



DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MER ET DE L'AQUACULTURE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

BENALI Cherif et CHAREF BENDAHA Cherif

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN HYDROBIOLOGIE MARINE ET CONTINENTALE

Spécialité: Bioressources Marines

THÈME

**Production de biocarburant (biodiesel) à partir
des huiles des microalgues et des macroalgues**

Soutenue publiquement le 15/09/2019

DEVANT LE JURY

Président : Dr. BENAMAR Nardjess

MCA

U. Mostaganem

Encadreur : Mme. BENZIDANE Dehiba

MAA

U. Mostaganem

Examineur : Dr. BELBACHIR NorEddine

MCB

U. Mostaganem

Thème réalisé au Laboratoire de Biochimie N°2 (Université de Mostaganem)

Remerciements

Avant toute chose, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant, pour nous avoir donné la force et la patience.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mme. BENZIDANE Dehiba** : Un remerciement particulier et sincère pour tous vos efforts fournis, vous avez toujours été présent. Que ce travail soit un témoignage de notre gratitude et notre profond respect.

Ma gratitude revient à **Dr. BENAMAR Nerdjess**, d'avoir accepté de présider mon jury.

Sensible à l'intérêt que vous avez bien voulu porter à ce travail, je vous prie de croire en mon éternel respect et ma sincère gratitude.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à **M. BELBACHIR Noreddine**, pour sa gentillesse, sa disponibilité, son enseignement et de m'avoir fait l'honneur de participer au jury de cette soutenance.

Nos profonds remerciements vont également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nos sincères remerciements s'adresse à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenue de près ou de loin principalement au responsable des laboratoires **M. SOUANE A.** et la technicienne du laboratoire de Biochimie « 2 » **Mme. MOKHTARIA.**

Dédicace

Je dédie ce mémoire de fin d'étude,

A ma mère

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le
dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au
monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation
et mon bien être.*

*Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour
ma formation.*

A Mon père

Mon exemple éternel que dieu te garde dans son vaste paradis.

*A Mes chères soeurs et mes frères, sans vos encouragements ce
travail n'aurait vu le jour.*

A tous les membres de ma famille

A mon binôme BENALI Cherif et mes chères amies,

*je ne peux trouver les mots justes et
sincères pour vous exprimer mes pensées, vous êtes pour moi des
gens sur qui je peux compter.*

Je dédie ce travail pour vous en espérant la réussite et le succès.

Cherif

Dédicace

Je dédie ce modeste travail...

A Mes parents :

Ma mère, qui a oeuvré 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.

A Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

A Mes frères et soeurs, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A Ma fiancé Fadela pour son soutien.

A mon binôme Charef Bendaha Cherif Et tous mes amis.

B. Cherif

Résumé :

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 macroalgue et de microalgues.

Notre travail a porté sur quatre algues, trois macroalgues (*Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius* et *Cystoseira amentacea*) et une microalgue (*Nannochloropsis gaditana*). La méthode d'extraction des lipides « Soxhlet » a été utilisée pour la détermination de la teneur en lipide chez ces microalgues. Afin de produire du biodiesel à partir de la biomasse des algues, une réaction de transesterification a été effectuée.

Les résultats obtenus montrent que la teneur en lipides chez *Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius*, *Cystoseira amentacea* et la microalgue *Nannochloropsis gaditana* est de 10,41 %, 14 %, 15,16 % et 18,33 % respectivement. Le rendement du biodiesel produit par la réaction de transesterification direct est plus important chez la microalgue *Nannochloropsis gaditana* (39,7 %) comparé aux macroalgues. En effet, le taux de biodiesel chez *Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius* et *Cystoseira amentacea* est de 31,2 %, 35,3 % et 35,1%, respectivement.

La comparaison entre le rendement en biodiesel chez des espèces de macroalgues et une espèce de microalgue montre clairement que les microalgues sont de meilleur candidat pour la production future de biodiesel.

Mots clés : Algues, Biodiesel, *Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius*, *Cystoseira amentacea*, *Nannochloropsis gaditana*, Transesterification.

Abstract

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. This work is part of this global approach to synthesize biofuel and more particularly biodiesel from macroalgae oil and microalgae.

Our work focused on four algae, three macroalgae (*Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius* and *Cystoseira amentacea*) and one microalgae (*Nannochloropsis gaditana*). The "Soxhlet" lipid extraction method was used to determine the lipid content of these microalgae. In order to produce biodiesel from algal biomass, a transesterification reaction was performed.

The results obtained show that the lipid content in *Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius*, *Cystoseira amentacea* and the microalga *Nannochloropsis gaditana* is 10.41%, 14%, 15.16% and 18.33% respectively. The yield of biodiesel produced by the direct transesterification reaction is higher in the microalgae *Nannochloropsis gaditana* (39.7%) compared to macroalgae. Indeed, the biodiesel content in *Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius* and *Cystoseira amentacea* is 31.2%, 35.3% and 35.1%, respectively.

The comparison between biodiesel yield in macroalgae species and a microalgae species clearly shows that microalgae are a better candidate for future biodiesel production.

Keywords : Algae, Biodiesel, *Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius*, *Cystoseira amentacea*, *Nannochloropsis gaditana*, Transesterification.

الملخص:

معظم الطاقة المستهلكة في العالم تأتي من النفط. ومع ذلك، فإن هذا المصدر محدود ويمكن استنفاده بحلول نهاية القرن القادم. لهذه الأسباب، من الضروري استبدال الوقود الأحفوري بمصادر بديلة للطاقة مثل الوقود الحيوي. العمل الحالي هو جزء من هذا النهج العالمي لتوليف الوقود الحيوي وخاصة الديزل الحيوي من زيت الطحالب الكبيرة والطحالب الدقيقة. ركز عملنا على أربع طحالب، وثلاث طحالب كبيرة (*Ulva lactuca*، *Sphaerococcus coronopifolius* و *Cystoseira amentacea*) و . طحلب صغير (*Nannochloropsis gaditana*) تم استخدام طريقة استخراج الدهون Soxhlet لتحديد محتوى الدهون في هذه الطحالب المجهرية. من أجل إنتاج وقود الديزل الحيوي من الكتلة الحيوية الطحالب، تم تنفيذ رد فعل transesterification بها. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن محتوى الدهون في *Ulva lactuca* و *Sphaerococcus coronopifolius* و *Cystoseira amentacea* و *Nannochloropsis gaditana* هي 10.41٪ و 14٪ و 15.16٪ و 18.33٪ على التوالي. غلة وقود الديزل الحيوي التي تنتجها رد فعل transesterification المباشر أعلى في الطحالب المجهرية (39.7٪) مقارنة مع الطحالب الكبيرة. في الواقع، فإن معدل الديزل الحيوي في *Ulva lactuca*، *Sphaerococcus coronopifolius* و *Cystoseira amentacea* هو 31.2 ٪، 35.3 ٪ و 35.1 ٪ على التوالي. إن مقارنة إنتاجية الديزل الحيوي في أنواع الطحالب الكبيرة مع أنواع الطحالب الدقيقة توضح بوضوح أن الطحالب الدقيقة هي أفضل مرشح لإنتاج الديزل الحيوي في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: الطحالب، الديزل الحيوي، *Ulva lactuca*، *Sphaerococcus coronopifolius*، *Cystoseira amentacea*، *Nannochloropsis gaditana*، transesterification.

Table des matières

I. Introduction.....	01
II. Synthèse bibliographique.....	02
1. Généralité sur les Algues.....	02
1.1. Les maro-algues.....	03
1.1.1. Classification.....	03
a. Les algues brune (Phéophycées).....	03
b. Les algues rouges (Rhodophycées).....	03
c. Les algues vertes (Chlorophycées).....	04
1.1.2. Composition biochimique des macro-algues.....	04
a. Polysaccharides	04
b. Protéines.....	05
c. Lipides.....	06
d. Minéraux.....	06
1.1.3. Application des macro-algues.....	07
1.2. Les micro-algues.....	08
1.2.1. Classification.....	08
1.2.2. Composition biochimique.....	09
1.2.3. Application des microalgues.....	11
2. Les biocarburants.....	12
2.1. Définition.....	12
2.2. Les sources de biocarburants.....	13
2.2.1. Biocarburant de 1 ^{ère} génération	13
2.2.2. Biocarburant 2 ^{ème} génération.....	14
2.2.3. Biocarburant 3 ^{ème} génération.....	16
3. Production du Biodiesel.....	17
3.1. Définition de biodiesel.....	17
3.2. Transestérification.....	17
3.2.1. Historique.....	18
3.2.2. Les facteurs influençant de la réaction de transestérification.....	18
4. Espèces étudier.....	19
4.1. <i>Ulva lactuca</i>	19

4.1.1. Taxonomie.....	19
4.1.2. Caractéristiques	19
4.2. <i>Cystoseira amentacea</i> var. <i>stricta</i>	21
4.2.1. Taxonomie.....	21
4.2.2. Caractéristiques.....	21
4.3. <i>Sphaerococcus coronopifolius</i>	23
4.3.1. Taxonomie.....	23
4.3.2. Caractéristiques.....	23
4.4. <i>Nannochloropsis gaditana</i>	25
4.4.1. Taxonomie.....	25
4.4.2. Caractéristiques.....	25
III. Matériels et méthodes.....	27
1. Matériel biologique.....	27
1.1. Espèces de micro-algues.....	27
1.2. Espèces de macro-algues.....	27
1.2.1. Présentation du site d'échantillonnage.....	27
1.2.2. Sélection et identification des espèces cibles.....	28
1.2.3. Collecte et traitement des échantillons.....	28
2. Analyse chimique de la biomasse	29
2.1. Extraction des lipides par Soxhlet	29
2.1.1. Principe.....	29
2.1.2. Caractéristiques des produits utilisés.....	31
2.1.3. Mode opératoire.....	33
2.2. Production du biodiesel par transestérification.....	35
2.2.1. Principe.....	35
2.2.2. Caractéristiques des produits utilisés.....	35
2.2.3. Mode opératoire.....	37
IV. Résultats et Discussions.....	40
V. Conclusion.....	45
VI. Références	47
Webographie.....	57

Liste des Figures

Figure 1 : Les algues.....	02
Figure 2 : Biodiesel de première génération.....	14
Figure 3 : Biodiesel de deuxième génération.....	15
Figure 4 : Biodiesel de troisième génération.....	16
Figure 5 : Réaction générale de la transestérification.....	17
Figure 6 : <i>Ulva lactuca</i>	19
Figure 7 : Classification de <i>L'Ulva lactuca</i>	20
Figure 8 : <i>Cystoseira amentacea var. stricta</i>	21
Figure 9 : Classification de <i>Cystoseira amentacea var. stricta</i>	22
Figure 10 : <i>Sphaerococcus coronopifolius</i>	23
Figure 11 : Classification de <i>Sphaerococcus coronopifolius</i>	24
Figure 12 : <i>Nannochloropsis gaditana</i> ($\times 100$).....	25
Figure 13 : Classification de <i>Nannochloropsis gaditana</i>	26
Figure 14 : Localisation géographique du site de l'échantillonnage (Google Earth, 2019)..	27
Figure 15 : Les étapes de préparation de l'échantillon.....	29
Figure 16 : Montage d'un appareil de Soxhlet.....	30
Figure 17 : Formule développée de n- hexane.....	31
Figure 18 : Formule développée de Propan-2-ol.....	32
Figure 19 : Les étapes de l'extraction et de récupération de solvant et l'huile d'algue..	34
Figure 20 : Équation de la transestérification.....	35
Figure 21 : Formule développée de Méthanol.....	36
Figure 22 : Formule développée d'Acide Sulfurique.....	36
Figure 23 : Schéma de la transestérification.....	37
Figure 24 : Les étapes de l'extraction et de récupération biodiesel.....	39
Figure 25 : Pourcentage en lipides des espèces étudiée.....	40
Figure 26 : Teneur en biodiesel par rapport à la biomasse des 4 espèces étudiée.....	42
Figure 27 : Teneur en biodiesel par rapport aux lipides des 4 espèces étudiée.....	43

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Diversité des microalgues eucaryotes et procaryotes, marines et d'eau douce	09
Tableau 2 : Les principale caractéristiques de l'hexane.....	31
Tableau 3 : Les principale caractéristiques de Propan-2-ol.....	32
Tableau 4 : Les principale caractéristiques du méthanol.....	36
Tableau 5 : Les principale caractéristiques d'Acide Sulfurique.....	37

Liste des abréviations

AGPI : Acides gras polyinsaturés.

MS : Matière sèche

AG : Acide gras

% : Pour cent

DHA : Docosahexaénoïque

EPA : Acide eicosapentaénoïque

HC : Hydrocarbures

CO₂ : Dioxyde de carbone

CO : Monoxyde de carbone

H₂ : Hydrogène

EAHV : D'ester alkylique d'huile végétale

HV : Huile végétale

µm : Micromètre

cm : Centimètre

m : Mètre

F.A.O : Food and Agriculture Organization

N° : Numéro

ppm : Partie par million

HCL : Acide chlorhydrique

g : Gramme

ml : Millilitre

h : Heur

°C : Degré Celsius

min : Minute



Introduction



I. 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. Elles produisent des glucides, des lipides, des pigments et des protéines complexes dont les propriétés biologiques et physico-chimiques sont valorisables en industrie alimentaire, en cosmétique, dans 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 bioraffinerie 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).



