jusqu'à la transformation des composés extraits et concentrés en biocarburant.

Chapitre I

Généralité sur les

algues

I.1. Définition :

Les algues sont des organismes aquatiques, chlorophylliens, thallophytes qui appartiennent au groupe des cryptogames (**Roland et al, 1999**). Elles possèdent toute de la chlorophylle et divers autre pigment et en ce sens, ce sont des végétaux constituées d'un appareil différencié appelé thalle (**Leclerc et Floch, 2010**).

Le thalle présente une grande diversité de formes allant de lames simple à des structures plus complexes semblables à des tubes, des tiges et des feuilles ou encore des boules remplies d'eau. La texture est également très variée : certaines algues sont gélifiées, voire de texture cartilagineuse ou spongieuse. Le nombre et le type de ramifications (insertion, organisation et hiérarchisation de ces ramifications par rapport à l'axe principal) sont des critères importants pour identifier les algues. Certaines algues présentent un thalle très rigide, suite à l'accumulation de carbonate de calcium ou aragonite, dans les parois de leurs cellules (**Reviere, 2002**).

Les cellules des algues possèdent les mêmes éléments de structure que celles des plantes supérieures. Elles ont une paroi cellulaire partiellement cellulosique, des petits noyaux et des plastes pigmentés ou chromatophores qui comporte de la chlorophylle souvent masquée par des pigments surnuméraires qui donnent aux thalles des couleurs (**Garons et Larderaï, 2004**). La photosynthèse des algues permet de fixer le carbone atmosphérique ou dissous dans l'eau à partir de l'énergie lumineuse pour produire de la biomasse. Les algues utilisent différents pigments chlorophylliens leur permettant de capter des photons de diverses longueurs d'onde (**Person, 2010**).

Elles ont des formes et des dimensions très variables. Certaines sont microscopiques et d'autre mesurent plusieurs mètres de longueur, mais elles ont toutes de caractères communs. Elles sont essentiellement aquatiques dans les eaux douces, marines et saumâtres. Elles comprennent 20 000 à 30 000 espèces dans le monde.

On distingue deux grandes catégories d'algues : les microalgues, organismes unicellulaire et les macroalgues, végétaux macroscopiques. (Voir Figure 01)

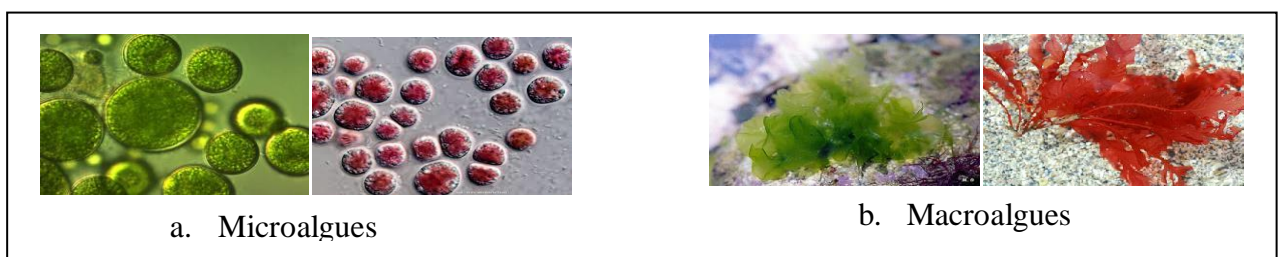


Figure 01 : Les algues

I.2. Groupes d'algues :

I.2.1. Macroalgues :

Les algues macroscopiques se distinguent par rapport aux autres végétaux par leur thalle, appareil végétatif pluricellulaire, dépourvu de racines, de tige, de feuilles ou de fleurs. En effet, l'algue possède des crampons qui lui permettent de se fixer au substratum. Elle n'a pas besoin de racines pour s'alimenter car elle absorbe les nutriments par toute sa surface en contact avec l'eau.

Les macro-algues ne possèdent pas non plus de vaisseaux conducteurs sauf quelques ébauches rudimentaires chez certaines algues brunes comme les laminaires et les fucus. Les crampons sont surmontés d'un pédoncule appelé le stipe, qui se termine par une arborescence ou plusieurs ramifications appelées frondes (**Garon, 2004 ; Leclerc et Floch, 2010**).

Cependant, les cellules des algues possèdent les mêmes éléments de structure que celles des plantes supérieures. Elles ont une paroi cellulaire partiellement cellulosique, des petits noyaux et des plastes pigmentés ou chromatophores (**Garon, 2004**).

Les macroalgues peuvent être considérées comme des organismes généralement inféodés aux zones humides (d'eau marines, d'eau saumâtre ou d'eau douce) (**Person, 2010**).

I.2.1.1. Classification :

Les caractères d'ordre morphologique, cytologique et biochimique (la nature des pigments photosynthétiques + la nature des polyholosides de réserve et de soutien) sont ceux qui ont le rôle le plus important dans la classification (**Ilitis, 1980**).

En effet, les algues sont un groupe d'organismes très diversifiés qui varient en forme et en grosseur : unicellulaire, multicellulaire, coloniale, filamenteuse, amas de protoplastes (**Memory, 2006**).

La composition pigmentaire (voir Tableau 01) basée sur les trois types de pigments suivants : les chlorophylles, les caroténoïdes et les phycobiliprotéines permet de répartir les algues en plusieurs divisions (**Leclerc et Floch, 2010**).

Tableau 01 : Caractéristiques importantes des groupes d'algues (**Demoulin et Leymergie, 2009**).

Embranchement (Règne)	Nom commun	Nombre d'espèces	Pigments	habitat
Chlorophytes (Protistes)	Algues vertes	7500 d'espèces	Chlorophylls (a, b) Xanthophylles Carotènes	Eau douce, saumâtre salée et terrestre
Phéophytes (plantes)	Algues brunes	1500 d'espèces	Chlorophylle (a, c) Xanthophylles Carotènes Fucoxanthine	Eau salée et saumâtre
Rhodophytes (plantes)	Algues rouges	3900 d'espèces	Chlorophylle (a) Xanthophylle s Carotènes, Zéaxanthine, Phycocyanine C, Phycoérythrine	Eau douce, saumâtre et salée

Les critères de classification des macroalgues permettent de définir plusieurs grandes groupes sont :

a. Algues brunes (Phéophycées) :

Il existe autour de 1800 espèces de macroalgues brunes (**Person, 2010**). La couleur brune de ces algues résulte de la dominance des pigments xanthophylles et surtout la fucoxanthine (Voir Figure 02), qui masque les autres pigments (chlorophylle a et c, ainsi que le β -carotène). Toutes possèdent une structure pluricellulaire, mais leur dimension varie depuis les éléments microscopiques jusqu'aux très grands spécimens (**Garon, 2004**).



Figure 02 : Algue brune (Phéophycée).

b. Algues rouges (Rhodophycées) :

Les rhodophytes forment un groupe très diversifié, on répertorie environ 6000 espèces de macro-algues rouges (**Person, 2010**). Ces algues doivent leur couleur à la présence de plastes roses dans lesquels un pigment rouge (Voir Figure 03), la phycoérythrine, est associé à plusieurs autres pigments dont les chlorophylles. La plupart de ces algues rouges sont pluricellulaires et marines et quelques-unes vivent également en eau douce. Les algues rouges sont divisées en deux groupes : celui des Bangiophycées (qualifiées de primitives) et celui des Floridéophycées (plus complexes). Elles se distinguent généralement par leur cycle de reproduction particulièrement complexe (**Garon, 2004**).



Figure 03. Algue rouge (Rhodophycée)

c. Algues vertes (Chlorophycées) :

Elles sont de formes très variées. Leurs plastes sont colorés en vert par les chlorophylles a et b, auxquelles sont associés des carotènes et des xanthophylles (Voir Figure 04). La photosynthèse permet la formation d'amidon, comme pour les plantes supérieures. La plupart des algues vertes vivent en eau douce ou en milieux marins, mais certaines espèces peuvent également se développer sur terre. Elles jouent un rôle important dans l'oxygénation des eaux, favorisant ainsi la vie animale (**Garon, 2004**). Il a été recensé approximativement 1200 espèces de macro-algues vertes (**Person, 2010**).



Figure 04 : Algue verte (Chlorophycée)

I.2.1.2. Composition biochimiques des macroalgues :

La composition chimique des algues varie en fonction de l'espèce, la maturité, l'habitat et les conditions environnementales (**Ortiz et al, 2006**). Les algues se composent généralement d'une fraction minérale variée, de protéines bien équilibrées en acides aminés, d'une faible quantité de lipides riche en AGPI, ainsi qu'une proportion élevée en polysaccharides (**Mabeau et Fleurence, 1993**).

a. Polysaccharides :

Le fort intérêt des macroalgues réside non seulement dans leur richesse en polysaccharides classiques, comme ceux trouvés dans des plantes supérieures (amidon, cellulose), mais surtout dans leur richesse en polysaccharides très particulier : les phycocolloïdes (**Person, 2010**).

Les algues constituent des sources importantes de polysaccharides de 32 à 74%, ayant des structures variées et originales, différentes des fibres des végétaux terrestres (**Lahaye, 1991 ; Leclerc et Floc'h, 2010 ; Zitouni, 2015**). La majeure partie de ces polysaccharides n'est pas digérée par les enzymes endogènes humaines et peuvent être considérés comme des fibres alimentaires.

b. Protéines :

La teneur en protéines des algues est variable de phylum à phylum. Généralement, la fraction protéique la plus élevée est enregistrée chez les algues vertes et rouges (10-47% de matière sèche), alors qu'elle est généralement petite chez les algues brunes(5-24% MS) (**Fleurence, 1999 ; Matanjun et al, 2009**). Certaines espèces d'algues rouges telles que *Porphyra sp* commercialement cultivée possèdent une fraction protéique qui s'étend de 30 à 50%. Cesteneurs peuvent être comparables, du point de vue quantitatif, à

celles des légumineuses comme le soja (35%) (**Mohamed et al, 2012**).

Les protéines trouvées dans les algues contiennent tous les acides aminés essentiels. La leucine, la valine et la méthionine sont les plus abondants, et leurs teneurs sont comparables à ceux de l'ovalbumine. Les concentrations en isoleucine et thréonine sont similaires à ceux rapportées dans les protéines de légumes (**Bocanegra et al, 2009**). La leucine, la phenylalanine et la valine sont les acides aminés essentiels majeurs chez *Ulva rigida*, alors que la teneur en histidine est similaire à celle trouvée dans les légumes et les œufs (**Taboada et al, 2009 ; Lordan et al, 2011**). D'autres comme *Ulva spp.* contiennent 26 et 32% des acides aminés totaux, en acide aspartique et glutamique, respectivement (**Fleurence, 1999**), ce qui explique leurs propriétés de rehausseur de goût.

Les biliprotéines des algues rouges sont utilisées comme marqueurs fluorescents. Il existe trois types de phycobiliprotéines : l'allophycocyanine, la Phycocyanine et la phycoérythrine (**Tierney et al, 2010**). Les phycobiliprotéines ont montré en plus des propriétés antioxydantes qui sont bénéfiques pour la prévention et le traitement des maladies neurodégénératives, le cancer et les ulcères gastriques, des propriétés anti-inflammatoires et antivirales (**Holdt et Kraan, 2011**).

Une autre importante protéine active qui peut être extraite des macro-algues est la lectine, qui se lie aux carbohydrates et participe à différents processus biologiques tels que les communications intracellulaires. Les lectines possèdent également des activités antibactériennes, antivirales ou anti-inflammatoires (**Chojnacka et al, 2012**).

c. Lipides :

La teneur lipidique est très variée de 1-5% (**Person, 2010**). Les phospholipides et les glycolipides sont les principales classes de lipides et les algues accumulent des AGPI, lorsqu'il y a chute de la température environnementale (**Holdt et Kraan, 2011**).

Du point de vue qualitatif, les lipides algaux présentent une proportion en AG essentiels importante, qui sont les ω -3 polyinsaturés (acides α -linoléique, eicosapentaénoïque) à activité antioxydante. Ces acides gras protègent des maladies cardiovasculaires et cérébro-vasculaires et sont actifs contre les œdèmes, les inflammations et les érythèmes (**Chouikhi, 2013**).

Les algues vertes ont une teneur en acide oléique (C18:1) et en acide α -linoléique (C18:3 ω 3) (acides gras indispensables, non synthétisés par l'homme) beaucoup plus élevée que les végétaux supérieurs. Les algues rouges contiennent des taux élevés d'acides gras polyinsaturés à 20 carbones. On trouve également de l'acide arachidonique (C20:4 ω 6) et des acides gras polyinsaturés à 18 carbones. L'acide eicosapentaénoïque (C20:5 ω 3) constitue 50% des acides gras polyinsaturés chez les algues rouges *Porphyra sp.* Et *Palmaria palmata* (Darcy, 1993). Quant aux algues brunes, elles ont une distribution en acides gras comparable à celle des algues rouges. À ce jour, aucune étude n'a rapporté la présence d'acides gras trans indésirables chez les macroalgues.

Les lipides algaux sont des sources de stérols particulières, qui sont une caractéristique intéressante de quelques algues brunes (Fucostérol). Leur contribution comme source d'énergie alimentaire semble faible, en revanche, les phytostérols présentent des activités antifongiques, antibactériennes, anti-inflammatoires, anti-tumorales, antioxydantes et anticholestérol (Sánchez et al, 2004 ; Hamid et al, 2015).

d. Minéraux :

Les algues possèdent une composition minérale élevée qui varie selon le phylum et divers autre facteur (variation saisonnière, environnementale, géographique et physiologique), d'où une fraction minérale qui peut représenter jusqu'à 40% de la masse sèche. Les algues brunes, vertes et rouges ont des quantités équivalentes en matières minérales totales. Cependant, les algues vertes en ont un taux un peu inférieur par rapport aux deux autres catégories d'algues qui possèdent un contenu très élevé en minéraux (15-36% d'algues séchées)(Person, 2010).

La plupart des macroalgues ont des teneurs élevées en macroéléments tels que le sodium, le magnésium, le potassium, le calcium, le phosphore, le chlore, le soufre, ainsi qu'une grande variété d'oligoéléments. Parmi lesquels : de l'iode, du zinc, du fer, de l'aluminium, du manganèse, du nickel, du sélénium, du cuivre, du molybdène, du fluor, du bore, du cobalt ; De l'étain, de l'argent, du plomb, du bismuth, une forme toxique d'arsenic, de l'antimoine, du lithium, de l'or, du baryum, du strontium et du titane. Il est donc fondamental, que les algues alimentaires se développent dans des milieux exempts de pollution (Hortense, 2011).

I.2.1.3. Culture des macroalgues :

Les techniques de culture sont aujourd'hui maîtrisées pour une partie des espèces disposant déjà d'applications commerciales (alimentation, agroalimentaire). Le principal enjeu associé à la culture des macro-algues dans l'optique d'une production de biocarburants est la maîtrise du changement d'échelle nécessaire à son industrialisation et à la baisse de ses coûts de production.

En effet, la culture des macro-algues est relativement intensive en main d'œuvre, mais surtout, le passage à une grande échelle de production nécessiterait de passer des zones proches de la côte (généralement saturées) à une culture en pleine mer, ce qui pose aujourd'hui des problèmes majeurs d'ancrage à ces profondeurs. Des projets d'intérêt ont lieu pour évaluer le potentiel de la culture des macroalgues en association avec des parcs éoliens offshore, mais les surfaces restent limitées.