Synthèse Bibliographique



II. Synthèse bibliographique :

1. Généralité sur les Algues :

Les algues sont des organismes aquatiques, chlorophylliens, thallophytes qui appartiennent au groupe des cryptogames (Roland *et al.*, 1999). Elles possèdent toutes de la chlorophylle et en ce sens, ce sont des végétaux (Leclerc & Floch, 2010). La photosynthèse leur 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'ondes (Person, 2010). Elles sont une partie des producteurs primaires constituant le premier niveau trophique des écosystèmes. Les algues sont donc un élément fondamental du fonctionnement des milieux aquatiques et en particulier la ressource trophique des organismes phytophages (Dutartre *et al.*, 2008). Les algues regroupent un ensemble d'organismes très variés, divisés en deux groupes (**Figure 1**) :

- Les macro-algues
- Les micro-algues



Figure 1. Les algues

1.1. Les macro-algues :

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 & 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).

1.1.1 Classification :

Les algues peuvent être classées en une dizaine d'embranchements selon des critères basés sur leur composition pigmentaire, leurs polysaccharides de réserve ou leurs caractéristiques structurales (Ruiz, 2005). Un des critères de classification des macro-algues est leur pigmentation, qui permet de définir plusieurs grands groupes :

a. Les 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, 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).

b. Les 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, 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).

c. Les 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. 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).

1.1.2 Composition biochimique des macro-algues :

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 & Fleurence, 1993).

a. Polysaccharides :

Le fort intérêt des macro-algues 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 particuliers : 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 & 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 marines 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%. Ces teneurs 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 oeufs (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 & 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 faible et varie 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 & 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 macro-algues.

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 autres facteurs (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).

1.1.3 Application des macro-algues :

Les algues sont utilisées on domaines suivants [1] :

- **Agro-alimentaire** : géloses et alginates utilisés comme agents émulsifiants, épaississants, stabilisants, gélifiants (additifs de E 400 à E 408), excipients...
- **Agriculture** : utilisés comme engrais.
- **Dentisterie** : pâtes pour empreintes dentaires.
- **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.
- **Médecine** : en thalassothérapie on utilise les bains d'algues (algorithérapie) pour traiter les rhumatismes ou certaines affections de l'appareil locomoteur ; en chirurgie ou gynécologie on utilise des stipes de Laminaires (pour leur propriété à retenir l'eau tout en se dilatant) traités pour débrider une plaie ou dilater une voie naturelle.
- **Pharmacie** : on utilise les propriétés laxatives ou vermifuges de certaines algues leurs propriétés antibactériennes ou antifongiques, vermifuges anticoagulantes.
- **Biocarburant** : production de biodiesel.

D'autres industries sont concernées comme la Parfumerie, la Papeterie, l'Industrie textile, le traitement des eaux usées (microalgues, algues vertes d'eau douce).

1.2. Les micro-algues :

Les micro-algues sont des organismes unicellulaires. Ce sont des végétaux aquatiques dont l'ordre de grandeur varie de 10 à 100 μm . Elles se multiplient le plus souvent par voie non sexuée. Il en existe entre 200 000 et 1 000 000 espèces dont 30 000 sont connues à l'heure actuelle et seulement une dizaine sont cultivées. Tout comme les cyanobactéries, les micro-algues 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 micro-algues peuvent eux être utilisés dans le but de produire du biodiesel.

Une micro-algue est délimitée par une membrane plasmique contenant au sein de son cytoplasme de nombreux organites : les chloroplastes, les amyloplast, 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.

Il existe deux groupes de micro-algues, 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'organites cellulaires [2].

1.2.1. Classification :

Les microalgues constituent un groupe extrêmement hétérogène rassemblé autour d'une cohérence physiologique : la photosynthèse oxygénique. Cette famille rassemblerait de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions d'espèces selon les estimations, parmi lesquelles 47000 espèces sont décrites.

Par comparaison, la diversité des plantes supérieures est de l'ordre de 400 000 espèces. La classification (**Tableau 1**) 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 & Steyer, 2013).

Tableau 1 : Diversité des microalgues eucaryotes et procaryotes, marines et d'eau douce (Sialve & Steyer, 2013).

Règne	Embranchement/Classe
Procaryotes	Cyanophytes
	Prochlorophytes
Eucaryotes	Bacillariophytes
	Charophytes
	Chlorophytes
	Chrysophytes
	Cryptophytes
	Dinophytes
	Euglenophytes
	Glaucophytes
	Haptophytes
	Phaeophytes
	Rhodophytes

1.2.2. 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 peptidoglycane, 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 poly-insaturés (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 est à noter 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 & Harwood, 2006).

1.2.3. Applications 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.

a. 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 & 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 & Bouernfeind, 1982).

b. 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).

c. Domaine cosmétique

Plusieurs espèces de microalgues sont exploitées industriellement dans le domaine cosmétique, principalement les deux espèces *Arthrospira* et *Chlorella* (Stolz & Obermayer, 2005).

Des extraits d'algues, ayant une activité antioxydante, sont exploitées 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).

d. 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

e. 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 (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 précédés mettant en œuvre d'autres types de biomasse (Carlsson *et al.*, 2007).

2. Les biocarburants :

2.1. Définition :

Les biocarburants sont des produits énergétiques d'origine végétale ou animale utilisés comme source d'énergie pour les moteurs des véhicules automobiles. L'expression « Biocarburant » (du grec bios, vie, vivant et du latin carbo, charbon, carbone). Le préfixe bio précise simplement que le carburant est d'origine biologique, produit au départ de matière vivante, animale ou végétale. Lorsque ces produits énergétiques sont utilisés pour le chauffage, ils sont considérés comme combustibles (Hamad, 2009).

2.2. Les sources de biocarburants :

On distingue généralement trois générations de biocarburants, qui se différencient par la nature de la biomasse utilisée pour leur production :

2.2.1. Biocarburant de 1^{ère} génération :

Les biocarburants de la 1^{ère} génération se partagent principalement en deux filières, selon les deux grands types de moteurs à explosion (Hamad, 2009 ; Nguyen van cuong, 2010) :

A) La filière huile :

Cette filière est principalement basée sur le colza, mais le tournesol, l'huile de coco ou l'huile de palme peuvent également être des matières premières pour cette filière. Hors agriculture, la filière huile a également un grand potentiel par le recyclage des huiles végétales et animales usagées.

L'huile extraite des cultures oléagineuses peut, après filtration, être utilisée directement dans les moteurs diesel (mélangée au diesel ou pure). Certaines adaptations des véhicules sont nécessaires en cas de mélange au de-là de 30% d'huile. L'huile peut aussi être transformée en biodiesel par transestérification. Celui-ci est utilisé dans les moteurs diesel en mélange ou pur, généralement sans adaptations des moteurs (Hamad, 2009).

B) La filière sucre :

Utilise principalement la betterave sucrière et le froment comme matières premières, et pourrait également utiliser la pomme de terre. Dans d'autres régions, on produit l'éthanol à partir de soja (USA) ou de canne à sucre (Brésil). Dans cette filière, c'est l'utilisation de la matière cellulosique vieux papiers, bois et déchets de bois (recyclage des palettes, résidus de scieries ...), pailles, cultures énergétiques (taillis à courtes rotations) qui présente le plus gros potentiel de production à coût réduit (Hamad, 2009) (**Figure 2**).

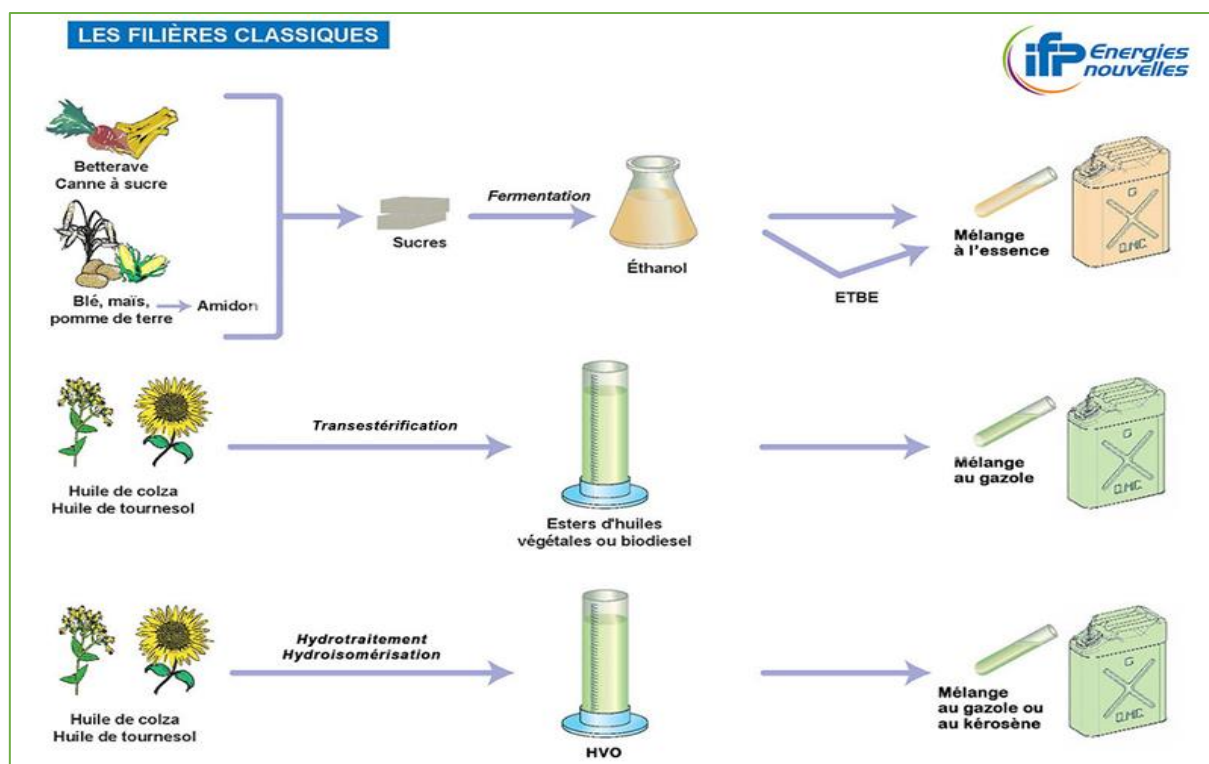


Figure 2. Biodiesel de première génération

(<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/quel-avenir-les-biocarburants>).

2.2.2. Biocarburant 2^{ème} génération :

Les biocarburants de deuxième génération sont obtenus à partir de biomasse sans concurrence avec l'utilisation alimentaire : paille de céréales, miscanthus, bois et résidus forestiers et cultures dédiées, Il y a deux filières de production possibles (Hamad, 2009) :

A) La filière biochimique :

Il s'agit de la production d'éthanol cellulosique par fermentation. Cette voie s'effectue en 3 grandes étapes. Des trois constituants majeurs de la biomasse lignocellulosique (cellulose, hémicelluloses et lignine) seule la cellulose est aujourd'hui transformable en éthanol. Une première étape consiste donc à extraire la cellulose puis à la transformer en glucose par hydrolyse à l'aide d'enzymes (Les enzymes produites dans des réacteurs à partir de microorganismes (par exemple le champignon *trichoderma reesei*) sont capables de dégrader

naturellement la cellulose en glucose). Le glucose est ensuite fermenté par des levures en éthanol. Enfin l'éthanol est purifié par distillation et déshydratation.

On cite le projet Futurol qui a pour objectif de mettre sur le marché un procédé industriel Français de production d'éthanol cellulosique pour 2015 (Burzynski, J.P., IFP, 2008).

B) La filière thermochimique

L'une des voies est la production de carburant diesel de synthèse BtL (Biomass to Liquid). Pour la voie thermochimique, la biomasse est d'abord conditionnée par pyrolyse ou torréfaction. Ensuite elle est gazéifiée à plus de 1000°C en présence de vapeur d'eau ou d'oxygène. On obtient ainsi le gaz de synthèse, constitué de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂). L'étape suivante est la synthèse Fischer-Tropsch, transformation chimique catalytique du gaz de synthèse en paraffines linéaires qui, hydrocraquées et isomérisées, produiront un gazole de synthèse (Burzynski, J.P., IFP, 2008) (**Figure 3**).

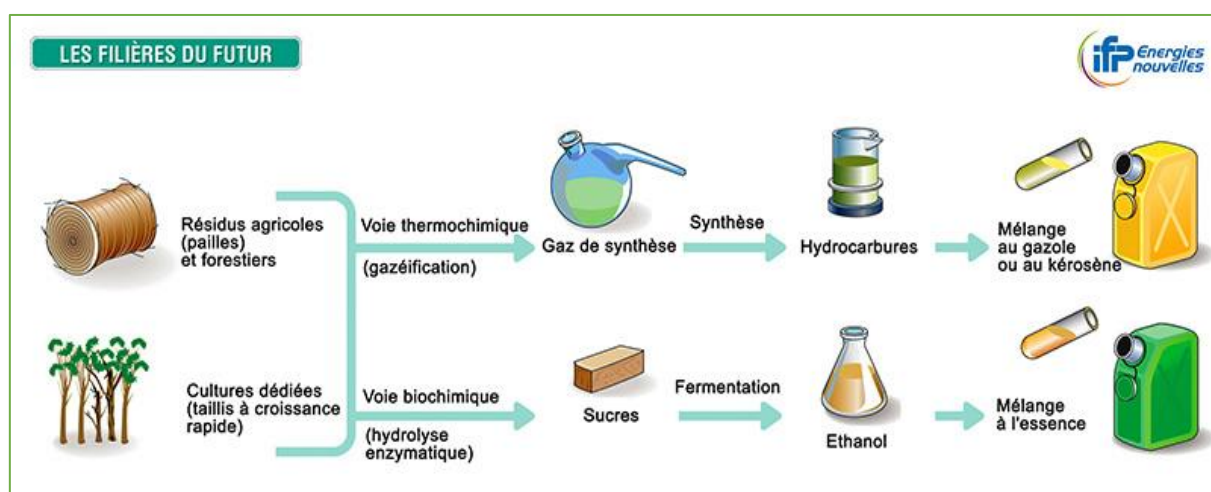


Figure 3. Biodiesel de deuxième génération

(<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/quel-avenir-les-biocarburants>).