Les modes de culture des algues varient selon le mode de reproduction, sexué ou asexué, des espèces ciblées. Les algues capables de se multiplier simplement par voie asexuée (ou dite végétative, exemple : Ulves) permettent une culture rapide et facile de la biomasse. Les différents techniques de cultures utilisées, se base sur cette particularité. Les algues sont cultivés sur différents substrats : cordes, cordage, filet, bloc rocheux.

Il faut ensemer se manière régulière. Les techniques de bouturage consistent à insérer périodiquement des brins d'algues entre les torons de cordage qui seront suspendus en mer, de les attacher à un fil fin ou d'ensemencer des filets avec un broyat d'algues (voir Figure 05).

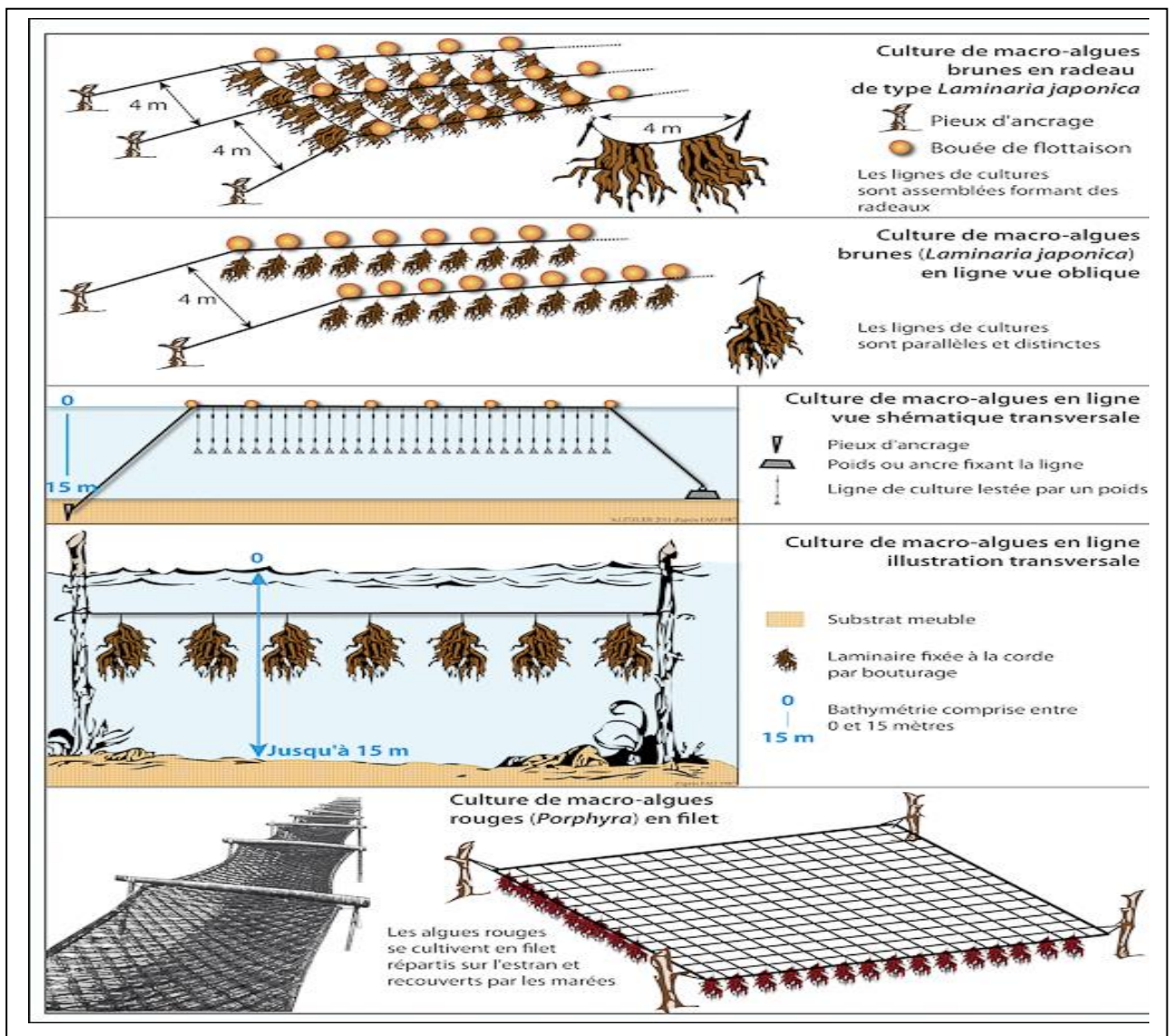


Figure 05 : La culture des algues brunes et rouge en radeaux, cordes et filets

Certaines macroalgues peuvent être cultivées en bassin à terre. Cette technique de culture consiste à pomper l'eau de mer et filtrer l'eau rejetée avec une agitation par roue à aube, ou en bac agité par un bullage intense basse pression dans des bassins circulaire ou de type raceway (voir Figure 06).



Figure 06 : Culture des macroalgues dans des bassins de type raceway

I.2.1.4. Application des macroalgues :

Les macroalgues sont utilisées on domaines suivant :

- **Domaine agriculture :**

Les algues sont principalement utilisées comme ingrédient dans la fabrication d'aliments pour le bétail ou comme des engrais, qui permettent de retenir l'eau dans le sol, d'améliorer sa texture, de maintenir et d'enrichir le sol par des traces de métaux (Cu, Co, Zn, Mn, Fe, N) (Lakhdar, 2018), et également de fournir un renforcement des défenses naturelles des plantes contre certains pathogènes des cultures, une augmentation de taux de croissance et de germination des graines, une bonne résistance aux stress biotiques et abiotiques, une amélioration de l'absorption des nutriments, un changement dans la composition des tissus des plantes et un développement plus profond des racines (Betit et Chiha, 2019).

- **Domaine cosmétique :**

Les métabolites dérivés d'algues ont été répertoriés comme actifs dans les soins antiâges de la peau, amincissant, antioxydant, photo protecteur et hydratant. Plusieurs espèces d'algues appartenant à différents groupes sont utilisées en cosmétologie (Lakhdar, 2018).

- **Domaine pharmaceutique :**

Les macroalgues occupent une place importante en tant que source de composés biomédicaux. Environ 2 400 produits naturels ont été isolés à partir d'algues. L'alginate est utilisé comme agent désintégrant et dispersant et dans la fabrication de compresse et comme principe actif de médicament. En industrie pharmaceutique, les algues et leurs produits sont utilisés pour le développement de nouveaux médicaments contre le cancer, l'inflammation et les infections microbiennes (Betit et Chiha, 2019).

- **Domaine environnementale :**

L'utilisation des populations de macroalgues à grande échelle peut fournir des technologies nouvelles et rentables pour la réduction de la diffusion des contaminants d'origine hydrique comme les métaux lourds, les bactéries pathogènes, les virus, etc. (Chouikhi, 2013). Les algues constituent un moyen potentiel pour la restauration de la croissance des cultures sous stress abiotique grâce à leurs composants chimiques et leur valeur nutritionnelle ainsi qu'aux propriétés physiques de leurs polysaccharides qui améliorent la structure du sol (Memory, 2006).

- **Domaine Industrie chimique :**

Les frustules (enveloppes externes des diatomées) siliceux, accumulés sous forme de gisements fossiles de tripoli ou kieselguhr, sont utilisés comme abrasifs, ou isolants phoniques ou thermiques. Les colles, peintures, résines, caoutchoucs, savons utilisent des produits extraits d'algues.

- **Domaine énergétique :**

La valorisation de la biomasse algale peut se traduire par la production de bioénergie sous forme de biocarburant exemple de production de biodiesel (l'un des espèces utilisé dans la production du biodiesel est : *Cystoseira amentacea var. stricta*).

I.2.2. Microalgues :

Les microalgues sont des organismes unicellulaires. Ce sont des végétaux aquatiques présentes dans toutes les milieux (eau douce, eaux salée et saumâtre) dont l'ordre de grandeur varie de 10 à 100 μm . Elles se multiplient le plus souvent par voie nonsexuée. Il en existe entre 200 000 et 1 000 000 espèces dont 30 000 sont connues à l'heure actuelle et seulement une dizaine est cultivée.

Tout comme les cyanobactéries, les microalgues sont des organismes photosynthétiques utilisant la lumière du soleil comme source d'énergie afin de fixer le dioxyde de carbone. Les lipides contenus dans les micro-algues représentent jusqu'à 80 % de leur poids sec et sont majoritairement sous forme de triglycérides. Les triglycérides sont une forme de lipides comme le cholestérol ; ils sont composés de molécules de glycérol et d'acide gras. Ils sont présents dans notre organisme et constitue une source importante d'énergie pour notre corps. Les lipides présents dans les microalgues peuvent eux être utilisés dans le but de produire du biodiesel.

Une microalgue est délimitée par une membrane plasmique contenant au sein de son cytoplasme de nombreux organites : les chloroplastes, les amyloplastes, les oléoplastes, les mitochondries et son noyau entouré de son enveloppe. Ces derniers sont nécessaires au bon fonctionnement de la micro-algue ainsi qu'à son métabolisme.

I.2.2.1. Classification :

Les micro-algues sont très diversifiées et environ 30 000 espèces ont déjà été caractérisées. Ce nombre représente moins de 10 % du total existant estimé. En 2000, près d'une cinquantaine seulement ont été étudiées en détails (**Michel Cavalla, 2000**) et une dizaine d'espèces seulement sont exploitées au niveau industriel et commercial.

Les scientifiques ont analysé les micro-algues pour les distinguer et les diviser en plusieurs classes selon des critères généraux comme la pigmentation, la structure biologique et le métabolisme. Ces micro-organismes constituent un groupe très diversifié, dans lequel nous retrouvons des espèces procaryotes (micro-algues bleues ou cyanobactéries) et eucaryotes (microalgues vertes, rouges et brunes).

Les microalgues eucaryotes possèdent une structure cellulaire végétale classique compartimentée, avec ou sans paroi cellulosique, et avec des pigments photosynthétiques renfermés dans les chloroplastes.

Les micro-algues procaryotes ont une structure bactérienne classique sans compartiment, les pigments photosynthétiques sont contenus dans des membranes lamellaires.

D'un point de vue taxonomique, le classement des micro-algues se fait sur la diversité de leurs propriétés et notamment leurs caractéristiques morphologiques, la pigmentation ou encore l'organisation des membranes (**G. E. Fogg, 1953**).

Par comparaison, la diversité des plantes supérieures est de l'ordre de 400 000 espèces. La classification (Voir Tableau 02) de cette diversité est complexe et la taxonomie est sujette à de fréquents bouleversements du fait notamment de l'utilisation des techniques de phylogénie moléculaire. (**Sialve et Steyer, 2013**).

Tableau 02 : Caractéristiques importantes des groupes des microalgues.

Classe	Nom commun	Nombre d'espèces	Pigments	habitat
Les Cyanophycées (Procaryotes)	Cyanobactéries, Algues bleues	2000 d'espèces	Chlorophylle (a), Zéaxanthine Phycocyanine, Phycoérythrine, β -carotène	Eau douce , salée, saumâtre et dans le sole
Les Diatomées (Eucaryotes)	Algues brunes	100 000 d'espèces	Chlorophylle (a, c) β -carotène Fucoxanthine Néofucoxanthine Diadixanthine Diatoxanthine	Eau douce, salée et saumâtre
Les chlorophycées (Eucaryotes)	Algues vertes	2000 d'espèces	Chlorophylle (a,b) Alloxanthine Monadoxanthine Crocoxanthine	Eau douce et sale
Les chrysophycées (Eucaryotes)	Algues dorées	1 000 d'espèces	Chlorophylle (a, c), Caroténoïdes jaunes	Eau douce et sale
Les Rhodophycées (Eucaryotes)	Algues rouges	4000 d'espèces	Chlorophylle (a) Carotènes, Allophycocyanine Phycocyanine Phycoérythrine	Eau saumâtre et sale
Les euglenophycées (Eucaryotes)	Algues vertes	800 D'espèces	Chlorophylle (a, b) Xanthophylles Carotènes	Eau douce, salée et saumâtre

Il existe deux groupes des microalgues, celles appartenant au groupe des eucaryotes, c'est-à-dire possédant des organites cellulaires (noyau, chloroplaste, mitochondries ...) et celles appartenant au groupe des procaryotes, ce sont des organismes ne possédant pas d'organite cellulaires.

- **Les procaryotes** : ce sont des organismes unicellulaires qui sont dépourvus de noyau et ne présentent que très rarement des organites cellulaires.
- *Les Cyanophycées* : appelées également cyanobactéries, sont des microalgues procaryotes de coloration bleu-verte (Voir Figure 07) de petites tailles (10 μm) qui peuvent se développer dans quasiment tous les habitats : eaux douces, salées, saumâtres et également dans les sols grâce à leur capacité à résister aux conditions climatiques extrêmes. Malgré ses aptitudes à se développer dans des milieux extrêmes, les Cyanophycées possèdent des températures de croissance optimales aux alentours de 30-35°C. La seule exigence des Cyanophycées est la présence obligatoire de lumière c'est pourquoi on les considère comme des organismes autotrophes obligatoires. En cas d'absence de lumière, certaines espèces de Cyanophycées sont en mesure d'oxyder certains sucres présents dans leur composition. De façon générale, elles emmagasinent principalement leur énergie sous forme d'amidon ou encore sous forme de lipides. Elles sont environ 2000 espèces dans ce groupe pouvant être divisées en 150 genres. Les espèces les plus connues sont *Spirulina*, *Nostoc commune* et *Aphanizomenon flos-aquae* (Pulz et Gross, 2004).



Figure 07 : Photographie d'une Cyanobactérie *Anabaena*.

- **Les Eucaryotes** : Ce sont des organismes uni ou pluricellulaires qui présentent une structure complexe contenant un noyau entouré d'une membrane ainsi que plusieurs organites intracellulaires : chloroplastes, amyloplastes, oléoplastes, ... (Voir Figure 08).

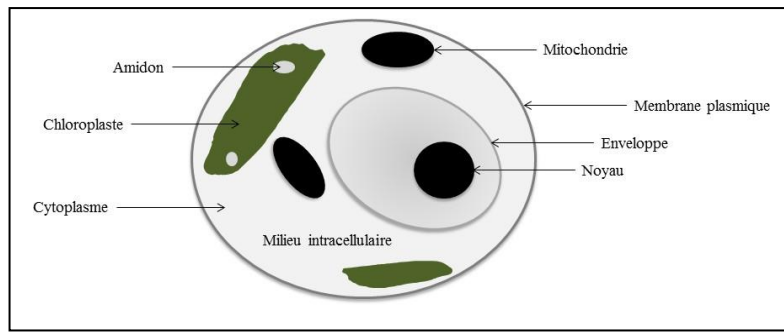


Figure 08 : Schéma d'une structure de microalgue unicellulaire.

- **Les Diatomées** : appelées également les *Bacillariophycées* qui représentent le groupe majoritaire des diatomées et sont très répandues dans tous les types d'habitats. Plus de 100 000 espèces sont connues et il en existerait plus d'un million. Les *Bacillariophycées* sont unicellulaires et mesurent de 2µm à 1mm. Ils emmagasinent leurs réserves sous forme de *chrysolaminaran*, un polysaccharide, ainsi qu'en lipides. Ces espèces sont d'ailleurs reconnues pour leur contenu en acides gras et pendant plusieurs années, les scientifiques croyaient que les lipides représentaient leurs seuls composés de réserve. Les composants majeurs de ces lipides sont les triglycérides. Les micro-algues telles que *Nitzschia sp.* et *Navicula pelliculosa* (Voir Figure 09) sont intéressantes pour la production de biocarburant en mode hétérotrophe grâce à leur taux élevé en acides gras (**Chinnasamy et al, 2010**).