2.2.3. Biocarburant 3^{ème} génération :

Il s'agit des agros carburants à partir de micro-algues ou les algocarburants. Les micro-algues peuvent fournir différents types d'énergies renouvelables. Il s'agit notamment du méthane produit par la digestion anaérobie des algues, du biodiesel dérivé de l'huile des micro-algues (Sandesh Kamath B, 2007) (**Figure 4**).

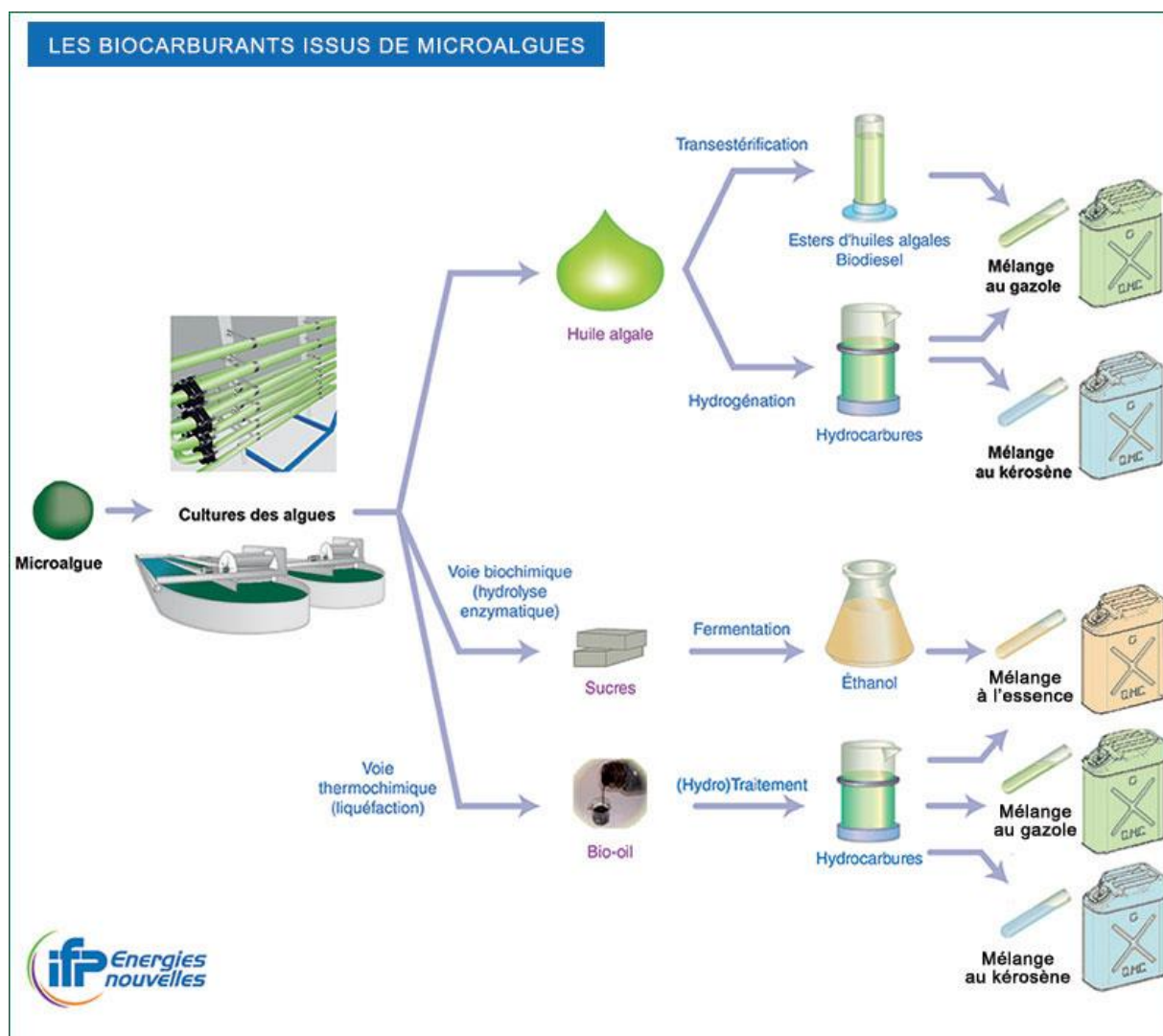


Figure 4. Biodiesel de troisième génération

(<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/quel-avenir-les-biocarburants>).

3. Production du Biodiesel :

3.1. Définition de biodiesel :

Le biodiesel est un biocombustible biodégradable et une alternative écologique au diesel (Nikiema & Heitz, 2008). Le biodiesel est un ester méthylique obtenu par réaction chimique avec un alcool léger et des matières grasses végétales ou animales (Hamad, 2009). C'est un carburant renouvelable propre qui a récemment été considéré en tant que meilleur candidat pour une substitution de gazole parce qu'il peut être employé dans n'importe quel moteur à allumage par compression sans le besoin de modification (Nguyen, 2010).

Beaucoup de travaux ont été effectués dans le but de produire des dérivés des huiles végétales ayant des propriétés et performances assez voisines de celles du diesel. On distingue quatre méthodes principales de production de dérivés d'huiles végétales (Srivastava & Prasad 2000 ; Ma & Hanna, 1999) :

- Microémulsion.
- Pyrolyse.
- Dilution.
- La transestérification

3.2. Transestérification :

La transestérification ou alcoolyse est la réaction chimique qui permet d'obtenir le biodiesel. Le passage d'état d'huile végétale à celui d'ester alkylique d'huile végétale (EAHV) permet d'améliorer certaines propriétés des huiles végétales (HV) pour des applications comme carburant tel que la réduction de la masse moléculaire, la réduction de la viscosité, ainsi que la réduction de la densité et l'augmentation de la volatilité (**Figure 5**).

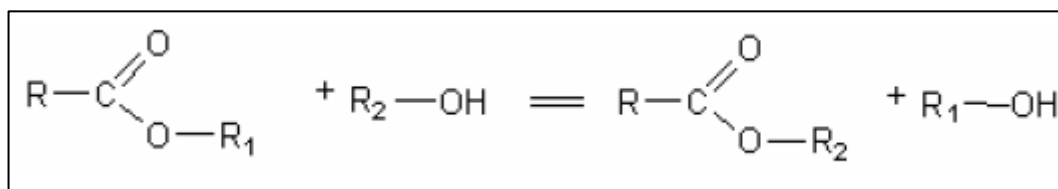


Figure 5 : Réaction générale de la transestérification.

3.2.1. Historique :

La transestérification des triglycérides n'est pas un processus nouveau. Elle date dès 1853 lorsque Patrick et Duffy ont mené cette réaction beaucoup d'années avant que le premier moteur Diesel soit fonctionnel. Cette réaction a été l'objet de recherches intensives grâce aux utilisations diverses de ces produits comprenant la synthèse des polyesters dans l'industrie des polymères, la synthèse des intermédiaires pour l'industrie pharmaceutique, le durcissement des résines dans l'industrie de peinture et dans la production du biodiesel en tant qu'alternatif du diesel (Hamad, 2009).

3.2.2. Les facteurs influençant de la réaction de transestérification :

Le procédé de transestérification est influencé par les facteurs dépendant de la condition de la réaction utilisée (Aliou, 1996). Les principaux facteurs sont les suivants :

- Le taux molaire d'alcool et l'huile.
- Le teneur en eau et l'acide gras libre dans l'huile.
- Le type de catalyseurs, la concentration de catalyseur.
- La température.
- L'intensité de mélange.
- La durée de réaction.

4. Espèces étudiier :

4.1. *Ulva lactuca* :

4.1.1. Taxonomie :

Embranchement	Chlorophyta
Classe	<i>Ulvophyceae</i>
Ordre	<i>Ulvales</i>
Famille	<i>Ulvaceae</i>
Genre	<i>Ulva</i>
Espèce	<i>Lactuca Linnaeus</i> (1753)



Figure 6 : *Ulva lactuca*

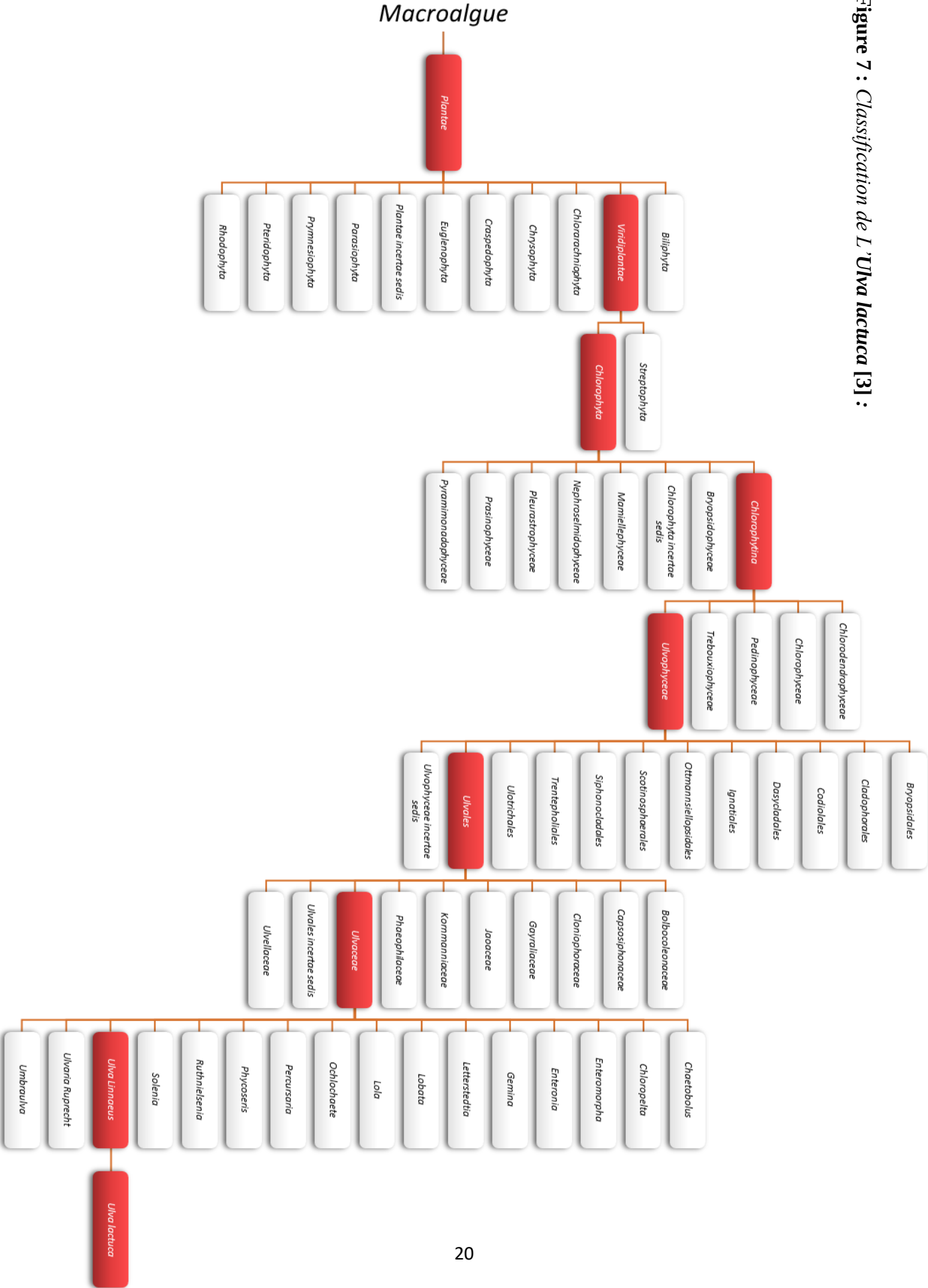
4.1.2. Caractéristiques :

Elle forme une lame très mince (bicouche cellulaire), orbiculaire et translucide et ressemble à la laitue. Le thalle mesure jusqu'à 10 cm d'envergure, aplati et entier, membraneux et irrégulièrement perforé, il est fixé par un petit crampon discoïde. Une lame bistromatique possède des cellules de 20 à 23 μm de long et 20 à 21 μm de haut, subrectangulaires et jointives, pourvues d'un chloroplaste unique pariétal. La bordure est un peu ébouriffée et souvent déchirée. Un thalle de la laitue de mer peut atteindre 18 cm de longueur, mais généralement beaucoup moins, et jusqu'à 30 cm de diamètre (Fischer *et al.*, 1987) **(Figure 6) (Figure 7)**.

Cette espèce pousse généralement en eau peu profonde jusqu'à 10 mètres, bien éclairée, au niveau de l'étage médiolittoral et infralittoral supérieur. Elle peut se fixer sur n'importe quel substrat solide : rocher, digue. Elle est cosmopolite, largement distribué en Méditerranée, mer Noire, en Atlantique et en océan Pacifique et Indien (Guiry & Guiry, 2014).