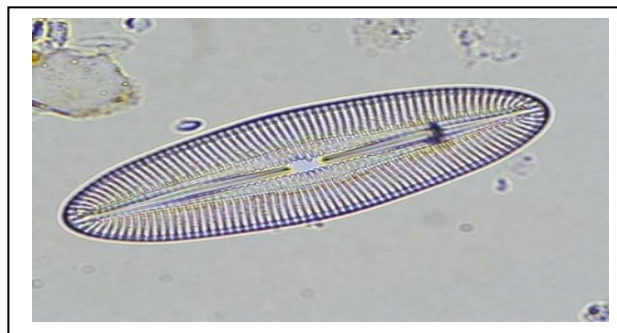


Figure 09 : Photographie d'une Bacillariophycée *Navicula*.

- **Les Chlorophycées** : ce sont des microalgues vertes retrouvées dans tous les types d'habitat et, l'amidon et les lipides représentent leurs principales réserves énergétiques. Les espèces présentes dans ce groupe peuvent à la fois avoir un métabolisme autotrophe ou hétérotrophe. L'espèce la plus répandue et la plus étudiée actuellement est *Chlorella vulgaris* (Voir Figure 10) mais on peut également citer *Chlamydomonas*, *Dunaliella* et *Haematococcus* (**Pulz et Gross, 2004**).

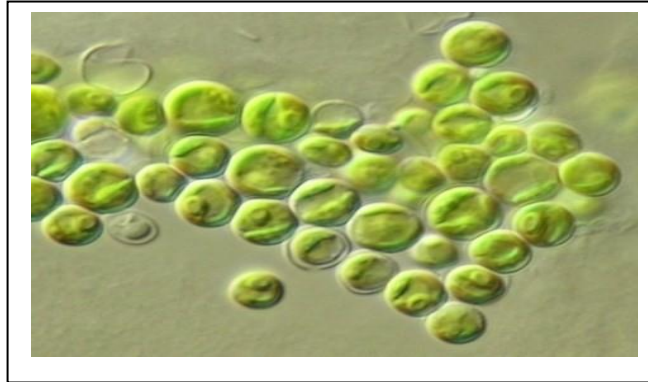


Figure 10 : Photographie d'une Chlorophycée *Chlorella vulgaris*.

- **Les Chrysophycées** : appelées aussi algues dorées (Voir Figure 11), elles se retrouvent surtout en eaux douces et on en compte environ 1 000 espèces. Elles sont pourvues de chlorophylle a et c et de caroténoïdes jaunes. Elles ressemblent aux diatomées mais elles peuvent arborer plus de couleurs que ces dernières : du jaune au brun en passant par l'orange.



Figure 11 : Photographie d'une Chrysophycée *Dinobryon*.

- **Les Rhodophycées** : elles représentent les algues rouges ; il en existe près de 4000 espèces qui se développent essentiellement dans les eaux saumâtres voire salées. La plupart des Rhodophycées sont des organismes photoautotrophes qui ont besoin de lumière et de CO₂ pour se développer (Voir Figure 12).

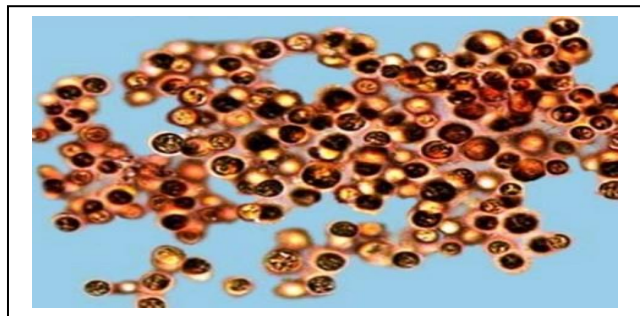


Figure 12 : Photographie d'une Rhodophycée *Rhodorus marinus*

- **Les Euglenophycées** : Il existe près de 800 espèces d'Euglenophycées qui sont retrouvées généralement dans les eaux saumâtres et douces. Ces algues sont essentiellement constituées de *paramylon*, substance glucidique, et d'huile. Il est difficile de définir un mode de culture pour ces algues qui peuvent croître autant en milieu autotrophe qu'en milieu hétérotrophe notamment pour l'espèce *Euglena gracilis* (Voir Figure 13). En absence de lumière, les Euglenophycées produisent une substance contenant des acides organiques, de l'acétate, de l'alcool et des sucres, possédant un réel intérêt pour la production d'acides gras.



Figure 13 : Photographie d'une Euglenophycée *Euglena*.

I.2.2.2. Composition biochimique :

Les microalgues sont composées des grandes classes de biomolécules, comme chez les autres organismes vivants, mais dans cette famille, leur diversité est exceptionnelle. De plus, le contenu biochimique des microalgues peut être fortement modifié selon les conditions de croissance de l'organisme (**Beer et al, 2009**). Il est ainsi possible de manipuler les conditions de culture d'une algue afin d'en modifier le contenu biochimique. L'étude du contrôle des conditions de culture d'une microalgue fait l'objet de la suite de cet exposé.

Les sucres (carbohydrates) sont souvent stockés sous forme d'amidon ou d'un sucre de structure similaire. Des grains d'amidon peuvent être aisément observés au microscope optique à l'intérieur des cellules. Le squelette de base de l'amidon peut être un glucane à liaison α -1,4 ou β -1,3. Leur degré de polymérisation est très variable (**Andersen, 2013**).

La diversité des protéines d'algues est également très importante. La composition protéique peut être modifiée en changeant les conditions environnementales (**Grossman et al, 1995**).

Les cyanobactéries, avec leur paroi cellulaire en peptidoglycanes, sont très riches en protéines (40 à 60 %MS) par exemple chez *Arthrospira* ou *Synechococcus* (**Becker, 2007**).

Les algues vertes sont également riches en protéines (30 à 60 %MS chez *Euglena* ou *Porphyridium*). Les cellules en croissance active, en phase de division cellulaire sont souvent plus riches en protéines. En phase stationnaire, elles sont plus riches en lipides. Certaines algues ont la capacité de stocker de l'azote sous forme de protéines. Lorsque ce nutriment devient limitant, l'algue peut relarguer l'azote nécessaire à partir des protéines accumulées. Certaines algues accumulent une grande quantité de RuBisCo, enzyme cruciale pour la photosynthèse. Cette accumulation est appelée pyrénoïde et peut être très utile à la cellule en cas de déficit en azote dans l'environnement (**Kuchitsu *et al*, 1988**).

Les lipides existent chez les algues également sous une grande diversité de structures. Une grande diversité d'acides gras et de stérols existe. Ils sont présents dans les membranes cellulaires et sont donc plus difficiles à extraire que les autres types de lipides qui s'accumulent sous forme d'inclusions. Les galactolipides sont les constituants les plus abondants des membranes des thylakoïdes. Dans les inclusions, sont retrouvés le plus souvent des lipides de réserve. Parmi eux, on compte des acides gras polyinsaturés (AGPI), dont notamment de l'acide arachidonique ($\omega 3$), de l'acide docosahexaénoïque (DHA), de l'acide eicosapentaénoïque (EPA). Les hydrocarbures (HC) sont rarement retrouvés en forte proportion chez les algues. Seules quelques espèces. Il a noté que la composition en lipides est très liée aux conditions de culture, en particulier la concentration en azote dans le milieu de culture. En effet, de nombreuses algues vertes accumulent des lipides en conditions de stress, notamment une carence en azote (**Guschina et Harwood, 2006**).

I.2.2.3. Culture des microalgues :

La production de micro- algues est en forte augmentation à travers le monde peut se faire en eaux salées, saumâtres ou eau douce. La production annuelle est estimée à 6 000 tonnes par an de matière sèche (**Pulz, 2001**). La culture des micro-algues à grande échelle peut être conduite selon deux modes, soit à l'aide de bassins ouverts à haut rendement, le raceway ou dans une enceinte transparente fermée utilisant la lumière naturelle ou artificielle, le photobioréacteur.

➤ Culture en milieu ouvert raceway :

Les systèmes de culture en milieu ouvert (bassins, « raceways ») sont des étangs de recirculation en boucle fermée avec une profondeur de quelques dizaines de centimètres. Ce sont des technologies simples et présentant peu d'investissement initial (Voir Figure 14).

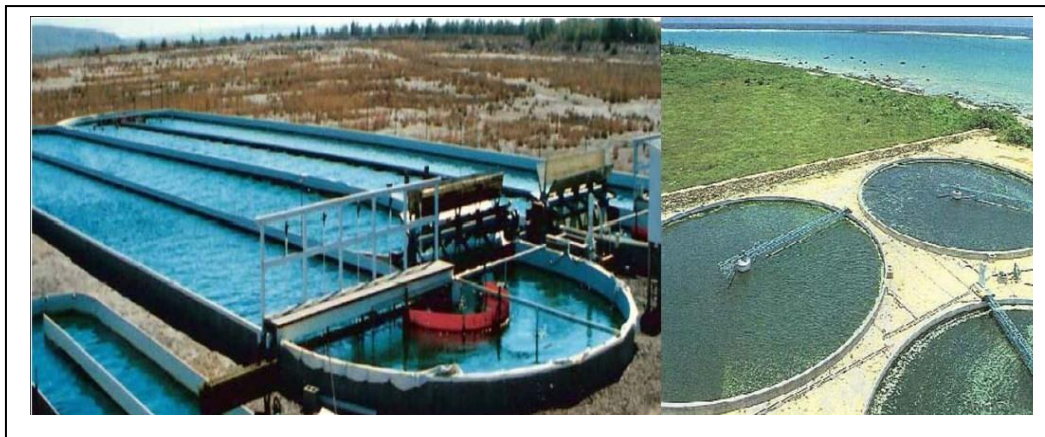


Figure 14 : Bassins de culture de micro-algues. A gauche : bassin en boucle fermée, infrastructure de Roswell, Nouveau Mexique (USA) A droite : bassins circulaires d'environ 500 m², production de chlorelle.

Le mélange et la circulation du milieu sont possibles grâce à une roue à aube : le flux est guidé par la vitesse de rotation de cette roue. Un bullage permet un apport en CO₂ mais le transfert dans la phase liquide est souvent compliqué à cause de la faible profondeur des bassins. La température du milieu fluctue selon les cycles diurnes (nuit) et saisonniers. Toutefois peu d'espèces de micro-algues peuvent être cultivées en milieu ouvert de manière mono-spécifique. Pour toute culture selon ce mode, la principale contrainte est le risque de contamination par d'autres espèces de micro-algues ou d'autres micro-organismes comme des bactéries. C'est pourquoi, les cultures actuelles se faisant à ciel ouvert concernent des espèces de micro-algues poussant dans des milieux très sélectifs telles que *Dunaliella salina* qui se développe en milieu hyper salin. Les rendements atteints avec ces systèmes ne sont pas optimaux à cause de la difficulté à contrôler les facteurs environnementaux (hauteur de la lame d'eau, échauffement du bassin, phénomènes d'évaporation, etc.). La concentration en biomasse pour ce type de culture est généralement peu élevée car l'agitation du milieu est faible et des zones non agitées peuvent subsister C'est ce mode de culture qui a été choisi pour la culture des micro-algues dans le projet Salin algae (Voir Figure 15).



Figure 15 : Bassins construits dans le cadre du projet Salin algue à Gruissan.

➤ **Culture en milieu fermé ou photobioréacteur (PBR) :**

Le photobioréacteur tubulaire (PBR) est une association de plusieurs tubes transparents en plastique ou en verre (Voir Figure 16). La source de lumière peut être naturelle ou artificielle. Les tubes sont généralement de 10 cm de diamètre, facilitant la pénétration de la lumière à l'intérieur du tube. Ce milieu clos et hermétique évite les contaminations extérieures et permet la production de biomasse à large échelle (Carvalho *et al*, 2006; Pulz, 2001).

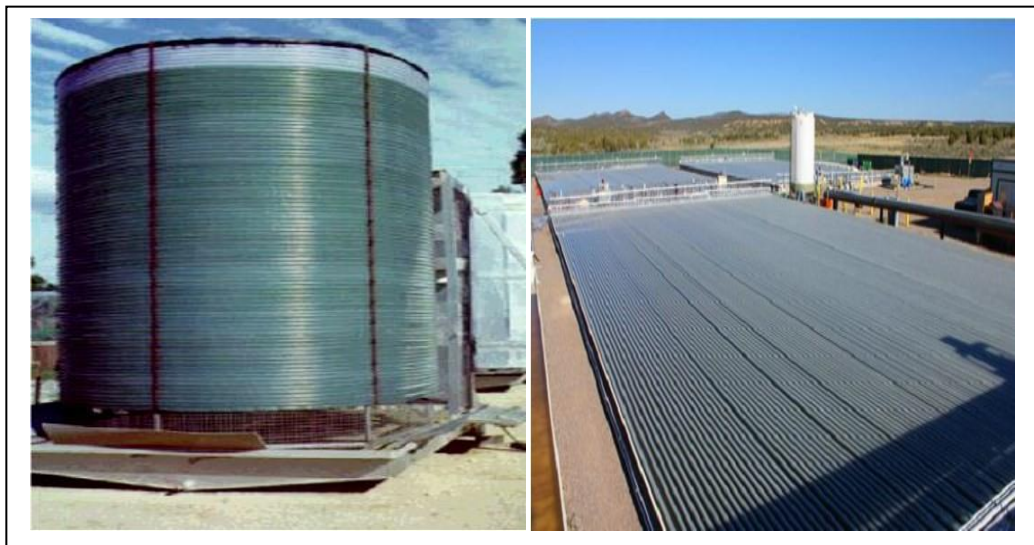


Figure 16 : Photographies de différentes installations de PBR tubulaires. A gauche : PBRhéliçoïdal, vertical. A droite : PBR tubulaire horizontal immergé dans l'eau.

L'injection d'air permet de fournir du carbone sous forme de CO_2 , de brasser le milieu et d'évacuer les poches d'oxygène toxique pour les micro-algues. Un système de dégazage est nécessaire pour évacuer l'oxygène accumulé toxique pour les micro-algues (voire Figure 17). La suspension micro-algale circule du réservoir jusqu'aux tubes qui vont capter la lumière puis des tubes vers le réservoir ; la culture se fait de façon continue.

. Dans le cas de la lumière naturelle, l'arrangement des tubes se fait souvent du nord vers le sud pour assurer un ensoleillement maximal et parallèle ou horizontal pour que chaque tube puisse recevoir le même taux d'ensoleillement (Sánchez Mirón *et al*, 1999).