Leur durée de vie est de quelques mois, mais on en trouve toute l'année, le cycle est caractérisé par l'alternance régulière de générations haploïde (gamétophyte) et diploïde (sporophyte), qui sont morphologiquement identiques (Fischer *et al.*, 1987).

Figure 7 : Classification de *L'Ulva lactuca* [3] :



4.2. *Cystoseira amentacea* var. *stricta* :

4.2.1. Taxonomie :

Embranchement	Ochrophyta
Classe	<i>Phaeophyceae</i>
Ordre	<i>Fucales</i>
Famille	<i>Sargassaceae</i>
Genre	<i>Cystoseira</i>
Espèce	<i>amentacea</i> var. <i>stricta</i> (Montagne, 1846)



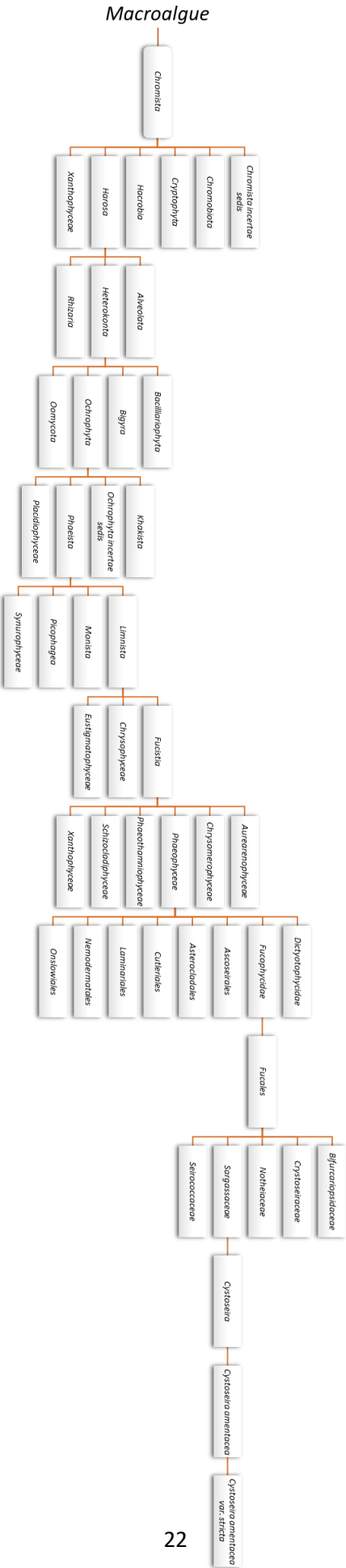
Figure 8 : *Cystoseira amentacea* var. *stricta*

4.2.2. Caractéristiques :

C. stricta est une algue érigée, de couleur brune, fixée au substrat par une base encroûtante étendue, d'où partent plusieurs axes dressés, présentant des rameaux primaires cylindriques à sommet épineux à peine saillants, mesurant de 2 à 15 cm et qui tombent en automne ; pouvant atteindre 30 cm de longueur, et qui portent des rameaux secondaires beaucoup plus courts, disposés irrégulièrement et eux-mêmes divisés (Cabioc'h *et al.*, 2006) **(Figure 8)** **(Figure 9)**.

Cette algue se rencontre sur les substrats rocheux superficiels exposés aux vagues (mode battu). Elle se développe dans les zones bien éclairées, soumises à un fort hydrodynamisme marquant la limite supérieure de l'étage infralittoral (0-1 m de profondeur). Elle peut former localement une ceinture dense et continue (Sauvageau, 1912).

Figure 9 : Classification de *Cystoseira amentacea* var. *stricta* [3] :



4.3. *Sphaerococcus coronopifolius* :

4.3.1 Taxonomie :

Embranchement	Rhodophyta
Classe	<i>Florideophyceae</i>
Ordre	<i>Gigartinales</i>
Famille	<i>Sphaerococcaceae</i>
Genre	<i>Sphaerococcus</i>
Espèce	<i>Corocopifolius</i>



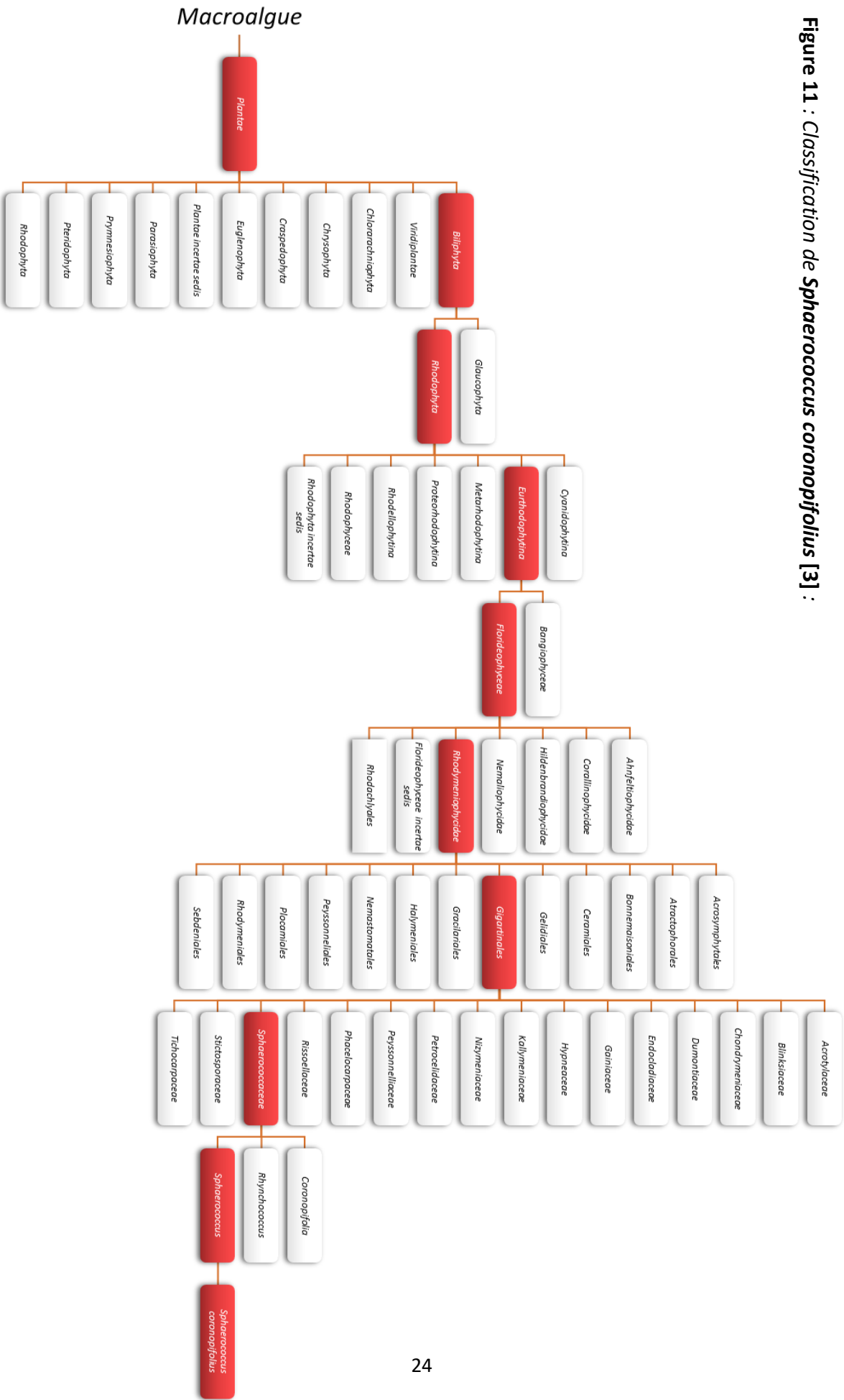
Figure 10 : *Sphaerococcus coronopifolius*

4.3.2 Caractéristiques :

L'algue est de consistance cartilagineuse, allant d'un rouge sombre à la base vers un carmin vif aux extrémités. Le thalle est fixé au substrat par un large disque basal à partir duquel s'élèvent un ou plusieurs axes cylindriques. La ramification est irrégulière, les rameaux s'aplatissent vers les parties supérieures. Les ramifications augmentent et s'affinent aux extrémités, laissant apparaître une organisation partiellement alterne.

Ces extrémités se différencient en ramules épineux. Le thalle subsisterait en automne, réduit à ses axes et rameaux principaux. La taille des axes peut atteindre 5 mm de largeur, le thalle pouvant dépasser les 25 cm de hauteur **(Figure 10) (Figure 11) [4]**.

Figure 11 : Classification de *Sphaerococcus coronopifolius* [3] :



4.4. *Nannochloropsis gaditana* :

4.4.1 Taxonomie :

Embranchement	Ochrophyta
Classe	<i>Eustigmatophyceae</i>
Ordre	<i>Eustigmatales</i>
Famille	<i>Monodopsidaceae</i>
Genre	<i>Nannochloropsis</i>
Espèce	<i>Nannochloropsis aditana</i> (Lubián, 1982).

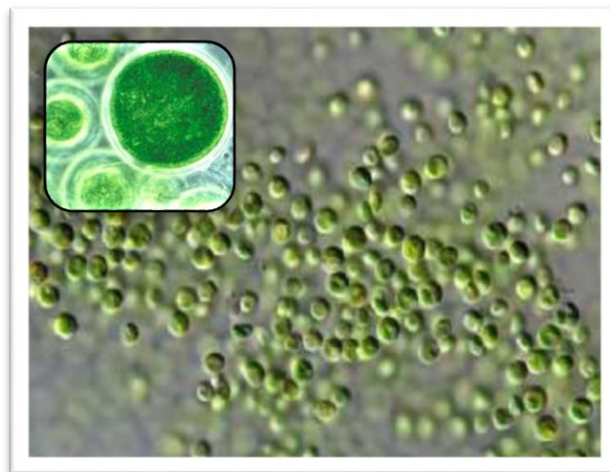


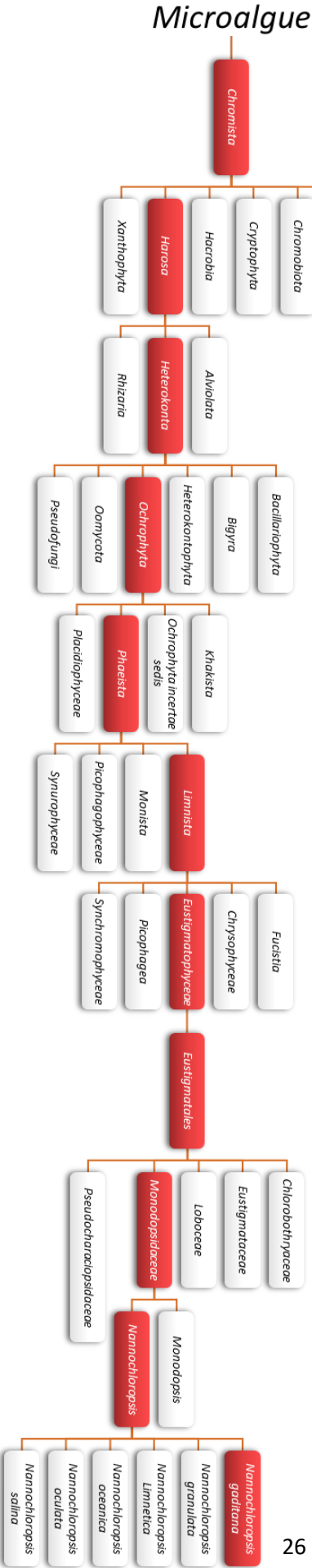
Figure 12 : *Nannochloropsis gaditana* ($\times 100$)

4.4.2 Caractéristiques :

Le genre *Nannochloropsis* est composé des espèces unicellulaires de très petite taille environ 2 à 5 μm (Kandilian *et al.*, 2013). Ces microorganismes sont des sources de différents pigments comme la chlorophylle a, la zéaxanthine, la canthaxanthine et l'astaxanthine (Lubián *et al.*, 2002) (**Figure 12**) (**Figure 13**).

Les espèces ont des formes très variables. En effet, les cellules de *N.granulata* ont une forme globulaire à ovale alors que *N.salina* et *N.gaditana* ont une forme cylindrique ; *N.limnetica* et *salina* n'est pas établie (Suda *et al.*, 2002) (Fawley & Fawley, 2007). La paroi cellulaire de *Nannochloropsis gaditana* est constituée d'une structure bicouche composée d'une paroi intérieure cellulosique (75% de bilan de masse) protégée par une couche hydrophobe algaenane externe (Scholz, 2014).

Figure 13 : Classification de *Nannochloropsis gaditana* [3] :





Matériels Et Méthodes



III. Matériels et méthodes :

1. Matériel biologique :

1.1 Espèce de micro-algues :

Notre travail porte sur la microalgue *Nannochloropsis gatinata*. Cette souche provient du Laboratoire d'Aquaculture et de Bioremédiation (AquaBior) du département de Biotechnologie à l'université d'Oran 1 Ahmed BenBella. La souche nous a été fournie en forme de poudre.

1.2. Espèce de macro-algues :

1.2.1. Présentation du site d'échantillonnage :

Le site de collecte se situe sur la rive Sud du bassin méditerranéen et au Nord-Ouest de l'Algérie, Wilaya de Mostaganem. La récolte est effectuée au niveau des côtes rocheuses de la plage de Stidia, sur le littoral de la ville de Mostaganem dans la commune de Stidia (Position GPS : 35°50'07''N 0°00'41''W). Ce site est choisi pour sa diversité en espèces algales (**Figure 14**).