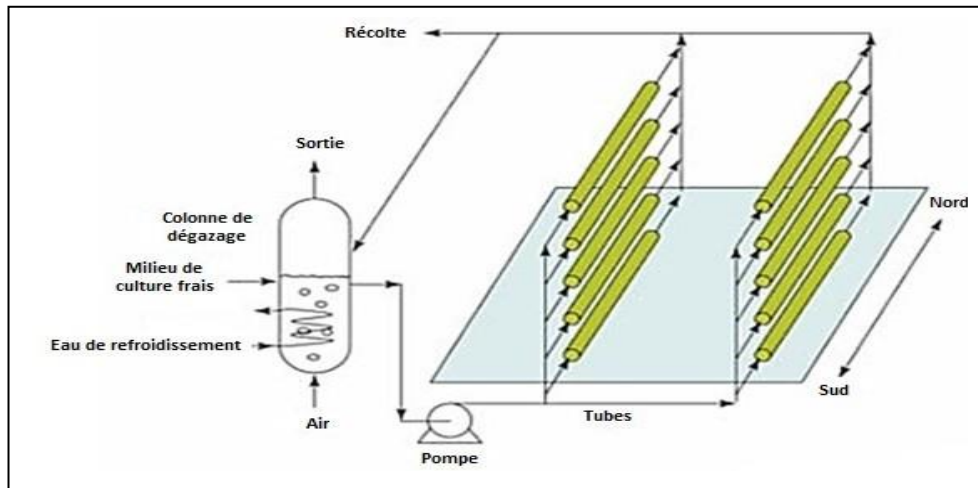


Figure 17 : Schéma de principe d'un PBR

La lumière artificielle des PBR est techniquement réalisable mais elle représente un coût important comparé à la lumière naturelle. Le contrôle de la température est un élément important à prendre en compte pour les photobioréacteurs. Un système d'échangeur de chaleur est nécessaire pour refroidir le milieu de culture qui est recyclé. Les systèmes fermés permettent d'exploiter une gamme de micro-algues plus larges, d'atteindre de meilleurs rendements et de s'affranchir des problèmes de contaminations. Les coûts de production via cette méthode sont cependant beaucoup plus élevés qu'en bassin ouvert. Ce mode de culture est réservé aux micro-algues à hautes valeurs ajoutées.

I.2.2.4. Application des microalgues :

Au vu de leur biodiversité et leurs propriétés biochimiques, les microalgues se révèlent être prometteuses pour de nombreuses applications tels que l'industrie pharmaceutique, agroalimentaire, l'environnement et les énergies renouvelables.

- **Domaine alimentaire :**

Les microalgues constituent un réel apport nutritif. Ces microorganismes sont utilisés dans l'alimentation animale et humaine, et dans l'aquaculture (Pulz *et al*, 2004). La biomasse peut être produite sous forme de poudre, tablettes, capsules, pastilles. Les microalgues sont considérées comme une source potentielle d'acide gras polyinsaturé

(**Jiang et al, 1999**), destinée à l'alimentation humaine et animale. Ces organismes sont susceptibles de synthétiser des AGPI de la série $\omega 3$.

Les microalgues ont un potentiel intéressant de production de pigments (**Lorenz et Cysewski, 2000**), les caroténoïdes sont de plus en plus employés dans l'industrie alimentaire, Suite à la pression du consommateur et à l'augmentation des réglementations limitant l'utilisation des colorants artificiels (**Gordon et Bouernfeind, 1982**).

- **Domaine pharmaceutique :**

Au vu de leur grande diversité biochimique, les microalgues représente une source intéressante de molécules bioactives et de toxines utilisables dans le développement de nouveaux médicaments. Plusieurs études ont permis de mettre en évidence l'implication des microalgues dans le domaine pharmaceutique par l'identification de nouvelles molécules naturelles (**Hoppe, 1979**).

- **Domaine cosmétique :**

Plusieurs espèces de microalgues sont exploitées industriellement dans le domaine cosmétique, principalement les deux espèces *Arthrospira* et *Chlorella* (**Stolz et Obermayer, 2005**). Des extraits d'algues, ayant une activité antioxydant, sont exploites sur le marché dans la fabrication des produits de soin capillaire, du visage et de la peau ainsi que dans les crèmes solaires (**Pulz et al, 2004**).

- **Domaine environnemental :**

Les principales applications environnementales sont le traitement des eaux usées et bien sur la consommation de CO₂ comme méthode d'abattement de ce gaz à effet de serre.

- Traitement des eaux usées.
- Agriculture.
- Séquestration du CO₂

- **Domaine énergétique :**

La valorisation de la biomasse algale peut se traduire par la production de bioénergie sous forme d'électricité et/ou de chaleur par combustion directe, ou sous forme de biométhane après méthanisation (**Chynoweth, 2002**) ou sous forme de biocarburant (les micro-algues telles que *Nitzschia sp.* et *Navicula pelliculosa* sont intéressantes pour la production de biocarburant en mode hétérotrophe grâce à leur taux élevé en acides gras) (**Benzidane et**

al, 2017) ou d'hydrogène. Cependant, cette valorisation ne sera concurrentielle qu'avec une forte productivité de biomasse, une possibilité de récolte mécanique simple et un cout de production plus réduit que les précédentes mettant en œuvre d'autres types de biomasse (*Carlsson et al, 2007*).

Chapitre II

Biocarburants

II.1. Définition :

Les biocarburants sont des sources énergétiques issues des matériaux biologiques qu'ils distinguent des autres sources d'énergie non fossiles, à l'instar de l'énergie des vagues, et l'éolienne.

De plus, quel que soit la forme des biocarburants (solide, liquide, ou gazeuse), il est clair que c'est une énergie durable, et renouvelable puisqu'elle est d'origine végétale et animale, et donc elle peut être remplacée après une courte période (Scragg Alan.H, 2009).

II.2. Différentes générations des biocarburants :

II.2.1. Biocarburants de première génération: Ethanol, Huiles végétales et Biodiesel et Biométhane :

Ces sont des biocarburants liquides issus de la transformation des matières végétales produites par l'agriculture (betterave, canne à sucre, blé, maïs, colza, tournesol, pomme de terre...) (Voir Figure 18). Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable. Leur combustion ne produit que du CO₂ et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes azotés et soufrés (NO_x, SO_x). Ces combustibles ont des caractéristiques physico-chimiques différentes des produits pétroliers qu'ils vont remplacer (Gilles .V, 2013).

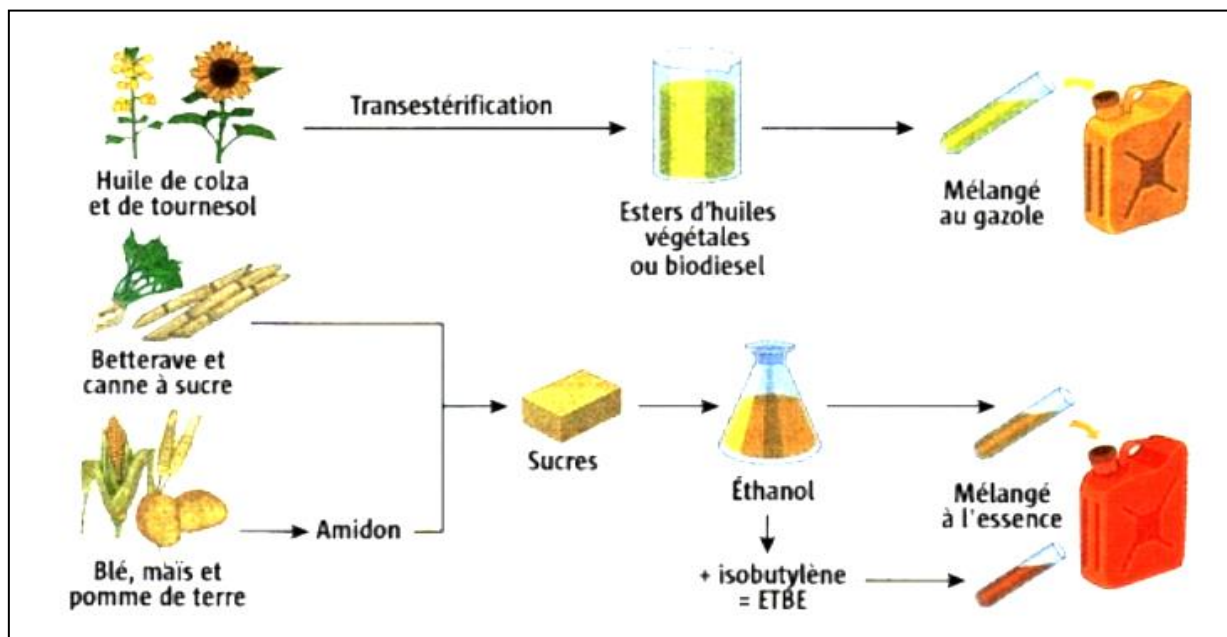


Figure18 : Biocarburant de première génération

➤ **Filière Ethanol :**

Bioéthanol : est obtenu par fermentation de sucres (sucres simples, amidon hydrolysé) par des levures du genre *Saccharomyces*. L'éthanol peut remplacer partiellement ou totalement l'essence. Une petite proportion d'éthanol peut aussi être ajoutée dans du gazole, donnant alors du gazole oxygéné, mais cette pratique est peu fréquente.

Ethyl-tertio-butyl-éther :(ETBE) est un dérivé (un éther) de l'éthanol. Il est obtenu par réaction entre l'éthanol et l'isobutène et est utilisé comme additif à hauteur de 15 % à l'essence en remplacement du plomb. L'isobutène est obtenu lors du raffinage du pétrole.

➤ **Filière huiles végétales :**

De nombreuses espèces végétales sont oléifères comme le palmier à huile, le tournesol, le colza, le jatropha ou le ricin. Les rendements à l'hectare varient d'une espèce à l'autre. L'huile est extraite par pressage (écrasement) à froid, à chaud, voire (pour un coût plus élevé) avec un solvant organique.

Deux grandes voies d'utilisation sont ouvertes :

L'huile végétale brute :(HVB, ou HVP) peut être utilisée directement, dans les moteurs diesels, pure ou en mélange, mais, notamment à cause de sa viscosité relativement élevée, l'utilisation d'une fraction d'huile importante nécessite l'usage d'un moteur adapté (**Gilles .V, 2013**).

➤ **Filière Biodiesel :**

Biodiesel : obtenu par la transformation des triglycérides qui constituent les huiles végétales ; la transestérification de ces huiles, avec du méthanol ou de l'éthanol, produit des Esters d'Huile Végétale, respectivement méthyliques (EMHV) et éthyliques (EEHV), dont les molécules plus petites peuvent alors être utilisées comme carburant (sans soufre, non toxique et hautement biodégradable) dans les moteurs à allumage par compression.

➤ **Autres filières : Biométhane :**

Biométhane : est le principal constituant du biogaz issu de la fermentation méthanique (ou Méthanisation) de matières organiques animales ou végétales riches en sucres (amidon, cellulose, plus difficilement les résidus ligneux) par des micro-organismes méthanogènes qui vivent dans des milieux anaérobies.

Les principales sources sont les boues des stations d'épuration, les lisiers d'élevages, les effluents des industries agroalimentaires et les déchets ménagers. Les gaz issus de la fermentation sont composés de 65 % de méthane, 34 % de CO₂ et 1 % d'autres gaz dont le sulfure d'hydrogène et le diazote. Le méthane est un gaz pouvant se substituer au gaz naturel (ce dernier est composé de plus de 95 % de méthane). Il peut être utilisé soit dans des moteurs à allumage commandé (technologie moteurs à essence) soit dans des moteurs dits dual-fuel (Gilles .V, 2013).

II.2.2. Biocarburants de 2^{ème} génération :

Issus de la transformation de la lignocellulose contenue dans les résidus agricoles (paille) et forestiers (bois), ou dans des plantes provenant de cultures dédiées (taillis à croissance rapide) . Les nouveaux procédés cherchent améliorer le bilan énergétique en utilisant toute la plante. Pour cela les résidus de sylviculture, les déchets organiques, des cultures comme la luzerne ou le miscanthus sont exploités.

Ces procédés permettraient en outre de limiter le problème d'usage des surfaces agricoles, d'exploiter un éventail de culture beaucoup plus large que celui de la gamme alimentaire et d'obtenir de meilleurs Bilans énergétiques et environnementaux que la première génération (BallerinDaniel, 2006).

Pour transformer la biomasse lignocellulosique en carburant, il existe deux voies possibles : la voie thermochimique et la voie biochimique.

❖ Voie thermochimique :

La voie thermochimique, Biomasse To Liquids (*BTL*), produit du biodiesel et du biokérosène qui sont des alternatives aux carburantes aviations.

❖ Voie biochimique :

La voie biochimique permet de produire l'éthanol de 2^e génération utilisé dans les moteurs à essence. Dans ce cas, la source végétale ne donne pas un sucre directement exploitable et il faut donc ajouter des étapes de transformation.

Cette transformation par voie biochimique est coûteuse, en partie à cause de la quantité d'enzymes nécessaire pour convertir la cellulose en sucre. Pour augmenter la productivité, les hémicelluloses pourraient servir à produire des enzymes et la lignine pourrait être une source d'énergie pour le procédé (Clotilde.B et Vivien .D, 2013).

II.2.3. Biocarburants de 3ème génération : Les microalgues

Ils sont obtenus à partir de la production de lipides ou d'hydrogène par des microorganismes. Le soufre est un élément chimique nécessaire au processus de formation des protéines. Lorsque l'algue *Chlamydomonas Reinhardt* est privée de soufre, la photosynthèse diminue et elle met en place une autre voie énergétique : la production d'hydrogène. On peut cultiver les micro-algues avec deux procédés différents : l'utilisation d'une photo bioréacteur ou de bassins extérieurs. Les rendements prévus sont 3 à 30 fois supérieurs aux espèces oléagineuses (notamment car le taux de photosynthèse est plus important). Les biocarburants de 3ème génération sont un enjeu énergétique important (Dubreuil A, 2008).

II.3. Avantages et inconvénients des biocarburants :

Tableau 03 : les principaux avantages et inconvénients des biocarburants (Touati Lounis, 2013).

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Renouvelables (2) - Limitent les émissions de gaz à effet de serre (GES) et les consommations d'énergie non renouvelable. - Emettent moins de polluants tels que le soufre (à l'origine des pluies acides), les suies, les particules fines. - Ils permettent de diversifier les sources de production d'énergie et de réduire la dépendance à l'or noir et de valoriser des ressources domestiques. 	<ul style="list-style-type: none"> -L'augmentation de la demande en biocarburants a eu pour conséquence le renchérissement des cours mondiaux des céréales et des oléagineux. - Ils sont gourmands en énergie, coûteux à cultiver, à collecter et à transformer. - ils instaurent une concurrence redoutable entre cultures énergétiques et cultures alimentaires. - Le développement des biocarburants issus de cultures énergétiques peuvent être une menace pour les écosystèmes et les puits.

II.4. Application des biocarburants :

II.4.1. Application du bioéthanol :

Le bioéthanol peut être utilisé, sous certaines conditions, comme carburant dans les moteurs à essence, soit de 5 à 20% dans les moteurs à essence sans modification et/ou de 85 à 100% dans des moteurs à essence spécifiquement adaptés. En outre, l'éthanol peut être converti en divers produits de base de l'industrie chimique tels que, l'éthylène, l'étheret l'éthyle tertio butyle (ETBE), conventionnellement, produits à partir du pétrole (Voir Figure 19).