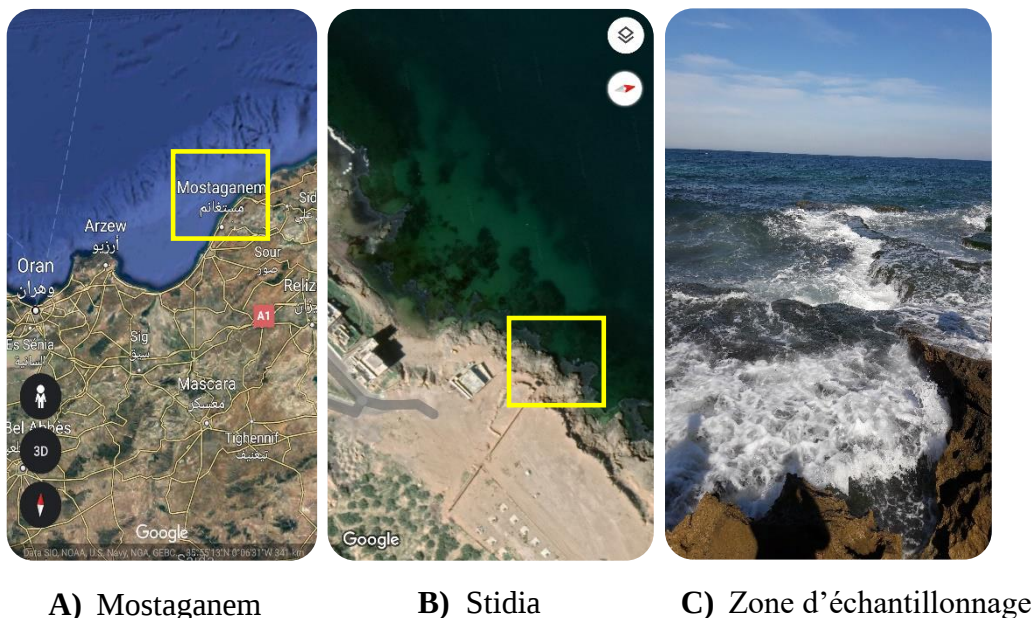


Figure 14 : Localisation géographique du site de l'échantillonnage (Google Earth, 2019)

1.2.2. Sélection et identification des espèces cibles :

Une étude préliminaire est effectuée afin de définir les espèces d'algues largement présentes au niveau du littoral de Mostaganem et particulièrement dans la région d'étude. Parmi les espèces d'algues collectées, trois sont retenues pour cette étude : l'algue verte (*Ulva lactuca*), l'algue brune (*Cystoseira amentacea* var. *stricta*) et l'algue rouge (*Sphaerococcus coronopifolius*).

La caractérisation botanique et la confirmation du genre et de l'espèce sont réalisées au laboratoire de biochimie N°2, du département de Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Mostaganem (Université Abdelhamid Ibn Badis I.T.A), en s'appuyant sur des données assemblées de travaux algologiques sur des espèces d'algues des côtes Ouest algériennes (Oucif, 2018), ainsi qu'en utilisant le Guide F.A.O. (Food and Agriculture Organization) d'identification des espèces pour les besoins de la pêche (Fischer *et al.*, 1987), le site Doris (<http://doris.ffesm.fr>), le site Algabase (www.algabase.com) (Guiry & Guiry, 2014) et le site WORMS (www.marinespecies.org).

1.2.3. Collecte et traitement des échantillons :

Les thalles des différentes espèces d'algues sont récoltés en pleine période hivernal. Ces algues sont prélevées à la main à une profondeur allant de 0,5 à 3 m et conservées dans des bacs en plastiques jusqu'à leur traitement au laboratoire (**Figure 15**).

Après l'élimination des débris, les thalles sont lavés avec l'eau de mer puis rincés à l'eau distillée et nettoyés complètement. Les algues sont ensuite séchées à sec (exposé au rayons de soleil), pendant 48 heures, puis broyées jusqu'à l'obtention d'une poudre et conservées dans des flacons en plastiques jusqu'à leur utilisation.

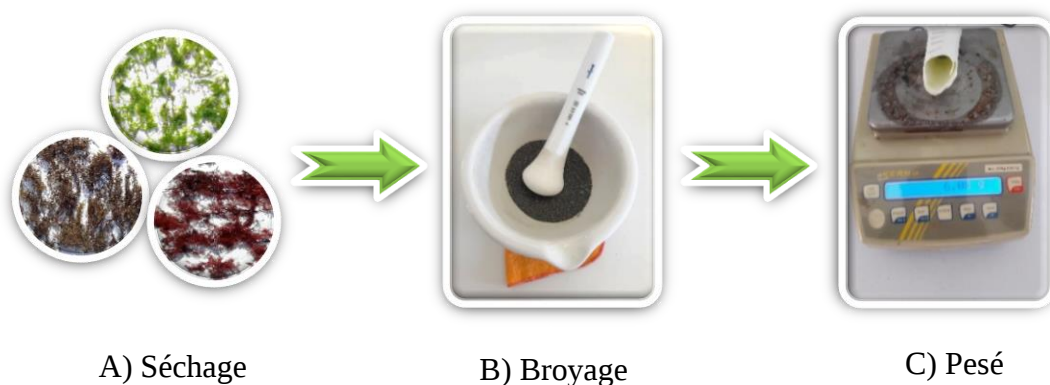


Figure 15 : Les étapes de préparation de l'échantillon

2. Analyse chimique de la biomasse :

Cette partie comporte deux sections, la première est consacrée à l'extraction d'huile algale à partir de *Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius*, *Cystoseira amentacea var. stricta* et *Nannochloropsis gaditana*, tandis que la seconde, présente la méthode de synthèse du biodiesel « la transestérification ».

2.1 Extraction des lipides par Soxhlet :

2.1.1 Principe :

De nombreuses méthodes d'extraction sont spécifiquement utilisées dans le cas des huiles végétales mais l'extraction par Soxhlet reste le procédé le plus largement employé.

Il s'agit d'une extraction solide-liquide, L'extracteur de Soxhlet permet le traitement de solides de toutes tailles avec des solvants en phase liquide ou partiellement vaporisés, permettant le contact entre le solvant et le solide dans une cartouche poreuse et l'évacuation de la solution vers le ballon par un siphon [5].

L'appareil de Soxhlet permet ainsi le remplissage régulier de la cartouche par le solvant pur. Le solide est donc ainsi toujours en contact avec le solvant pur, présentant les meilleures capacités de solubilisation des composés à extraire. Un réfrigérant à eau permettant de condenser les vapeurs de solvant dans la cartouche poreuse [5].

Le solvant est vaporisé puis condensé, et reste en contact avec le solide. La solution est soutirée périodiquement par l'amorçage d'un siphon. La solution du ballon s'enrichit petit à petit en soluté et le solide est toujours mis en contact avec du solvant fraîchement distillé (Amina B & Imane G, 2013) (**Figure 16**).

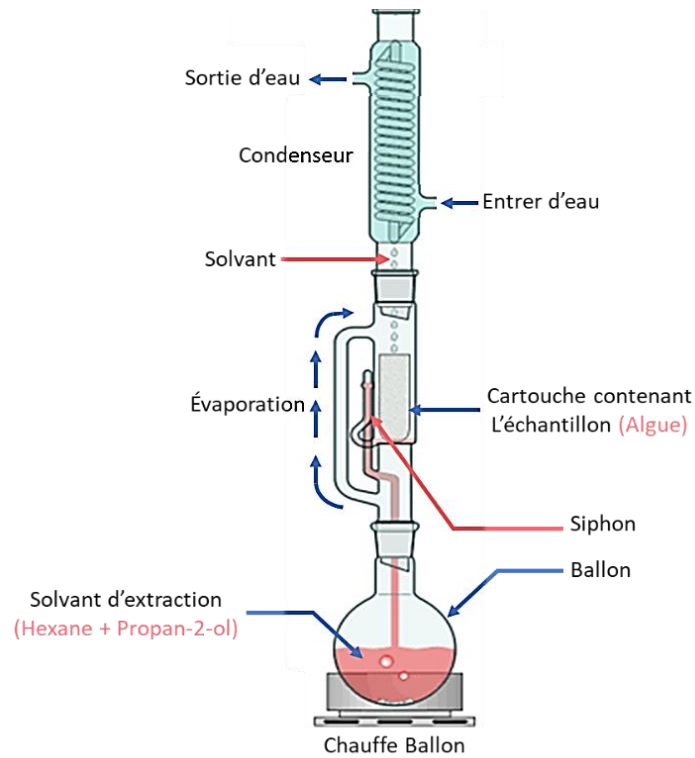


Figure 16 : Montage d'un appareil de Soxhlet

Le rendement lipidique a été calculer selon l'équation suivant :

$$\text{Rendement lipidique (\% poids sec)} = \frac{\text{Poids ballon plein (g)} - \text{Poids ballon vide (g)}}{\text{Poids de la biomasse (g)}} \times 100$$

2.1.2 Caractéristiques des produits utilisés :

➤ Hexane :

L'hexane, ou n-hexane, est un hydrocarbure saturé de la famille des alcanes de formule brute C_6H_{14} (**Figure 17**).

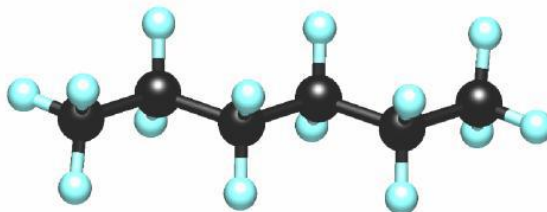


Figure 17 : Formule développée de n- hexane

L'hexane est un solvant utilisé en chimie organique (notamment pour les réactions et les extractions). L'hexane est un liquide incolore, volatil, et d'odeur désagréable.

Il n'est pas soluble dans l'eau mais miscible par la plupart des solvants organiques. C'est un bon solvant des graisses, et un produit stable dans les conditions normales d'emploi, mais il peut réagir fortement avec les produits oxydants (Lakehal, 2015) (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Les principale caractéristiques de l'hexane

<i>NOM SUBSTANCE</i>	<i>DÉTAILS</i>
<i>n-hexane</i>	État Physique Liquide Masse molaire 86,17 Point d'ébullition 68,7 °C

➤ **Propan-2-ol :**

Le propan-2-ol est un liquide mobile, incolore, de saveur amère et dont l'odeur rappelle celle de l'éthanol mais avec une nuance acre déplaisante. Son seuil olfactif se situe, selon les expérimentateurs, entre 22 et 200 ppm [6] (**Figure 18**).

Le propan-2-ol est miscible à l'eau et à la plupart des solvants organiques usuels : alcools, cétones, esters... Avec l'eau, il forme un azéotrope à 87,7 % en poids dont le point d'ébullition est de 80,3 °C à la pression atmosphérique. C'est un bon solvant des graisses, des huiles et de certaines matières plastiques [6] (**Tableau 3**).

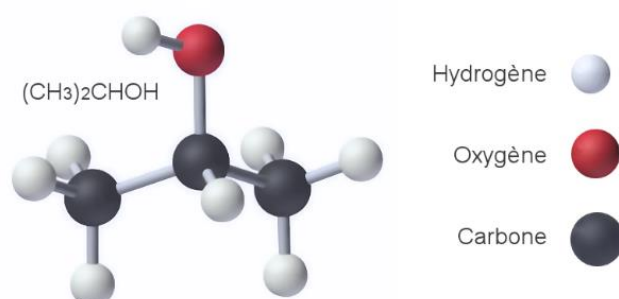


Figure 18 : Formule développée de Propan-2-ol

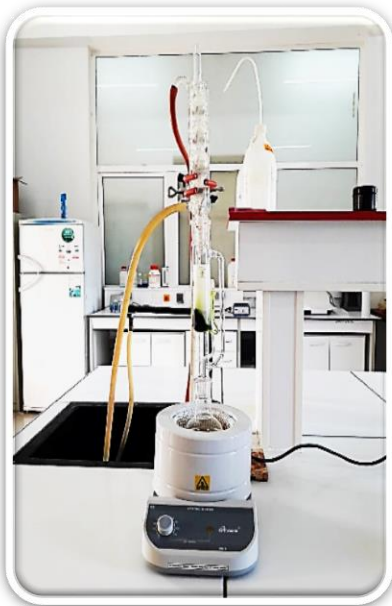
Tableau 3 : Les principale caractéristiques de Propan-2-ol [6]

<i>NOM SUBSTANCE</i>	<i>DÉTAILS</i>
<i>Propan-2-ol</i>	État Physique Liquide Masse molaire 60,10 Point d'ébullition 82 °C à 83 °C

2.1.3 Mode opératoire :

Premièrement on a nettoyé tous les équipements par L'HCl concentré à 95%, puis on a réalisé le montage d'extraction de soxhlet, après on a rempli la cartouche par une quantité de poudre (6g) d'algues soit (vert, rouge, brune, ou micro-algue) puis on a mis la cartouche dans le support de l'appareil, après on a ajouté (225 ml) du solvant qui quotient (150 ml d'Hexane + 75 ml Propan-2-ol) dans le ballon puis le placer dans le chauffe ballon, Ensuite on à allumer le chauffe ballon à 75°C pour l'évaporation du solvant ; le solvant évaporé va entrer en contact avec le condenseur afin de se refroidir et tombe sur la cartouche qui quotient les (6g) de poudre d'algue pour l'extraction des huiles, ces huiles vont passer par le siphon et se mélangé avec le solvant pure dans le ballon, Ensuite on a laissé cette opération se répété pondant 4h pour bien extraire les huiles (**Figure 19**).