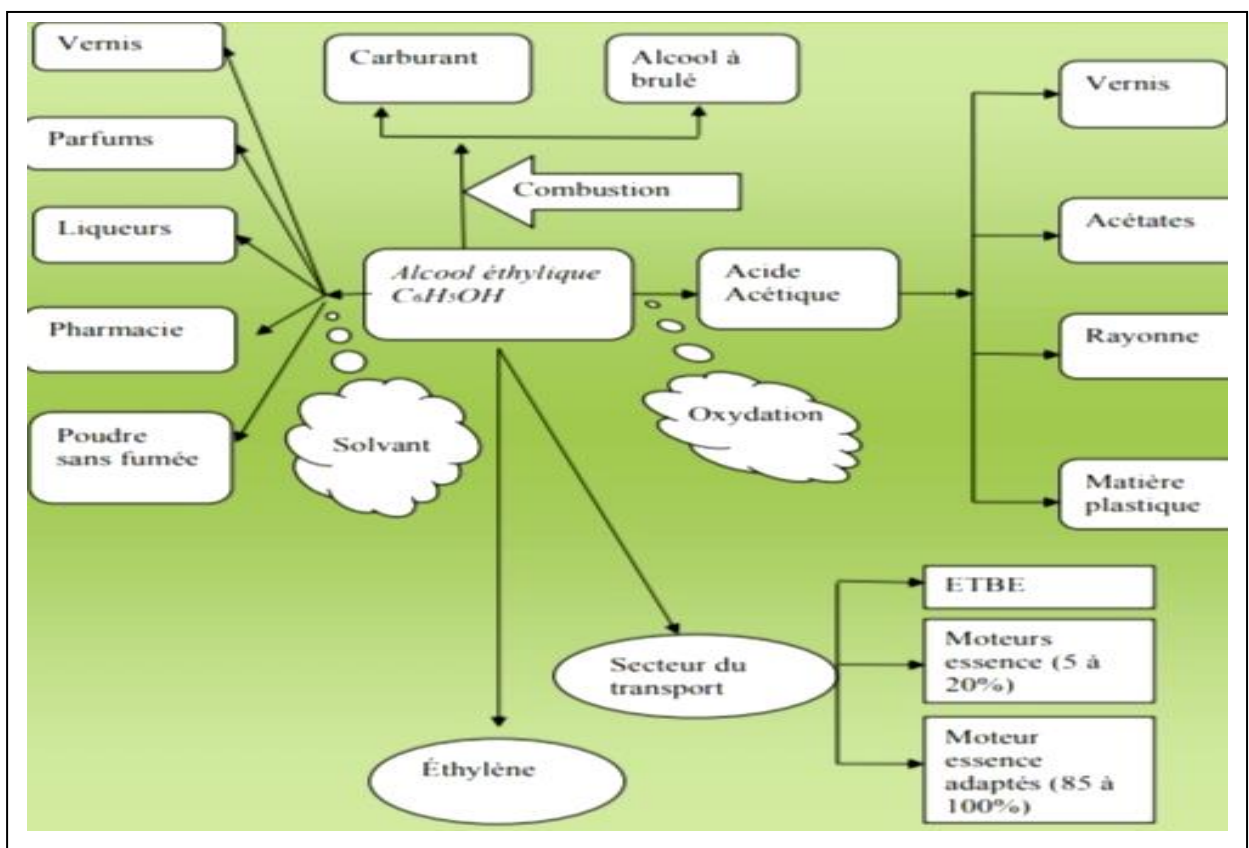


Figure 19 : Domaines d'utilisation du bioéthanol

Il est à signaler que le plastique résulte de la polymérisation de l'éthylène et de l'ETBE mélangé à raison de 15% à l'essence, permet d'augmenter l'indice d'octane du biocarburant, contrairement à l'éthanol, il ne favorise pas l'évaporation des carburants et n'absorbe pas l'humidité de l'air (Kara Ali M 2014).

II.4.2. Applications d'huile végétale biocarburant :

Aussi connue sous le nom d'huile végétal pure (HVP) ou brute (HVB), correspond à l'huile brute ou raffinée, produite à partir des plantes oléagineuse telles que le colza, le tournesol, le soja etc. Sans modification chimique par pression, extraction ou procédés comparable. Elle peut être techniquement utilisée jusqu'à 100% comme biocarburant pour tous les moteurs diesel, sous réserve de modification mineure.

Afin d'obtenir des caractéristiques similaire au gasoil et au fiol domestique (tableau 04), les huiles végétales peuvent subir une transformation chimique (transestérification avec du méthanol) en Ester Méthyliques d'huile Végétales (EMHV) dits « biodiesel ». (Gaell.L, 2007).

Tableau 04 : Caractéristiques d'une huile végétale et le biodiesel comparées au gasoil. (Gilles .V, 2013).

	Gasoil	Huile de colza	biodiesel
Masse volumique (kg/dm ³) 20°	0,836	0,920	0,880
Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)	43800	37850	41000
Pouvoir comburivore (g air/g biocarburant)	14,84	13,50	14,10
Contenu calorifique du litre de mélange air/carburant (J)	3800	3625	3760
Indice de Cétane	50	32	52
Viscosité cin. à 20°C	6	72	7

Le biodiesel est un biocarburant destiné à être utilisé dans les moteurs diesel et les chaudières, il provient de la conversion des lipides (huiles végétales et graisses animales en biocarburant la consommation mondiale en diesel connaît une ascension rapide. En raison du renforcement des obligations de mélange et des incitations à la consommation, la production mondiale de biodiesel devrait également augmenter et atteindre près de 41 milliards de litres M L d'ici 2019, (Voir Figure 20).

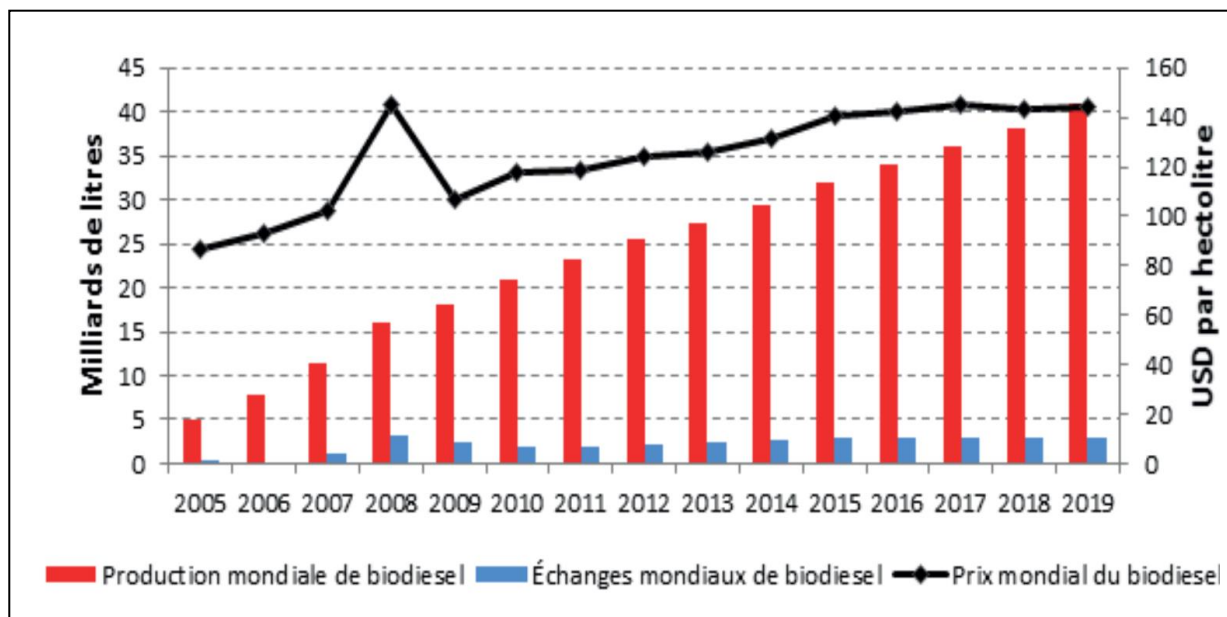


Figure 20 : Production mondiale de biodiesel entre 2005 et 2019.

II.4.3. Application du biogaz :

La valorisation du biogaz, en plus de sa valeur énergétique, a un double effet positif sur l'environnement, en amont en tant que traitement des déchets et des effluents organiques, en aval pour réduire le risque climatique global.

Le biogaz peut être valorisé suivant plusieurs modes possibles et cela selon les types de gisements, la qualité et la richesse en méthane et en fonction des débouchés de proximité et des politiques mises en œuvre. (Boumediene, 2012).

a. Valorisation thermique :

Elle consiste à utiliser le biogaz comme source d'énergie thermique en remplacement, par exemple, du propane, du gaz naturel ou du mazout. C'est le mode de valorisation le plus courant, le plus efficace et le mieux maîtrisé. Ce mode de valorisation permet de récupérer le maximum d'énergie contenue dans le biogaz. Pour une utilisation thermique à la ferme, la purification du biogaz se limite généralement à sa désulfuration, par exemple par son passage sur du charbon activé, qui limitera les risques de corrosion des canalisations. (Bensmail, 2014).

b. Production d'électricité à partir de Biogaz :

La production d'électricité peut être envisagée lorsque le volume de biogaz produit est important. En effet, une telle valorisation nécessite l'achat d'une unité de cogénération fonctionnant au biogaz. Cette unité peut être composée d'une chaudière au biogaz couplée à une turbine à vapeur ou à un moteur à gaz. L'électricité produite peut être utilisée directement à la ferme pour assurer la ventilation des bâtiments, l'éclairage et le fonctionnement des différents équipements (pompes, soigneurs, etc.). Lorsque les réseaux de distribution d'électricité le permettent, il est possible d'alimenter le réseau avec les surplus d'énergie produits à la ferme. La transformation de l'énergie thermique en énergie électrique se fait toutefois au détriment du rendement énergétique global du biogaz. La production d'électricité varie selon le type de biomasse utilisée en fonction de sa capacité à générer du biogaz. **(Bensmail, 2014).**

c. Production combinée de chaleur et d'électricité (la cogénération) :

Le biogaz peut alimenter un moteur thermique relié à un alternateur qui produit l'électricité et de la chaleur qui est récupérée dans les gaz d'échappement et au niveau du moteur. **(Bensmail, 2014).**

d. Utilisation comme carburant pour les véhicules ou dans un réseau de Gaz naturel :

Une fois purifié, le biogaz peut être utilisé comme équivalent au gaz naturel, soit comme carburant pour les véhicules fonctionnant au gaz naturel (GNV), soit en étant injecté dans un réseau de distribution de gaz naturel. Ce type d'utilisation implique un degré de pureté beaucoup plus élevé que pour les applications précédentes. En plus de la désulfuration, le dioxyde de carbone ainsi que la vapeur d'eau doivent être retirés du biogaz. Par ailleurs, la proportion de méthane doit être équivalente à celle du gaz naturel commercialisé (96 % et plus) afin d'assurer une valeur calorifique intéressante. Les concentrations admissibles des différents composants du biogaz sont fixées par les fabricants des moteurs ou par les gestionnaires des réseaux de distribution, selon le mode de valorisation envisagé. Une unité traitant 20 000 t/an de déchets peut produire une quantité de carburant qui permet à 2000 voitures de parcourir 10 000 km/an. Un kilogramme de déchets correspond donc à la consommation de carburant pour un parcours d'un kilomètre en voiture. La récupération du biogaz produit par les décharges est d'autant plus intéressante que le méthane est un gaz à effet de serre bien plus puissant que le dioxyde de carbone (CO₂) produit par sa combustion **(Bensmail, 2014).**

Les gaz issus de la fermentation sont composés en moyenne de 65 % de méthane, 34 % de CO₂ et de 1 % d'autres gaz dont le sulfure d'hydrogène et le diazote. Il est préférable de le purifier afin d'enlever le CO₂, l'eau, le soufre et les composés organohalogénés qu'il contient. Le Biométhane une fois épuré doit contenir au minimum 96% de méthane pour être comprimé (à 200 bars) afin de servir comme carburant, exactement comme le GNV : gaz naturel pour véhicule. Le contenu calorifique du mélange Air/Biométhane (à 70%vol.), est de 81 % de celui du mélange air/gasoil (Gilles.V, 2013).

Tableau 05 : caractéristiques du gasoil et du Biométhane. (Gilles.V, 2013).

	Gasoil	Biométhane
Masse volumique (kg/m ³) 20°C	836	0.66
Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)	43800	23200 kJ/m ³ *
Pouvoir comburivore (g air/gcarburant)	14.84	6.1 m ³ air/m ³ gaz
Contenu calorifique du litre demélange air/carburant (J)	3800	3100
Indice de Cétane	50	-
Viscosité cin. à 20°C	6	-

Chapitre III
Production des
biocarburants par les
algues

III.1. Extraction des huiles :

L'extraction est une opération ancienne utilisée pour retirer, des plantes et de certains organes d'animaux, des produits alimentaires, pharmaceutiques ou odoriférants, sous formes de breuvages, drogues ou parfums (N.Vancuong, 2010). L'extraction par solvant fait généralement appel, dans le cas des produits végétaux, à l'eau, aux alcools, aux solvants chlorés et/ou organiques dont l'hexane ou le mélange chloroforme-méthanol.

De nombreuses méthodes d'extraction sont spécifiquement utilisées dans le cas des lipides des matières végétales. On en cite, en tout premier lieu le pressage à plaque ou à vis. L'extraction par Soxhlet, l'extraction assistée par micro-ondes et/ou ultra-son, l'extraction par fluide supercritique, etc. doivent également être considérées comme des opérations d'extraction par solvant (T.Swetman, 2008).

III.1.1. Extraction par pressage (Procèdes mécaniques) :

A partir d'un produit composé de solides et de liquides, l'extraction par pression (ou pressage) permet de séparer les liquides en leur appliquant une pression extérieure (voir Figure 21). Le produit est supporté par une paroi ou une toile permettant le passage du liquide. Cette opération est relativement répandue et est utilisée pour extraire du jus (raisins, tomates, etc.), de l'huile (olives, graines oléagineuses), concentrer en matière sèche (pulpes de sucrerie de betterave, divers déchets et boues, etc.). Cependant le pressage a des limites mécaniques évidentes à partir des quelles, l'accroissement de la pression appliqué en 'engendre pratiquement plus d'extraction notable ; on atteint ainsi une limite technique ou économique.

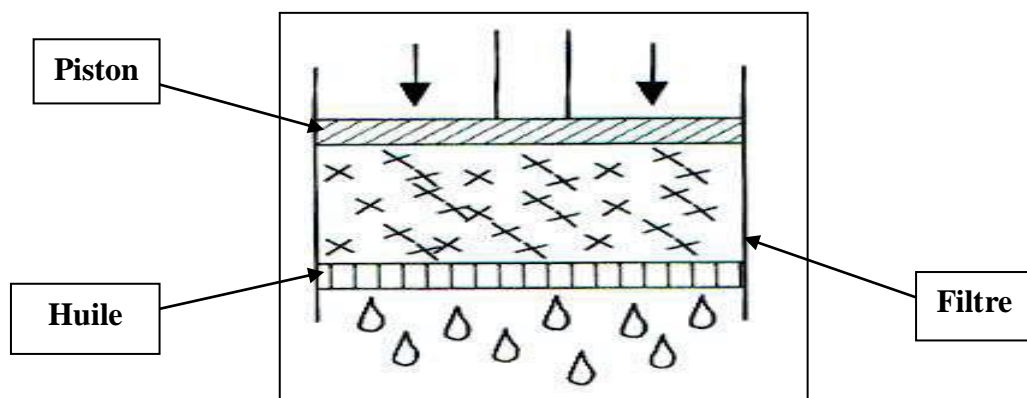


Figure 21 : Principe de l'extraction par pression.