Après l'opération de l'extraction on passe à l'étape d'évaporation à l'aide du Rotavapor pour obtenir les huiles extraites et récupérer le solvant, et enfin notre travail a été suivi par l'ajoute de (5ml) de chloroforme pour récupérer les huiles extraites dans un flacon de plastique puis on les a conservées dans le frigo (**Figure 19**).



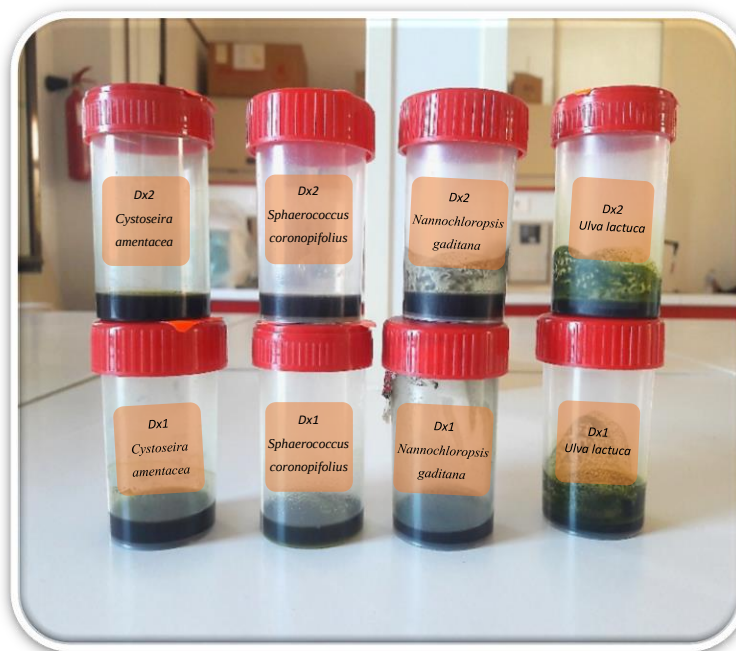
A) Extraction des huiles
(Appareil Soxhlet)



B) Évaporation (Obtenir les huiles et
récupération de solvant)



C) Huile obtenue



D) les huiles obtenues + chloroforme

Figure 19 : Les étapes de l'extraction et de récupération de solvant et l'huile d'algue

2.2. Production du biodiesel par transestérification :

2.2.1. Principe :

La transestérification est la technique classique de production de biodiesel. Il s'agit d'un procédé dans lequel les huiles végétales, les graisses animales ou les huiles à base de microalgue et macro-algue sont mélangées avec un alcool (méthanol) en présence d'un catalyseur acide (catalyseur acide (acide sulfurique H_2SO_4) (Hamad, 2009). La réaction de transestérification est présentée généralement par l'équation suivante (**Figure 20**) :

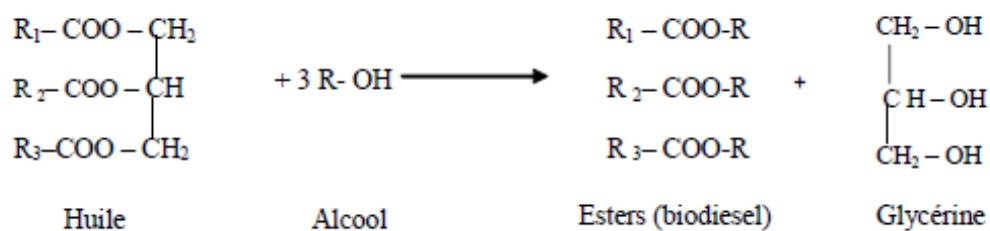


Figure 20 : Équation de la transestérification

2.2.2. Caractéristiques des produits utilisés :

➤ Méthanol :

Le méthanol est un liquide mobile, incolore, volatil, d'odeur plutôt agréable quand il est pur. Les données relatives au seuil de détection olfactive sont discordantes, les chiffres de 5900, 1500, 100 et 3 ppm ayant été trouvés par les différents expérimentateurs [7] (**Figure 21**) (**Tableau 4**).

Le méthanol est miscible à l'eau, le mélange se faisant avec dégagement de chaleur et contraction, et à la plupart des solvants organiques (alcools, éthers, cétones...). Il dissout les graisses et un grand nombre de matières plastiques et de sels minéraux ; c'est, à cet égard, un meilleur solvant que l'éthanol [7].

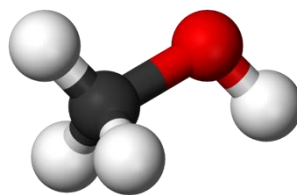


Figure 21 : Formule développée de Méthanol

Tableau 4 : Les principale caractéristiques du méthanol [7]

<i>NOM SUBSTANCE</i>	<i>DÉTAILS</i>
<i>Méthanol</i>	Formule : CH ₃ OH État Physique : Liquide Masse molaire : 32,04 Point d'ébullition : 64,5°C

➤ **Acide Sulfurique :**

L'acide sulfurique pur est un liquide huileux incolore, inodore, hygroscopique qui se colore en jaune brun en présence d'impuretés. Il est miscible à l'eau. La dissolution dans l'eau ou dans un mélange eau-alcool s'accompagne d'un grand dégagement de chaleur et d'une contraction du liquide [8] (**Figure 22**) (**Tableau 5**).

On trouve, dans le commerce, l'acide sulfurique à diverses concentrations ; l'acide sulfurique concentré est aux environs de 98 %, l'acide sulfurique pour les batteries à une concentration de 33 à 34 % [8].

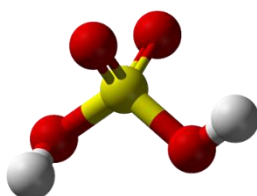


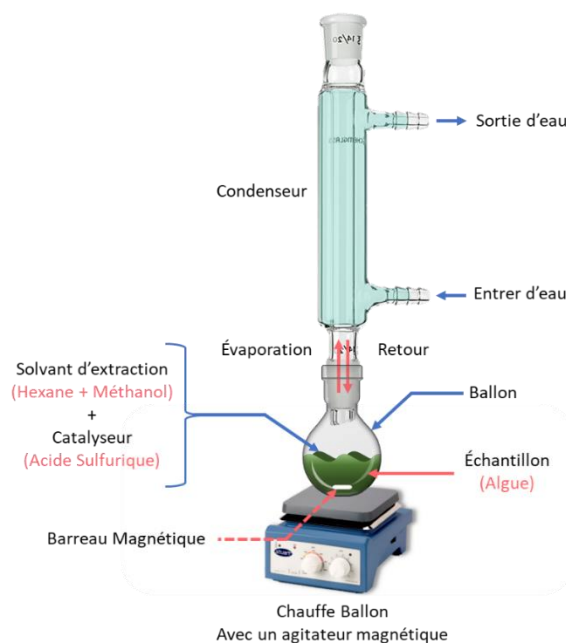
Figure 22 : Formule développée d'Acide Sulfurique

Tableau 5 : Les principale caractéristiques d'Acide Sulfurique [8]

<i>NOM SUBSTANCE</i>	<i>DÉTAILS</i>
<i>Acide Sulfurique</i>	Formule : H_2SO_4 État Physique : Liquide Masse molaire : 98,08 Point d'ébullition : 290 °C (acide pur) 335 °C (acide à 98 %)

2.2.3. Mode opératoire :

Avant l'expérience nous avons nettoyé tous les équipements par le HCl concentré à 95%, puis on a réalisé le montage de la transestérification. Nous avons rempli le ballon avec un volume calculé d'hexane et de méthanol et ensuite nous avons rajouté 10 g de poudre d'algues sèches (macro-algue et micro-algue). Nous avons utilisé l'acide sulfurique comme catalyseur. Le ballon a été placé dans une plaque chauffante à 75°C avec un agitateur magnétique. Le solvant évaporé va entrer en contact avec le condenseur afin de se refroidir et tombe sur le ballon qui quotient les (10g) de poudre d'algue (**Figure 23**).

**Figure 23 : Schéma de la transestérification**

On a laissé cette opération pendant 2h pour une extraction idéale, après l'opération de l'extraction on a laissé le ballon se refroidir pendant 20min afin de transmettre le mélange obtenu dans une fiole à filtration sous vide pour filtrer le mélange et récupérer le filtrant ; Ensuite on a mis le filtrant récupérer dans une ampoule à décantation afin d'obtenir 2 phases, phase inférieure (Glycérine) et phase supérieure (Biodiesel), on a gardé la phase supérieure et la phase inférieure a été conservée dans un flacon à 4°C.

Ensuite on a effectué une opération de lavage de la phase supérieure (biodiesel) en utilisant de l'eau distillée à une température de 30°C, l'opération en question se répète deux fois. Après l'opération de lavage de biodiesel on passe à l'étape d'évaporation à l'aide du Rotavapor pour l'évaporation du solvant (hexane) et récupération du biodiesel, et enfin notre travail a été suivi par l'ajoute de 5ml de chloroforme pour récupérer ce dernier dans un flacon en plastique et conservé à -20°C (**Figure 24**).

Le rendement a été calculer selon les deux équations suivantes :

$$\text{Rendement du biodiesel (\% poids sec)} = \frac{\text{Biosiesel produit (g)}}{\text{Biomasse sèche (g)}} \times 100$$

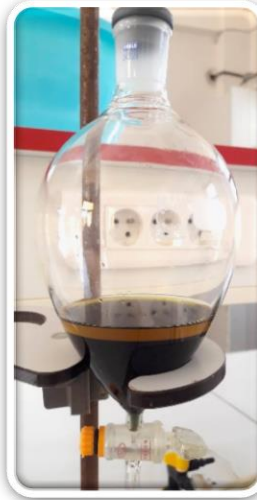
$$\text{Rendement du biodiesel (\% poids huile)} = \frac{\text{Biodiesel produit (g)}}{\text{Huile produit (g)}} \times 100$$



E) Transestérification



D) Filtration sous vide



C) Décomptage



B) Lavage



E) Récupération du biodiesel après lavage



F) Évaporation (Obtenir le biodiesel Et récupération d'hexane)



G) Biodiesel + chloroforme

Figure 24 : Les étapes de l'extraction et de récupération biodiesel



Résultats Et Discussions



IV. Résultats et Discussions :

➤ Teneur en lipides des espèces étudiée :

Après une quantification du taux de lipides chez trois macroalgues (*Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius* et *Cystoseira amentacea*) et une microalgue (*Nannochloropsis gaditana*) par la méthode Soxhlet effectué dans le laboratoire de biochimie 2 de l'université de Mostaganem, les résultats ont été résumés dans la (Figure 25).

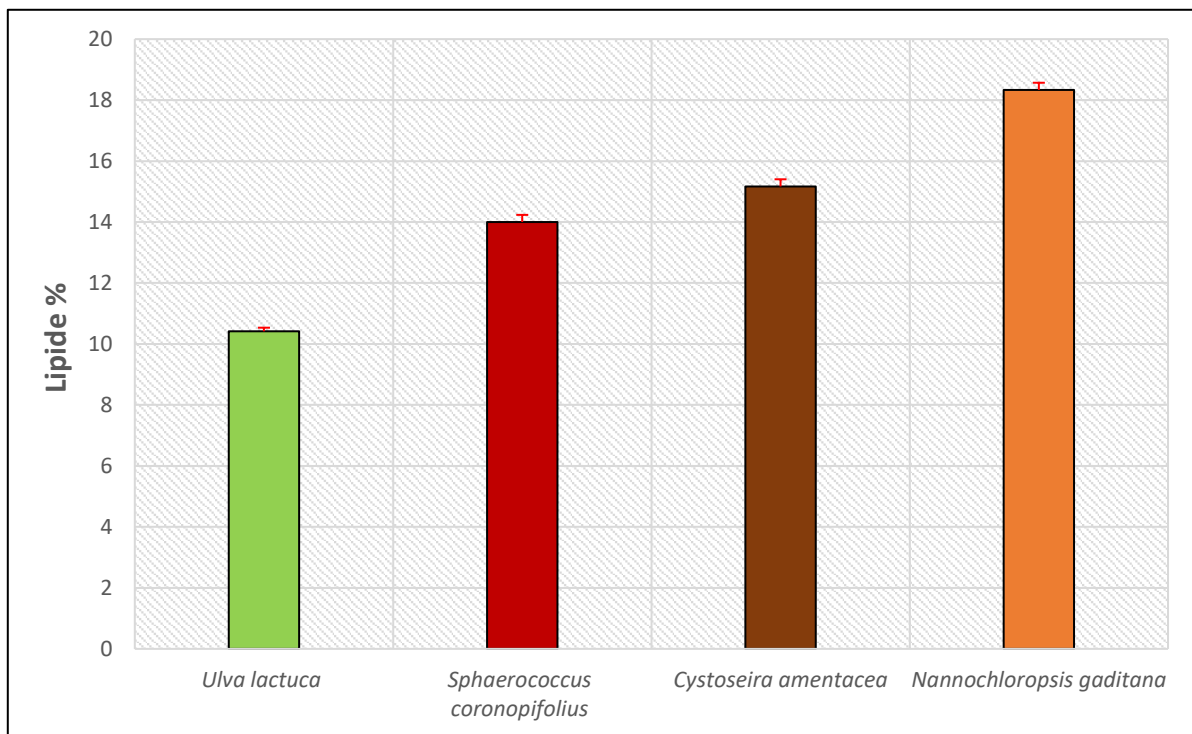


Figure 25 : Pourcentage en lipides des espèces étudiée

En accord avec (Gosch *et al.*, 2012), les algues brunes (Phaeophyta) enregistrent les plus hautes valeurs en lipides totaux, comparais au algues vertes (Chlorophyta) et les algues rouges (Rhodophyta).