III.1.2. Extraction par solvant :

Dans le cas de processus d'extraction par solvant et de séparation de l'huile (ou de molécules Spécifiques) présentes dans un milieu solide, l'opération fait souvent appel, d'un point de vue technologique, à la diffusion au sein du solide d'un fluide (liquide) porteur, appelé solvant d'extraction ; l'extraction se présente ainsi comme une interaction solide –liquide.

Les opérations d'extraction solide-liquide regroupent plusieurs méthodes différentes consistant toutes à faire interagir le solvant sur le matériau solide afin de dissoudre ses composants solubles :

III.1.2.1. Percolation :

Consiste à laisser couler un solvant (généralement très chaud) sur un lit de solides finement divisés. La préparation du café relève de cette opération.

III.1.2.2. Macération :

Est une infusion dans un solvant à froid. L'opération bien que généralement longue et à rendement souvent médiocre, est la seule méthode utilisable dans le cas de l'extraction d'un ensemble de molécules fragiles. Pour être efficace, une macération, peut durer de 4 à 10 jours environ ; ceci peut présenter quelques inconvénients, en termes de fermentation, ou de contamination bactérienne notamment si le solvant utilisé est l'eau. Ces phénomènes peuvent entraîner une dégradation rapide des molécules actives. En vue d'éviter ou de réduire ces inconvénients, la macération peut être opérée dans un récipient couvert, le tout à l'abri de la lumière et, dans certains cas, maintenue dans un réfrigérateur.

III.1.2.3. Extraction par Soxhlet :

L'extraction par soxhlet a été employée pendant longtemps, est une technique standard et la référence principale pour évaluer la performance d'autres méthodes d'extraction solide-liquide. La conception de cette technique d'extraction a été décrétée pour la première fois par Franz Von Soxhlet en 1879 pour la détermination de la teneur lipidique du lait (T.Swetman, 2008).

L'extraction par Soxhlet est une technique générale et bien établie, et qui dépasse en performance les autres techniques conventionnelles d'extraction, excepté dans le cas de

l'extraction des composés thermolabiles. Un système conventionnel de Soxhlet comme montré dans la Figure 22. L'extraction par Soxhlet dépend fortement des caractéristiques de la matrice solide et de la dimension des particules car la diffusion interne est souvent l'étape limitant pendant l'extraction. (T.Swetman, 2008).

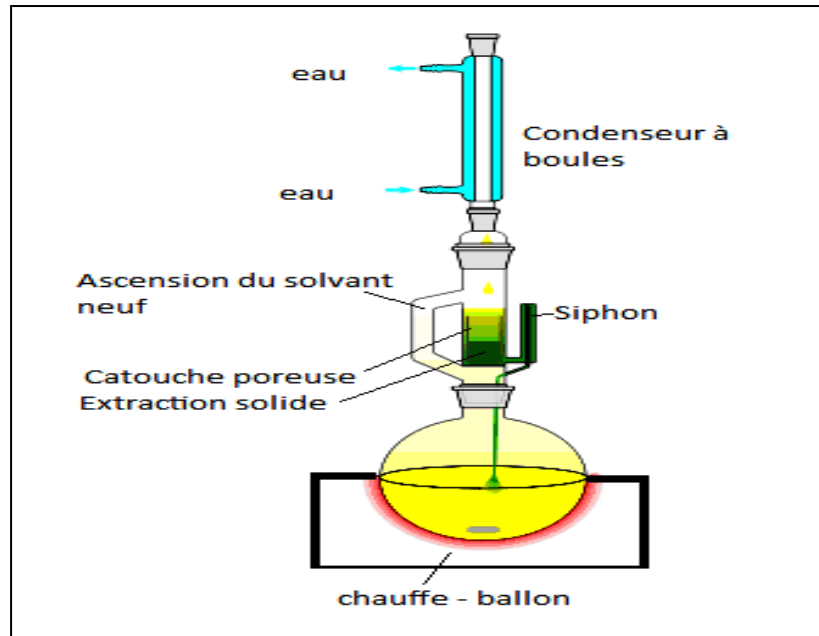


Figure 22 : Extracteur soxhlet

III.2. Exemple de biocarburant : Biodiesel à partir des microalgues

III. 2.1. Principaux joueurs :

Depuis 2007, plusieurs investissements ont été réalisés pour la production de biocarburant à partir du micro algues. Ces contributions de plus de 1 milliard de dollars ont permis une croissance importante des différentes technologies et stratégies de production de biodiesel (Columnist 2020, 2009).

Il existe en effet plusieurs méthodes permettant la production d'algocarburants, soit en bassins extérieurs, en photo bioréacteurs, en fermenteurs ou encore via l'utilisation de systèmes hybrides. Les programmes de recherche et entreprises à travers le monde sont nombreux : des dizaines d'entreprises sont nées aux États-Unis en 2007 (Lefebvre et al. 2007). Bien que la plupart de celles-ci se concentrent principalement sur la production de biodiesel à partir de micro algues de métabolisme autotrophe, quelques-unes d'entre elles utilisent plutôt les microalgues de métabolisme hétérotrophe. Cependant, malgré toutes

les sommes investies dans la R-D, aucune de ces entreprises n'a été en mesure, à venir jusqu'à date, de produire du biodiesel à l'échelle commerciale.

Parmi les projets utilisant les microalgues de métabolisme autotrophe, les principaux projets en bassins extérieurs sont Sapphire Energy et Petro Sun. Sapphire Energy utilise notamment la manipulation génétique d'algues afin d'inclure à celles-ci une résistante à l'utilisation de pesticides. Ceux-ci assurent un rendement maximal par l'utilisation de pesticides permettant de contrôler l'envahissement des bassins par des espèces indigènes non-désirées (**Nathan, 2008**).

Ce projet est subventionné à raison de plusieurs millions notamment par l'organisme Wellcome Trust. Les projets Solix et Green Fuel utilisent des technologies de production du biodiesel à partir de microalgues cultivées en photobioréacteurs (**Solix, 2009 ; Green fuel, 2009**).

Le projet Cellana, quant à lui, créé d'un partenariat entre les compagnies Shell et HRBiotroleum, se spécialise dans la technologie hybride (**Nathan, 2008**). Les principaux projets utilisant des microalgues de métabolisme hétérotrophe sont les projets Solazyme et Fermentalg.

- Solazyme

Solazyme est une compagnie de San Francisco qui a été fondée en 2003. Elle se spécialise dans la production de biodiesel à partir de microalgues de métabolisme hétérotrophe, mais aussi dans la production de cosmétiques, de nutraceutiques et d'aliments à partir des coproduits générés lors de la production de biodiesel (**Solazyme, 2009**).

Les microalgues sont cultivées dans des fermenteurs traditionnels caractérisés par l'absence de lumière en fournissant l'énergie nécessaire à leur croissance sous forme d'hydrates de carbone. Ces hydrates de carbone proviendrait de la biomasse agricole et industrielle (résidus cellulosiques, amidon, glycérine, sucres) et le processus de fermentation et d'extraction utilisé serait unique dans le domaine (**Solazyme, 2008 ; Semaska, 2008**).

Solazyme utilise principalement les techniques de manipulations génétiques afin d'optimiser son procédé et ainsi assurer une production maximale de triglycérides par les microalgues sélectionnées.

Depuis 2008, Solazyme, Chevron, la deuxième plus importante compagnie pétrolière américaine, et Imperium Renewables se sont associés afin de développer un procédé industriel relatif à la production de biodiesel (**Semaska, 2008**).

C'est d'ailleurs en juin 2008 que Solazyme s'est vue accorder le prix de l'entreprise de technologies vertes la plus prometteuse et qu'en septembre de la même année, elle annonçait être la première compagnie à produire un kérosène à partir de microalgues. Ce kérosène, suite à une analyse, a été décrété conforme aux normes les plus exigeantes de l'American Society for Testing and Materials (ASTM).

En septembre 2009, Solazyme a été sélectionnée par l'US Département of Défense (DOD) afin de produire un algocarburant Sola diesel ®F-76 pour la marine. Ce Sola diesel aurait déjà été produit et remis au ministère de la défense et aurait d'ailleurs obtenu la certification Navy F-76. Solazyme devra donc livrer 74 000 litres pour 2010 afin de débiter les tests de compatibilité (**Rousseau, 2009 ; Baudu, 2009**).

C'est aussi en 2009 que la compagnie a pu compter sur l'appui financier supplémentaire de nouveaux investisseurs tels Braemar Energy Ventures, Harris & Harris Group, Light speed Venture Partners, Roda Group et Vantage Point Venture Partners pour un total d'environ 57 millions de dollars (**Voith, 2009**). Solazyme prévoit utiliser ces investissements dans la phase de commercialisation de son procédé.

- Fermentalg

Fermentalg, une entreprise Libournaise créée en 2008, se spécialise aussi dans la production de biodiesel à partir de microalgues cultivées en absence de lumière dans des fermenteurs. Un substrat carboné de type sucre est fourni aux microalgues pour leur croissance. En effet, Fermentalg s'approvisionne notamment auprès des sucriers, ce qui permet de recycler les déchets et les sous-produits de cette industrie (**Lutzky, 2009**). Cette entreprise utiliserait aussi les techniques dans le domaine de la sélection et de l'ingénierie génétique de souches de microalgues particulièrement performantes.

Parmi ses principaux investisseurs, Fermentalg peut compter sur l'appui du fonds de capital-risque Emertec, mais aussi, pour plus de 2 millions d'euro, par l'appui de CEA Valorisation, Picoty et le fonds régional Aquitaine Création Innovation (**Lutzky, 2009**). Fermentalg se prépare d'ailleurs à son passage à la production industrielle en menant des projets pilotes au sein de son laboratoire. En 2009, elle prévoit cultiver les microalgues

en fermenteurs de 250 litres pour ensuite utiliser un réservoir de cinq mètres cubes en 2010. Afin de permettre le financement de ses activités, l'entreprise vise deux marchés complémentaires à la production de biodiesel, soit la production de biomasse pour l'aquaculture et la production de substituts aux huiles de poisson (cosmétologie et compléments alimentaires).

Selon plusieurs visites et entrevues, l'introduction de petits projets à l'échelle commerciale devrait débuter en 2011 avec une prédiction de production d'environ 1million de gallons, et ce, principalement grâce aux start-up Solazyme et Sapphire (Cloimnist 2020, 2009). De 2012 à 2015, plusieurs joueurs devraient entrer dans la course pour la production d'algocarburants à l'échelle commerciale pour ensuite permettre, vers 2015, une maturation des produits issus des algocarburants (Cloimnist 2020, 2009).

III.2.2. Récolte des algues :

Une fois les cultures effectuées, la biomasse algale a été récoltée. Le but de cette étape est de récupérer le maximum de biomasse afin de réaliser par la suite une extraction des lipides pour les quantifier et les analyser. La récolte est basée sur la méthode de Shenet collaborateur (Z.P.YingShen ,2009).

Elle a été effectuée pour toutes les expériences par centrifugation (5min, 5000 g).Au total, quatre centrifugations sont réalisées. La première centrifugation permet de séparer la biomasse (culot) de son milieu de culture (surnageant). Les trois autres centrifugations permettent de nettoyer (éliminer au maximum les traces du milieu de culture) la biomasse par l'ajout d'eau déminéralisée. Après l'étape de centrifugation, la biomasse algale humide a été récupérée puis soumise à évaporation grâce à un évaporateur centrifuge (Voir Figure 23). Cette étape permet d'obtenir une biomasse algale sèche en évaporant (Voir Figure 24) le surplus d'eau présent dans le culot en 48 heures (Z.P.YingShen ,2009).



Figure 23 : Speed Vac système (évaporateur Centrifuge)

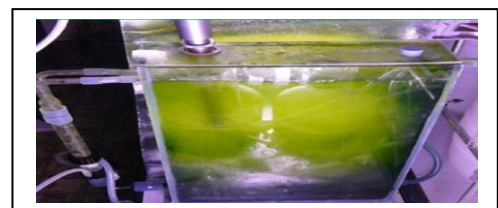


Figure 24 : La récolte des algues

III.2.3. Extraction des huiles algales :

Il existe plusieurs procédés permettant l'extraction des huiles de l'algue. Ces procédés nécessitent de l'énergie et possèdent des rendements différents. Dans le but d'obtenir quasiment 100% de rendement, une combinaison des techniques peut être utilisée (Satyanarayana et al, 2011).

III.2.3.1 Extraction par solvants organiques :

Le solvant organique est choisi en fonction de sa polarité et de son affinité avec les molécules d'intérêt à extraire. Parmi eux on retrouve l'hexane, le plus couramment utilisé, mais aussi le chloroforme, l'éthanol, l'isopropanol, le butanol, les cétones, les esters (Kerlero de Rosbo et al, 201).

Dans certains cas, le fait d'associer plusieurs solvants permet d'améliorer la capacité d'extraction et d'améliorer la sélectivité. Il est possible d'obtenir jusqu'à 98% d'extraction des acides gras purifiés (Richmond, 2004). Ce type d'extraction existe déjà à l'échelle industrielle pour différentes applications, notamment l'extraction du bêta-carotène de *Dunaliella salina* en Inde (Wolff, 2012).

Cette extraction, présente néanmoins des inconvénients. L'hexane est un produit toxique, néfaste pour l'environnement. L'utilisation de ce produit comme solvant peut également dégrader la qualité des lipides extraits et l'utilisation à l'échelle industrielle n'est pas applicable dans l'état actuel des choses (Voir Figure 25).



Figure 25 : Système d'extraction par solvant.

III.2.3.2 Extraction à l'eau subcritique :

L'un des aspects les plus attrayants dans le cas des algues est l'utilisation de l'eau comme solvant d'extraction. Elle permet alors de s'affranchir du besoin de l'étape de séchage ou de déshydratation (Vian *et al*, 2013).

Ce procédé est basé sur l'utilisation de l'eau à des températures juste en dessous de la température critique (température maximale supportée par l'eau en phase liquide), et à une pression suffisamment élevée pour maintenir l'eau dans cet état liquide ($T_c=373^\circ\text{C}$ et $P_c=221$ bars). L'intérêt de cette extraction est que l'eau, dans ces conditions, devient moins polaire et les composés organiques plus solubles qu'à température ambiante. Elle présente aussi l'avantage de l'accessibilité du solvant dans la matrice de la biomasse qui apparaît dans d'autres cas à des températures bien supérieures.

Pour finir, l'eau d'extraction est refroidie à température ambiante, rendant les produits miscibles à température et pression élevées, et non miscibles à des températures inférieures, ce qui permet une séparation facile. (Personip *et al*, 2011)

On trouve d'autres avantages pour ce mode d'extraction : les temps d'extraction sont plus courts, il donne des extraits d'une qualité supérieure, des coûts moindres en agents extractants et une bonne compatibilité environnementale (absence de solvants).

Cependant, une contrainte majeure est la difficulté à extrapoler le système à grande échelle. Par ailleurs, une charge importante en énergie est nécessaire pour chauffer le système jusqu'aux températures subcritique (Voir Figure 26).



Figure 26 : Unités d'extraction à l'eau subcritique.

III.2.3.3. Extraction avec des fluides supercritiques

L'extraction par fluide supercritique utilise le pouvoir renforcé de solvation des fluides au-dessus de leur point critique. L'extraction par fluide supercritique est le plus souvent employée en mode discontinu, mais le procédé existe aussi en mode continu (Vian *et al*, 2013).

L'un des points les plus attractifs de l'extraction par fluide supercritique est qu'une fois la réaction d'extraction faite et les matériaux d'extraction dissous dans le fluide supercritique, le solvant et le produit peuvent être facilement séparés en aval une fois la température et la pression revenues aux conditions atmosphériques. Dans ce cas, le fluide retourne à son état gazeux original pendant que les produits extraits restent dans un état liquide ou solide (Kerlero de Rosbo *et al*, 2014).

Les fluides utilisés peuvent inclure des solvants comme l'éthane, l'hexane, l'eau, le méthanol, l'oxyde nitreux, l'hexafluorure de soufre, aussi bien que le n-butane et le pentane. Le traitement supercritique est capable de simultanément extraire et convertir des huiles en biocarburants. Cette technique a été démontrée comme étant extrêmement puissante dans L'extraction d'autre composé présent dans les algues. Les fluides supercritiques sont sélectif, offrant ainsi une grande pureté et concentration du produit. En outre, il n'ya pas de résidus de solvants organiques dans l'extrait ou dans la biomasse traitée (Voir Figure 27). (Personip *et al*, 2011)

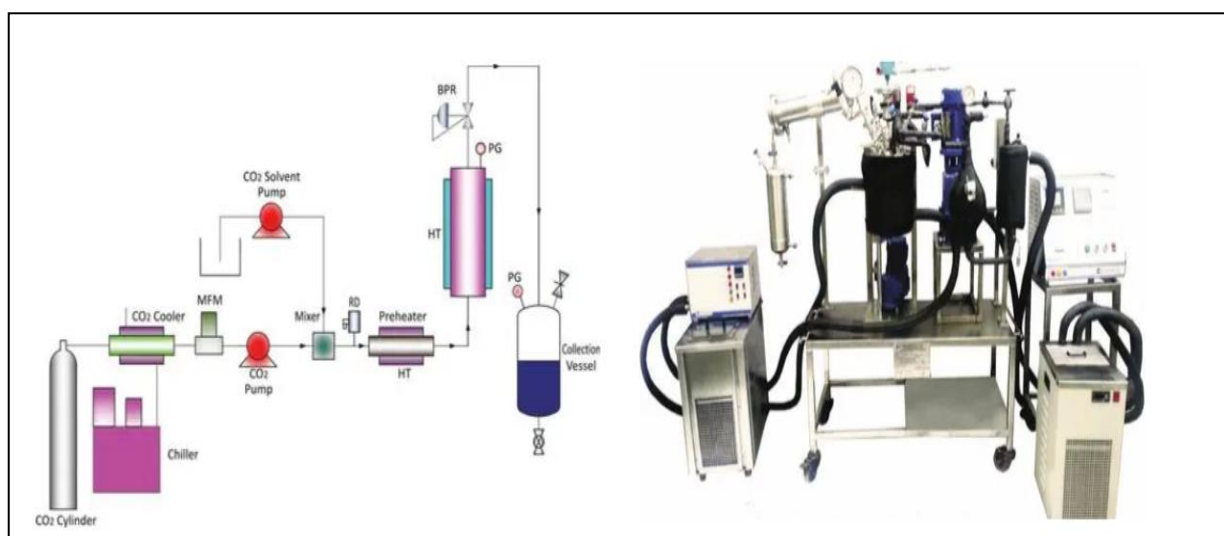


Figure27 : système d'extraction de fluide supercritique

III.2.3.4. Extraction au CO₂ supercritique

L'état supercritique confère au dioxyde de carbone un excellent pouvoir d'extraction. Il s'agit d'un CO₂ stabilisé au-dessus de son point critique, caractérisé par sa température et sa pression critique, c'est-à-dire au-dessus de 31,1°C et de 74 bars. Il s'agit d'un état intermédiaire entre le liquide et le gaz (Voir Figure 28).

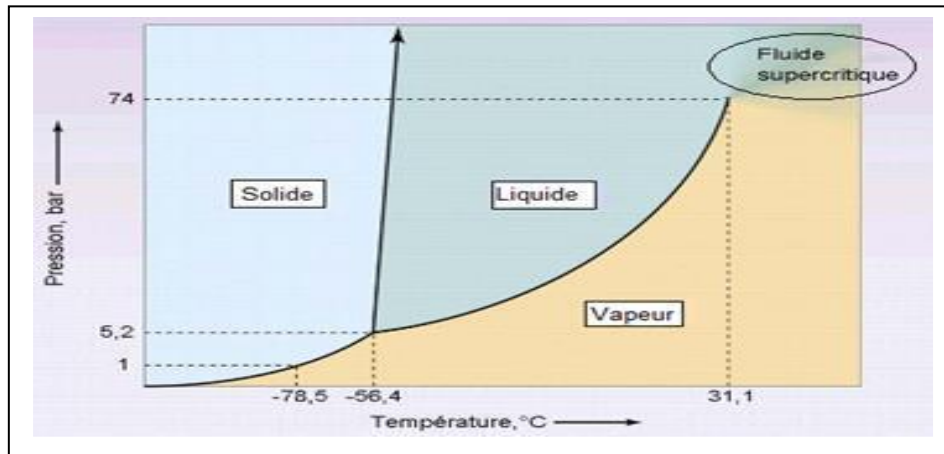


Figure 28 : Diagramme des différents états d'un corps pur.

Le dioxyde de carbone présente la caractéristique d'être un bon solvant à l'état supercritique, et un mauvais solvant à l'état gazeux.

Les avantages de ce procédé sont les suivants :

- Le dioxyde de carbone est totalement inerte chimiquement ; il est naturel et impacte donc peu l'environnement. Il est non toxique, peu coûteux et utilisable à l'infini.
- La température abordable et la stabilité permettent d'assurer la qualité du produit.
- En fin de cycle, la séparation entre le solvant d'extraction et le soluté pour obtenir l'extrait est facile (simple détente qui ramène le dioxyde de carbone à l'état gazeux), avec une récupération quasi-totale de tous les composants. (Personip et al, 2011)

Si on ajoute un co-solvant d'extraction au CO₂ supercritique, on peut améliorer son pouvoir d'extraction et élargir la gamme de molécules extractibles.

L'extraction au CO₂ supercritique est assez intéressante mais elle nécessite un séchage préalable (Voir Figure 29), qui comme nous venons de le voir, reste onéreux (Travaux du Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Procédés Propres M2P2, Université Aix-

Marseille dans le cadre du projet Shamash). De plus, à l'échelle industrielle, il y a de nombreux progrès à faire pour améliorer la rentabilité économique (Bernard, 2011).

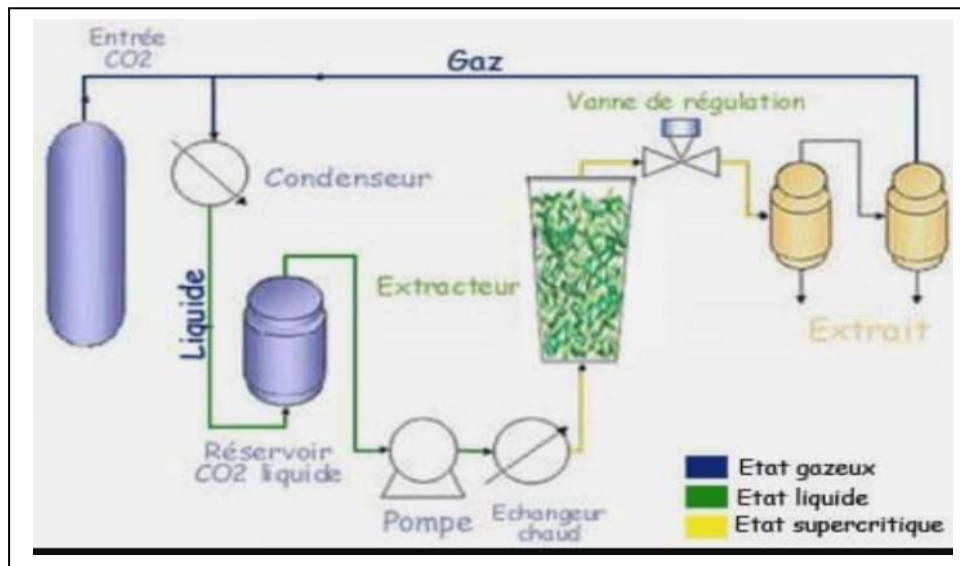


Figure 29 : extraction d'huile par CO₂ supercritique

III.2.4. Mode de production :

- Introduction des réactifs

Pour la production du biodiesel, les réactifs mis en jeu sont l'huile, l'alcool (éthanol ou méthanol), le tout en présence de catalyseur pour accélérer la réaction. Ces trois composants peuvent être introduits en même temps dans le réacteur d'estérification. Mais le plus souvent en présence de catalyseur solide, l'alcool et le catalyseur sont introduits dans un réservoir où le mélange est préchauffé pour la dissolution rapide du catalyseur. L'homogénéisation est assurée par un agitateur. Ce mélange alcool/catalyseur est ensuite conduit au réacteur d'estérification ainsi que l'huile.

- Réaction d'estérification

La réaction d'estérification ou de transestérification se produit entre l'huile et l'alcool introduits dans le réacteur pendant un certain temps de séjour. Les conditions de température et de pressions requises sont fonction du type de catalyse en jeu. Un système de chauffage du réacteur est nécessaire, ainsi qu'un agitateur. La transformation des huiles triglycérides en esters méthyliques ou éthyliques par transestérification permet de

réduire la masse moléculaire à un tiers de celle de l'huile, de réduire la viscosité de huit fois et d'accroître la volatilité.

La température, le type de catalyseur et sa concentration, le rapport alcool/ester et la vitesse de brassage sont les plus importantes variables qui influent sur le temps de réaction de la transestérification et sur l'efficacité de la transformation. La pureté des agents réactifs, par exemple la présence d'eau, d'acides gras libres et d'autres contaminants qu'on retrouve dans les huiles non raffinées (et autres matières premières) sont aussi des variables très importantes. **(Roger A.krous et al, 1993).**

La « transestérification » est la technique classique de production de biodiesel. Les rendements massiques en ester méthylique par rapport à l'huile varient de 98,5% à 99,4%. **(Daniel Ballerini et al, 2006).**

- **Phase de décantation**

Après la formation des esters au cours de la transestérification, une étape de décantation du produit est nécessaire pour séparer le biodiesel du glycérol. Le glycérol plus dense que le biodiesel se condense dans la partie basse. La décantation peut s'effectuer dans le réacteur par gravité, ou dans des décanteurs statiques ou par des centrifugeuses pendant deux à trois heures de temps.

- **Phase de lavage ou purification de l'ester**

Une étape de purification de l'ester consiste à éliminer les impuretés telles que la glycérine résiduelle, l'excès de méthanol, les traces de catalyseurs, savons et sels formés par la catalyse homogène.

Cette opération s'effectue par lavage du biodiesel à l'eau. Une purification poussée des esters est réalisable par passage sur une colonne remplie d'un absorbant sélectif ou un lit de résines Échangeuses d'ions. La distillation de type flash sous vide assure également la pureté de l'ester.

Après lavage du biodiesel à l'eau, l'opération de séchage permet d'évacuer l'eau présente. Elle est le plus souvent réalisée par chauffage à une forte température du biodiesel lavé, la température de séchage pouvant atteindre 140°C en procédé continu par catalyse homogène.

- **Traitement des sous-produits de la réaction**

En catalyse homogène, la fraction glycérine et les eaux de lavage sont neutralisées par un acide minéral. Elles sont réconcentrées par distillation après décantation des acides gras libres au cours de la neutralisation. La glycérine obtenue doit être soumise à divers traitements de purification.

En catalyse hétérogène, l'effluent obtenu est soumis à une évaporation partielle qui élimine l'excès d'alcool. La glycérine obtenue après décantation présente une qualité supérieure à celle obtenue par les procédés fonctionnant à catalyse homogène pouvant être utilisée sans traitement.

La figure suivante résume les étapes de la production du biodiesel selon les procédés existant

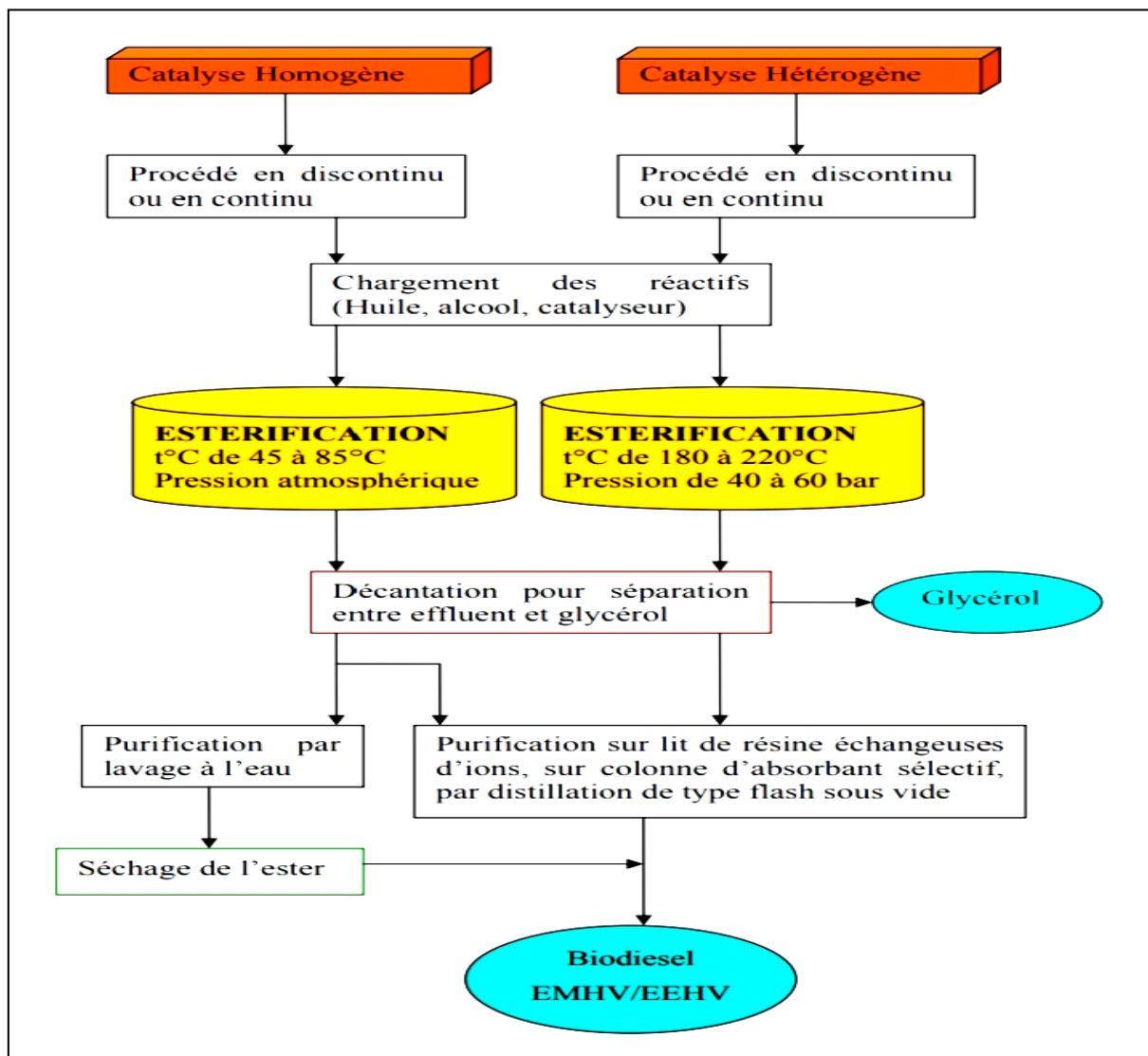


Figure 30 : Opérations d'obtention du biodiesel

Conclusion

Conclusion

Le secteur des transports est grandement dépendant des combustibles d'origine fossiles qui, selon les nombreuses prédictions, tendent vers un épuisement des réserves à plus ou moins long terme. De plus, l'utilisation de ceux-ci cause de nombreuses problématiques reliées, entre autres, au réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre, à l'instabilité des prix et aux nombreuses tensions géopolitiques. C'est donc face à ces constats que les biocarburants tels le bioéthanol et le biodiesel ont vu le jour. Toutefois, la production de ceux-ci a soulevé de nouvelles problématiques dont l'utilisation accrue des terres agricoles, l'augmentation des prix des aliments, la déforestation, la pollution des cours d'eau par les fertilisants et pesticides ainsi que des impacts négatifs sur la sécurité alimentaire. Ces biocarburants ont d'ailleurs un potentiel très limité à assurer un remplacement des combustibles fossiles.