Dans la présente étude, le taux de lipides des algues brunes est élevé que chez *C. stricta* (3,52% MS). Ce qui correspond à l'intervalle de la teneur en lipides rapportée pour les algues brunes (1-4,5% MS) (Dawczynski *et al.*, 2007) et est comparable à ceux d'autres espèces du même genre et de quelques algues brunes (Mwalugha *et al.*, 2015 ; Zitouni, 2015 ; Ismail, 2016).

Les teneurs en lipides enregistrées chez *Sphaerococcus coronopifolius* est de $14 \pm 0,2$ %. Quand a *U. lactuca* ($10,42 \pm 0,1$ %), cette teneur correspondent à l'intervalle donné pour la famille des *Ulvaceae* (5 –10 % MS) (Kalavathy et Boska, 2019) et est en accord avec ceux de (Suganya et Renganathan 2012). Par contre, chez *U. lactuca*, ce taux est différent de ceux de (Manivannan *et al.*, 2008 ; Kumari *et al.*, 2013 ; Zitouni *et al.*, 2014) (côtes Est algérienne) ; (Wielgosz-Collin *et al.*, 2016) et (Kasimala *et al.*, 2017).

En général, les macroalgues présentent une quantité relativement faible en lipides (1–5% de matière sèche) et varie beaucoup entre espèces (Burtin, 2003 ; Polat & Ozogul, 2008). Elles ne sont pas une source d'énergie conventionnelle, mais leurs acides gras polyinsaturés, peuvent être aussi élevés que ceux des végétaux terrestres (Darcy Vrillon, 1993).

Nos résultats montrent également que le pourcentage des lipides chez la microalgue *Nannochloropsis gaditana* est de $18,33 \pm 0,2$ %. Ce résultat est supérieur comparé à d'autres études, D'après (Dejoye Tanzi *et al.*, 2013), la teneur en lipides (extraction par Soxhlet) chez *N. oculata* représente 8,31 % de son poids sec. D'autre part, le niveau de lipides est inférieur à ce qui a été trouvé dans d'autres travaux (Hita Pena *et al.*, 2015). Une étude très récente réalisée par (Cancela *et al.*, 2019) a montré que la teneur en lipides chez *N. gaditana* varie fortement en fonction du procédé utilisé pour son extraction. En effet, l'utilisation d'un prétraitement par microonde (pour une destruction totale des cellules) suivie d'une extraction par Soxhlet lui a permis d'augmenter le rendement en lipides de 3,7 à 29,3 %.

Nos résultats montrent que *Nannochloropsis gaditana* est l'espèce qui accumule le plus de lipide comparé aux autres espèces étudiées. Nos résultats nous ont également permis de constater que parmi les espèces de macroalgues étudiées, *Cystoseira amentacea* présente une teneur en lipide plus élevée par rapport à *Sphaerococcus coronopifolius* et *l'Ulva lactuca*. Et le pourcentage des lipides le moins important a été retrouvé chez *l'Ulva lactuca* avec une teneur de $10,42 \pm 0,1$ %. L'espèce *Ulva lactuca* accumule le moins de lipide dans ces cellules.

➤ **Teneur en biodiesel par rapport à la Biomasse :**

Dans notre deuxième expérience, les résultats obtenus par la réaction de transestérification à partir de trois macroalgues (*Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius* et *Cystoseira amentacea*) et une microalgue (*Nannochloropsis gaditana*) sont démontré dans la (Figure 26).

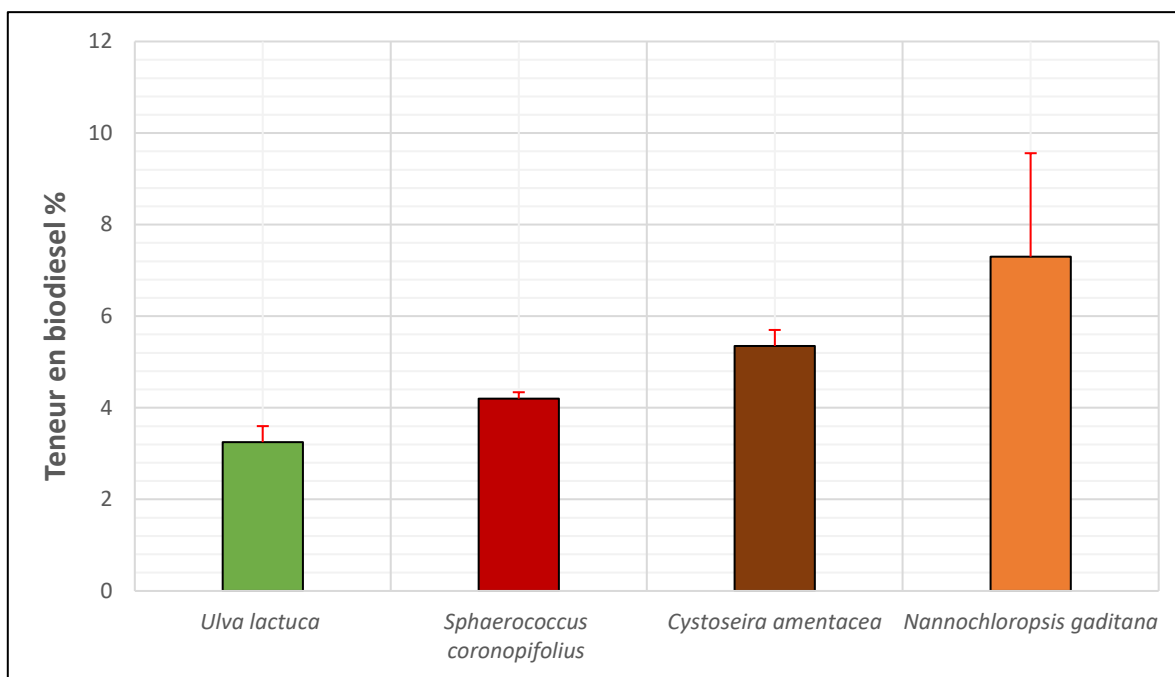


Figure 26 : Teneur en biodiesel par rapport à la biomasse des 4 espèces étudiée

On remarque que la teneur en biodiesel par rapport à la biomasse chez la microalgue *Ulva lactuca* est de $3,25 \pm 0,35$ % et chez *Sphaerococcus coronopifolius*, elle est de $4,2 \pm 0,14$ %. Quant à *Cystoseira amentacea* et *Nannochloropsis gaditana* la teneur en biodiesel par rapport à la biomasse est de $5,35 \pm 0,35$ % et $7,3 \pm 2,26$ %, respectivement.

D'après la figure 26 le rendement du biodiesel chez *Nannochloropsis gaditana* est plus élevé par rapport aux autres algues. Nos résultats nous ont également permis de constater que parmi les espèces de macroalgues étudiés, *Cystoseira amentacea* présente une teneur en biodiesel plus élevée par rapport à *Sphaerococcus coronopifolius* et *l'Ulva lactuca*. Et le pourcentage de biodiesel le moins important a été retrouvé chez *l'Ulva lactuca* avec une teneur de $3,25 \pm 0,35$ %.

➤ **Teneur en biodiesel par rapport aux lipides :**

Dans cette étape on a calculé le rendement de biodiesel par rapport aux lipides des quatre espèces étudiées ; trois macroalgues (*Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius* et *Cystoseira amentacea*) et une microalgue (*Nannochloropsis gaditana*), les résultats sont représentés dans la (Figure 27).

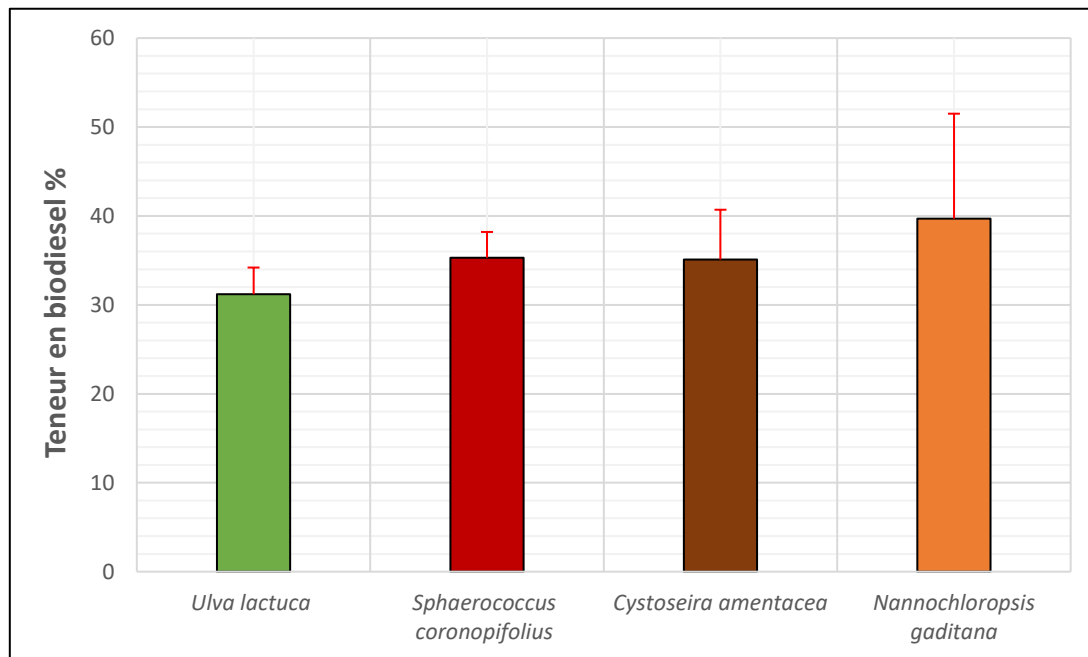


Figure 27 : Teneur en biodiesel par rapport aux lipides des 4 espèces étudiées

On remarque que la teneur en biodiesel par rapport aux lipides chez *Ulva lactuca* est de $31,2 \pm 3,0$ %. Des résultats similaires ont été constatés chez *U. lactuca* d'après (Abomahra et al., 2018). Cependant, selon (Kalavathy et Boska 2019) le taux de biodiesel chez *U. lactuca* dépasse les 51,48 %. Quant à *Sphaerococcus coronopifolius* et *Cystoseira amentacea* présentent des teneurs en biodiesel supérieures à celles de *U. lactuca* ($35,3 \pm 2,9$ % et $35,1 \pm 5,6$ %, respectivement) et ceci est dû à son faible taux de lipide comme le montre la figure 25. Donc on conclut que *Ulva lactuca* n'a pas assez de rendement en biodiesel.

Nannochloropsis gaditana la teneur en biodiesel par rapport aux lipides est de $39,7 \pm 11,8$ % respectivement. Nous pouvons constater que le taux de conversion des huiles en biodiesel est plus important chez *N. gaditana* que chez les autres espèces. Donc ces résultats montrent que *N. gaditana* est un candida plus intéressant pour la production de biodiesel, en plus cette dernière a une teneur en lipides plus importante. Des résultats similaires ont été obtenus dans plusieurs articles scientifiques (Mata *et al.*, 2010).



Conclusion



V. Conclusion et Perspectives :

Les biocarburants apparaissent comme une source d'énergie de transport indispensable. L'un des sources intéressantes des biocarburants les algues, qui sont capables de produire du biodiesel et du bioéthanol qui peuvent être utilisés dans différents types de moteur.

Le biodiesel qui est dérivé des triglycérides l'alcool méthylique ou éthylique par la transestérification a attiré une attention considérable durant les trois dernières décennies vu leurs avantages : renouvelable, biodégradable et carburant non toxique.

L'objectif de ce travail consiste à synthétiser le biodiesel à partir d'huile de quatre algues : trois macroalgues (*Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius* et *Cystoseira amentacea*) et une microalgue (*Nannochloropsis gaditana*) par la réaction de « transestérification » qui est la technique la plus utilisée pour la synthèse de biodiesel. Nous avons aussi utilisé d'alcool à courte chaîne (méthanol et hexane), et l'Acide Sulfurique (H_2SO_4) comme catalyseur. La quantification de la teneur en lipides chez les algues étudiées a été réalisée par la méthode d'extraction des lipides « Soxhlet ».

Les résultats obtenus montrent que le rendement de lipides des trois macroalgues ; *Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius* et *Cystoseira amentacea* est de 10,41 %, 14 %, 15,16 % respectivement, alors que chez la microalgue *Nannochloropsis gaditana* ce rendement est de 18,33 %. La teneur en biodiesel par rapport à la biomasse chez les macroalgues *Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius*, *Cystoseira amentacea* et *Nannochloropsis gaditana* est de 3,25 %, 4,2 %, 5,3 % et 7,3 % respectivement. Le rendement du biodiesel par rapport et taux de lipide chez *Nannochloropsis gaditana* (39,7 %) est plus élevé que chez *Ulva lactuca*, *Sphaerococcus coronopifolius* et *Cystoseira amentacea* (31,2 %, 35,3 % et 35,1 %, respectivement).