Dans l'optique de limiter les impacts de l'utilisation des combustibles fossiles, la production de biodiesel à partir des microalgues a émergé comme une solution idéale pour assurer un remplacement total ou partiel des carburants non renouvelables utilisés dans le secteur des transports. Plusieurs avantages sont reliés à l'utilisation des microalgues comparativement aux autres biocarburants. En effet, les microalgues possèdent une capacité de production importante en biomasse, un contenu en huile très intéressant ainsi qu'une croissance extrêmement rapide. Leur production n'entraîne pas une augmentation de l'utilisation des terres et n'affecte pas la sécurité alimentaire. La biomasse produite peut également servir à la production de divers produits dérivés pouvant être utilisés pour l'alimentation humaine et animale (vitamines, nutraceutiques, cosmétiques).

L'objectif de ce travail consiste à synthétiser le biodiesel à partir d'huile des algues par la réaction de « transestérification » qui est la technique la plus utilisée pour la synthèse de biodiesel. Ce travail met également l'accent sur les difficultés rencontrées et les verrous nécessaires à enlever, pour parvenir à l'industrialisation et la commercialisation des algocarburants.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A

- Andersen, R.A. 2013. The Microalgal Cell. In Handbook of Microalgal Culture, A.R.P.D. Emeritus, and Q.H. Ph.D, eds. (John Wiley & Sons, Ltd), pp. 1–20.
- Aurore Villay, 2013, Production en photobioréacteurs et caractérisation structurale d'un exopolysaccharide produit par une microalgue rouge : *Rhodella violacea*. Application à l'obtention d'actifs antiparasitaires, 626, p :1.

B

- Ballerini Daniel, 2006. Les Biocarburants état des lieux, perspectives et enjeux du développement, IFP publications, Editions TECHNIP.
- Baudu, L.J. (2009). Solazyme et ses micro-algues à tout faire, [En ligne]. <http://www.latribune.fr/journal/edition-du-2809/green-business/277711/solazyme-etses-micro-algues-a-tout-faire.html> (Page consultée le 2 novembre 2009).
- Beer, L.L., Boyd, E.S., Peters, J.W., and Posewitz, M.C. 2009. Engineering algae for hydrogen and biofuel production. *Curr. Opin. Biotechnol.* 20, 264–271.
- Becker, E.W. 2007. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnol. Adv.* 25, 207–210.
- Benzidane Dehiba, Baba Hamed Mohamed Bey and Abi-Ayad Sidi-Mohammed El-amine (2017). Biodiesel production from marine microalgae *Nannochloropsis gaditana* by in situ transesterification process. *African Journal of Biotechnology*, 16(22):1270-1277
- Bensmail, L. (2014). Contribution à la production du biométhane à partir des déchets ménagers de la ville de Bechar. Thèse Doctorat. Université de Bechar.
- Bernard, 2011. Shamash, production de biocarburant lipidique par des micro-algues, rapport final. Programme National de Recherche sur les Bioénergies, 2011, p1-21
- Bocanegra A., Bastida S., Benedí J., Ródenas S. & Sánchez-Muniz F.J., 2009. Characteristics Nutritional and Cardiovascular-Health Properties of Seaweeds. *Journal of Medicinal Food*, 12(2): 236-258.

C

- Carlsson, A.S., van Beilen, J.B., Möller, R., Clayton, D (2007). Micro-and macro- algae: utility for industrial applications, In: Bowles D, editor. Outputs from the EPOBIO project. UK: CPL Press. pp. 82.
- Carvalho, A.P., Meireles, L.A., Malcata, F.X., 2006. Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. *Biotechnol. Prog.* 22, 1490–1506.
- Chinnasamy, S., Bhatnagar, A., Hunt, R.W., Das, K.C., 2010. Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications. *Bioresource Technology* 101, 3097–3105.
- Chojnacka K., Saeid A., Witkowska Z. & Tuhy L., 2012. Biologically Active Compounds in Seaweed Extracts - the Prospects for the Application. *The Open Conference Proceedings Journal*, 3 : 20-28.
- Chouikhi A., 2013. Les applications potentielles des macrophages marines et les activités pharmacologiques de leurs métabolites. USTHB-FBS-4th International Congress of the Populations & Animal Communities "Dynamics & Biodiversity of the terrestrial & aquatic Ecosystems" CIPCA4"TAGHIT Bechar – ALGERIA, 40 p.
- Chynoweth D.P. Review of biomethane from marine biomass. University of Florida. 2002.
- Columnist - 2020 (2009). Advanced biofuels and biomass markets, Producer profiles, and commercialization outlook, [En ligne]. <http://www.emergingmarkets.com/algae/Algae2020StudyandCommercializationOutlook.pdf> (Page consultée le 15 octobre 2009).

D

- Daniel Ballerini, Nathalie Alazard-Toux, Les biocarburants, Etat des lieux, Perspectives et enjeux du développement. IFP Publications. Editions Technip, Paris, Jan.2006.
- Darcy-Vrillon B., 1993. Nutritional aspects of the developing use of marine macroalgae for the human food industry. *Food Science Nutrition*, 4435.
- Dubreuil A, 2008. Les biocarburants au cœur de la polémique Crutzen, atelier Changement Climatique.

F

Références bibliographiques

-Fleurence J., 1999. Seaweed proteins: biochemical, nutritional aspects and potential uses. *Trends in Food Science and Technology*, 10(1): 25-28.

G

-Garon-Lardiere, S., 2004. Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata* (Bonnemaisoniales). Université De Bretagne Occidentale.

-G. E. Fogg, 1953. *The Metabolism of Algae*.

-Gilles Vaitilingom (2013), utilisation des biocarburants dans les moteurs à allumage par compression : Escola de Combustão, 34398 Montpellier – France, Belém, 24-28 de junho de 2013.

-Gordon, H. T., Bauernfeind, J. C. (1982). Carotenoids as food colorants. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, pp. 18–59.

-Guschina, I.A., and Harwood, J.L. 2006. Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Prog. Lipid Res.* 45, 160–186.

-Grossman, A.R., Bhaya, D., Apt, K.E., and Kehoe, D.M. 1995. Light-harvesting complexes in oxygenic photosynthesis: diversity, control, and evolution. *Annu. Rev. Genet.* 29, 231–288.

H

-Hamid N., Ma Q., Boulom S., Liu T., Zheng Z., Balbas J. & Robertson, J., 2015. Chapter 8- Seaweed minor constituents. In: Troy D.J., Ed. *Seaweed Sustainability, food and nonfood applications*. Academic Press, San Diego, 193-242.

-Holdt S.-L. & Kraan S., 2011. Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *Journal of Applied Physiology*, 23: 543-59.

-Hoppe, H.A. (1979). Marine algae and their products and constituents in pharmacy. In :Hoppe HA, Levrving T, Tanaka Y (eds), *Marine Algae in pharmaceutical science* Walter de Gruyter, Berlin-New York, pp :25-119.

-Hortense F., 2011. Les applications et la toxicité des algues marines. Thèse de Doctorat. Université de Limoges, France, 131 p.

J

-Jiang, Y., Chen, F., Liang, S.Z. (1999). Production potential of docosahexaenoic acid by the heterotrophic marine dinoflagellate *Cryptothecodinium cohnii*. *Process Biochemistry*, 34, pp. 633-637.

K

- Kara Ali M., 2014. Isolement et caractérisation de souches levurienne des milieux arides productrices de l'éthanol sur différents substrats. Thèse de doctorat, Université Constantine 1, Algérie. 129 pages.
- (Kerlero de Rosbo et al, 2014)Kerlero de Rosbo, Bernard, Mairet, Ras de Moncuit, Grimaud, Delclaux, Rey, Payen. Evaluation du gisement potentiel de ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à l'horizon 2030. ENEA consulting, INRIA, ADEME, 2014, p1-122
- Kuchitsu, K., Tsuzuki, M., and Miyachi, S. 1988. Characterization of the pyrenoid isolated from unicellular green alga *Chlamydomonas reinhardtii* : Particulate form of RuBisCO protein. *Protoplasma* 144, 17–24.

L

- Leclerc V. & Floc'h J-Y., 2010. Les secrets des algues. Ed Quae, p : 167.
- Lefebvre, D. (2007). Huile carburant d'algues, les nouveaux chercheurs d'or vert américains. In *éconologie* [En ligne].<http://www.econologie.com/biocarburant-a-base-d-huile-demicroalgues-et-centrale-verte-articles-3576.html> (Page consultée le 23 octobre 2009).
- Lordan S., Ross R.-P. & Stanton C., 2011. Marine bioactives as functional food ingredients: Potential to reduce the incidence of chronic diseases. *Marine Drugs*, 9: 1056-1100.
- Lutzky, Ana. (2009). Dans le noir, les micro-algues mangent du sucre. In *Usine nouvelle* [En ligne].<http://www.usinenouvelle.com/article/dans-le-noir-les-micro-algues-mangent-du-sucre.159075> (Page consultée le 20 octobre 2009).

M

- Mabeau S. et Fleurence J., 1993. Seaweed in food products: Biochemical and nutritional aspects. *Food Science and Technology*, 4(4): 103-107.

Références bibliographiques

-Matanjun P., Mohamed S., Mustapha N.-M. & Muhammad K., 2009. Nutrient content of tropical edible seaweeds, *Eucheumacottonii*, *Caulerpalentillifera* and *Sargassumpolycystum*. *Journal of AppliedPhycology*, 21: 75-8

-Michel Cavalla, 2000. Les Algues, les micro-algues. URL http://mcavalla.free.fr/rsr/Algues_operon.pdf

N

-Nathan, S. (2008). Late bloomer. *Fuel technology*, vol. 293, n°7752, p.26-27.

O

-Ortiz J., Romero N., Robert P., Araya J., Lopez-Hernández J., Bozzo C. & Rios A., 2006. Dietary fiber, amino acid, fatty acid and tocopherol contents of the edible seaweeds *Ulva lactuca* and *Durvillaea Antarctica*. *Food Chemistry*, 99(1) : 98-104.

P

-Person et al, 2011. Livre turquoise : D'après le colloque : Algues, filières du futur !

-Person J. 2010. Livre turquoise : Algues, filière du future. *Adebiotech- Romainville*, p : 163.

-Pulz, O., Gross, W. (2004). Valuable products from biotechnology of microalgae. Minireview, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Volume 65, Number 6, pp.635648.

R

-Richmond, 2004 :Biological principles of mass cultivation. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. *Microalgal culture*.

-Roger A. Korus, Dwight S. Hoffman, Narendra Bam, Charles L. Peterson, David C.Drown, Transesterification process to manufacture ethyl ester of rape oil. Department of chemical Engineering, University of Idaho, Moscow. *Proceedings of first biomass conference of the Americas: Energy, Environment, Agriculture and Industry*, Vol. II, pp. 876-890 (1993).

-Roland J.C., El Maarouf-Bouteau H. &Bouteau F, 1999. *Atlas biologie végétale. Organisation des plantes sans fleurs, algues et champignons*, 7e Ed. Dunod, Paris, p : 139

-Rousseau, F. (2009). Solazyme signe avec l'US Navy pour la fourniture d'algo-carburant. In les énergies de la mer [En ligne]. <http://energiesdelamer.blogspot.com/2009/09/solazyme-signe-avec-lus-navy-pourla.html> (Page consultée le 29 octobre 2009).

S

- Satyanarayana et al, 2011] Satyanarayana, Mariano, Vargas. A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials. *Energyresearch*, 2011, vol 35, p291-311
- Sánchez-Machado D.-I., López-Cervantes J., López-Hernández J. & Paseiro-Losada P., 2004. Fatty acids, total lipid, protein and ash contents of processed edible seaweeds. *Food Chemistry*, 85: 439-444.
- SánchezMirón, A., Contreras Gomez, A., GarcíaCamacho, F., Molina Grima, E., Chisti, Y., 1999. Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae. *Journal of Biotechnology* 70, 249–270.
- Scragg Alan.H, 2009. *bio fuels Production, application and développement*, CAB International,
- Semaska, D. (2008). Les algues de Solazyme font des vagues, [En ligne]. http://www.ecolife.fr/print_article.php?id_article=2136 (Page consultée le 21 octobre 2009).
- Sialve B.1 ,Steyer J-P.1 . (2013). Les microalgues, promesses et défis, *Innovations Agronomiques* 26, pp : 25-39.
- Solazyme (2008). Technology, [En ligne]. <http://www.solazyme.com/content/technology> (Page consultée le 15 octobre 2009).
- Solix (2009). Solix's product, [En ligne]. <http://www.solixbiofuels.com/content/products> (Page consultée le 22 octobre 2009).
- Stolz, P., Obermayer B. (2005). Manufacturing microalgae for skin care. *Cosmetics Toiletries*, 120: 99-106.

T

- Taboada C., Rosendo M. & Isabel M., 2009. Composition, nutritional aspects and effect on serum parameters of marine algae *Ulva rigida*. *Journal of Science Food and Agriculture*, 903: 445-449.
- Tierney M.-S., Croft A.-K. & Hayes M., 2010. A review of antihypertensive and antioxidant activities in macroalgae. *Botanica Marina*, 53: 387-408.
- Touati Lounis, 2013. *Valorisation des grignons d'olive Etude de cas: Essai de valorisation en Biocarburant magister*.

V

Références bibliographiques

-Vian et al, 2013] Vian, Tanzi, Chemat. Techniques conventionnelles et innovantes, et solvants alternatifs pour l'extraction des lipides de micro-organismes. EDP sciences, 2013, p1-6

-Voith, M. (2009). Solazyme nets bigbucksfrominvestors, [En ligne]. <http://www.icis.com/Logon/Logon.aspx?RequestedUrl=/Articles/2009/06/15/9230292/Solazyme-nets-big-bucks-from-investors.html&ArticleSource=5> (Page consultée le 21 octobre 2009).

W

-Wolff, 2012] L'utilisation des microalgues pour la fabrication de biocarburants : analyse de la chaîne de valeur contexte français et international, 2012, p1-59

Z

-Zitouni H., 2015. Valorisation nutritionnelle d'algues marines du littoral Algérien chez le ruminant via des méthodes chimiques, biologiques et moléculaires. Thèse de Doctorat. Université des Frères Mentouri Constantine, 161 p.

-Z. P. Ying Shen, "Effect of nitrogen and extraction method on algal lipid yield. Int J Agric Biol Eng," Int. J Agric. Biol. Eng. , vol. 2, no. 1, 2009.