En regard de nos résultats, on peut conclure que les microalgues sont de meilleur candidat que les macroalgues pour la production future de biodiesel. Des études ultérieures permettront de compléter ce travail :

- Effectuer des analyses des propriétés physiques du biodiesel tel que le point d'éclair, le point d'inflammation et l'indice de cétane.

- Optimiser le processus de transesterification par la modification des conditions de la réaction (type d'alcool, type de catalyseur, ...etc).
- Utilisé la spectroscopie infrarouge pour identifier de la structure chimique du biodiesel obtenir.
- Appliquer le biodiesel produit dans un moteur diesel.



Références



VI. Références bibliographiques :

~A~

- Abomohra Abd El-Fatah., Amal Hamed El-Naggar. & Areej Ali Baeshen., 2018.** Potential of macroalgae for biodiesel production: Screening and evaluation studies. *Journal of Bioscience and Bioengineering* VOL. 125 No.2: 231-237.
- Aliou ousmane haidara, 1996.** Valorisation d'une huile végétale tropicale : l'huile de Pourghère, thèse doctorat, p : 18-26.
- Amina BOUZAR ESSAIDI et Imane GUESMIA. 2013 ;** Contrôle de qualité de biodiesel synthétisé à partir d'huile d'arachide, mémoire master Analyse et Contrôle de Qualité ; université kasdi merbah Ouargla Algérie 2013, p 29.
- Andersen R.A., 1992.** Diversity of eukaryotic algae. *Biodiversity and Conservation*, 1(4), 267-292.
- Andersen R.A., Falkowski P.G., Raven J.A., 1997.** *Aquatic Photosynthesis*. Blackwell Science.
- 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~

- Becker, E.W. 2007.** Micro-algae as a source of protein. *Biotechnol. Adv.* 25, 207–210.
- Beer, L.L., Boyd, E.S., Peters, J.W., and Posewitz, M.C. 2009.** Engineering algae for biohydrogen and biofuel production. *Curr. Opin. Biotechnol.* 20, 264–271.
- 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

- 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.
- Burtin P., 2003.** Nutritional value of seaweeds. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 2: 498-503.
- Burzynski, J.P., IFP, 2008.**

C

- Cabioc'h J., Floc'h J.Y., Le Toquin A., Boudouresque C.F., Meinesz A. & Verlaque M., 2006.** Guide des algues des mers d'Europe, Manche, Atlantique, Méditerranée, Les guides du naturaliste. 1ère Ed. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel et Paris, 272p.
- Cancela A., Pérez L., Febrero A., Sanchez A., Salgueiro J.L. & Ortiz L., 2019.** Exploitation of *Nannochloropsis gaditana* biomass for biodiesel and pellet production. *Renewable Energy*, 133: 725-730.
- 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.
- 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.

~D~

- Darcy-Vrillon B., 1993.** Nutritional aspects of the developing use of marine macroalgae for the human food industry. *Food Science Nutrition*, 44: 23-35.
- Dawczynski C., Schubert R. & Jahreis G., 2007.** Amino acids, fatty acids, a dietary fibre in edible seaweed products. *Food Chemistry*, 103(3): 891-899.
- Dejoye Tanzi C., 2013.** Eco-Extraction et Analyse de lipides de micro-algues pour la production d'algocarburant. Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse (France), 176 p.
- Dutartre A., Haury J. & Peltre M-C., 2008.** Plantes aquatiques d'eau douce : biologie, écologie et gestion. *Ed Quae*, p :157.

~F~

- Fawley KP & Fawley MW. (2007).** Observation On the diversity and ecology of freshwater Nannochloropsis (Eustigmatophyceae) with descriptions of new taxa. *Protest* 158 : 325-336
- Fischer W., Schneider M. & Bauchot M.-L., 1987.** Guide F.A.O d'Identification des Espèces pour les Besoins de la Pêche, Méditerranée et Mer Noire - Zone de Pêche 37, Volume 1 : Végétaux et Invertébrés, 1-113.
- Fleurence J., 1993.** Seaweed in food products: Biochemical and nutritional aspects. *Food Science and Technology*, 4(4): 103-107.
- Fleurence J., 1999.** Seaweed proteins: biochemical, nutritional aspects and potential uses. *Trends in Food Science and Technology*, 101 : 25-28.

G

- Garon-Lardiere S., 2004.** Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata* Bonnemaisoniales. Thèse de doctorat. Université de Bretagne occidentale école doctorale des sciences de la matière, de l'information et du vivant, p :226.
- Gordon, H. T., Bauernfeind, J. C. (1982).** Carotenoids as food colorants. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, pp. 18–59.
- Gosch B.-J., Magnusson M., Paul N.A. & De Nys R., 2012.** Total lipid and fatty acid composition of seaweeds for the selection of species for oil-based biofuel and bioproducts. *GCB Bioenergy*, 4: 919-930.
- 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.
- Guiry M.-D. & Guiry G.-M., 2014.** Algaebase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. (En ligne) (Sans date) Adresse URL : <<http://www.algaebase.org>>. Consulté le 16/02/2014.
- Guschina, I.A., and Harwood, J.L. 2006.** Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Prog. Lipid Res.* 45, 160–186.

H

- Hamad berna,2009,** transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique,271-2009, p :5.
- Hamd berna, 2009.** Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique, thèse doctorat, p : 10-31.
- 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 non-food applications*. Academic Press, San Diego, 193-242.

- Hita Pena E., Medina A.R., Callejon M.J.J., Sanchez M.D.M., Cerdan L.E., Moreno P.A.G. & Grima E.M., 2015.** Extraction of free fatty acids from wet *Nannochloropsis gaditana* biomass for biodiesel production. *Renewable Energy*, 75: 366-373.
- 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.
- Hornsey I. -S. & Hide D., 1974.** The production of antimicrobial compounds by British marine algae. I. Antibiotic producing marine algae. *British Phycological Journal*, 9 :351-363.
- Hortense F., 2011.** Les applications et la toxicité des algues marines. Thèse de Doctorat. Université de Limoges, France, 131 p.

I

- Isabelle cantin, Juillet 2010,** La production de biodiesel à partir des microalgues de métabolisme hétérotrophe, p :1
- Ismail G.-A., 2017.** Biochemical composition of some Egyptian seaweed with potent nutritive and antioxidant properties. *Food Science and Technology*, 372: 294-302.

J

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

K

- Kalavathy. G, Baskar. G., 2019.** Synergism of clay with zinc oxide as nanocatalyst for production of biodiesel from marine *Ulva lactuca*. *Bioresource Technology*, **281**: 234-238.

- Kandilian R., Lee E., Pilon L. (2013).** Radiation and optical properties of *Nannochloropsis oculata* grown, 27(10), 905-922.
- Kasimala M.B., Mebrahtu L., Mehari A. & Tsighe K.N., 2017.** Proximate composition of three abundant species of seaweeds from red sea coast in Massawa, Eritrea. *Journal of Algal Biomass Utilisation*, 8(2) : 44-49.
- Kornprobst j.-m., potier p.** (1934-2006 ; chimiste). Substances naturelles d'origine marine : *chimiodiversité, pharmacodiversité, biotechnologies*. [s.l.] : 118 [s.n.], 2005.
- 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.
- Kumari P., Kumar M., C.-R.-K. & Jha B., 2013.** Algal lipids, fatty acids and sterols. In: Domínguez H., ed. *Functional ingredients from algae for foods and nutraceuticals*. woodhead publishing, Cambridge, 87-134.

L

- LAKEHAL FADJI. 2015.** Synthétisé de biodiesel à base d'huile végétale de chêne ; mémoire master analyse et contrôle de qualité, université kasdi merbah Ouargla Algérie, 2015, p 40.
- Leclerc V. & Floc'h J-Y., 2010.** Les secrets des algues. *Ed Quae*, p :167.
- 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.
- Lorenz RT, Cysewski GR. 2000.** "Commercial potential for *Haematococcus* microalgae as a natural source of astaxanthin". *Tibtech* 18: 160-167.

M

- Ma, F., Hanna, M.A., 1999.** *Bioresource Technology*, 70 : p. 1-15.
- Mabeau S. & Fleurence J., 1993.** Seaweed in food products: Biochemical and nutritional aspects. *Food Science and Technology*, 4(4): 103-107.

- Manivannan K., Thirumaran G., Devi G.-K., Hemalatha A. & Anantharaman P., 2008.** Biochemical composition of seaweeds from Mandapam coastal regions along southeast coast of India. *American-Eurasian Journal of Botany*, 1(2): 32-37.
- Mata T.M., Martins A.A. & Caetano N.S., 2010.** Microalgae for Biodiesel Production and Other Applications: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14: 217-232.
- Matanjan P., Mohamed S., Mustapha N.-M. & Muhammad K., 2009.** Nutrient content of tropical edible seaweeds, *Eucheuma cottonii*, *Caulerpa lentillifera* and *Sargassum polycystum*. *Journal of Applied Phycology*, 21: 75-80
- Mwalugha H.M., Wakibia J.G., Kenji G.M. & Mwasaru M.A., 2015.** Chemical Composition of Common Seaweeds from the Kenya Coast. *Journal of Food Research*, 4(6) : 28-38.

~N~

- Nguyen van cuong, 2010.** Maîtrise de l'aptitude technologique des oléagineux par modification structurelle ; applications aux opérations d'extraction et de transestérification in-situ, thèse doctorat, p : 8-50.
- Nikiema, J., Heitz, M. (2008).** Biodiesel. I. Characteristics, assets and limitations - A synthesis, *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 35, n° 1, p. 95-106.

~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.
- Oucif H, 2018.** Valorisation des algues de la côte Ouest algérienne: potential antioxydant et hormonal, Université d'Oran 1 Ahmed BenBella. P 52.

P

- Person J. 2010.** Livre turquoise : Algues, filière du future. *Adebiotech- Romainville*, p :163.
- Polat S. & Özogul Y., 2009.** Fatty acid, mineral and proximate composition of some seaweeds from the north eastern mediterranean coast. *Italian Journal of Food Science*, 321: 317-324.
- Pulz, O., Gross, W. (2004).** Valuable products from biotechnology of microalgae. Minireview, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Volume 65, Number 6, pp.635648.

R

- 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.
- Ruiz G., 2005.** Extraction, Détermination Structurale et Valorisation Chimique de Phycocolloïdes d'Algues Rouges. Thèse de Doctorat. Université de Limoges, p :229.

S

- 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.
- Sandesh Kamath B, 2007,** "Biotechnological production of microalgal carotenoids with refreace to astaxanthin and evaluation of its biological activity »; doctoral thesis; PP. IV
- Sauvageau C., 1912.** À propos de *Cystoseira* de Banyuls et de Guétary. *Bulletin de la Station biologique d'Arcachon*, 14 : 133-566.
- Scholz MJ, Weiss TL, Jinkerson RE, Jing J, Roth R, Goodenough U, et al 2014.** Ultra-structure and composition of the *Nannochloropsis gaditana* cell wall. *Eukaryot Cell* ; 13 : 1450-64. doi: 10.1128/EC.00183-14.
- Sharma Naveen Kumar, Rai A.K., 2011.** Biodiversity and biogeography of microalgae: progress and pitfalls, 15, 1–15.

Sialve B.¹, Steyer J-P.¹. (2013). Les microalgues, promesses et défis, *Innovations Agronomiques* 26, pp : 25-39.

Srivastava, A., Prasad, R., (2000). Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, volume 4, n° 2, p. 111-133.

Srivastava, A., Prasad, R., 2000. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4 : p.111-133.

Stolz, P., Obermayer B. (2005). Manufacturing microalgae for skin care. *Cosmetics Toiletries*, 120: 99-106.

Suda S., Atsumi M and Miiyashita. (2002). Taxonomic characterization of a marine *Nannochloropsis* species, *N.oceanica*.Nov. (Eustigmatophyceae). *Phycologia* 41 :273-279.

Suganya. T, Ranganathan. S.,2012. Optimization and kinetic studies on algal oil extraction from marine macroalgae *Ulva lactuca*. *Bioresource Technology*, 107: 319-326.

~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.

~W~

Wielgosz-Collin G., Kendel M. & Couzinet-Mossion A., 2016. Chapter 7: Lipids, Fatty Acids, Glycolipids, and Phospholipids. In: Fleurence J. & Levine I., ed. *Seaweed in Health and Disease Prevention*. Academic Press, San Diego, 185-221.

~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.
- Zitouni H., Arhab R., Boudry C., Bousse-Boua H. & Beckers Y., 2014.** Chemical and biological evaluation of the nutritive value of Algerian green seaweed *Ulva lactuca* using *in vitro* gas production technique for ruminant animals. *International Journal of Advanced Research*, 24: 916-925.

Webographie

1. <http://manuel.gonzales.free.fr/pages/utilisation2.html>
2. <http://algue-production-energie.e-monsite.com/pages/la-production-d-energie/la-production-d-energie.html>
3. <http://www.marinespecies.org/index.php>
4. [http://doris.ffesm.fr/Especies/Sphaerococcus-coronopifolius-Spherocoque-583/\(rOffset\)/0](http://doris.ffesm.fr/Especies/Sphaerococcus-coronopifolius-Spherocoque-583/(rOffset)/0)
5. <http://www.exchem.fr/Extraction.htm>
6. http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_66§ion=caracteristiques
7. http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_5§ion=caracteristiques
8. http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_30§ion=caracteristiques