

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة أبو بكر بلقايد- تلمسان

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID DE TLEMCEN

كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département d'Ecologie et Environnement



MÉMOIRE

Présenté par

BELDJILALI OUSSAMA GHALEM

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Hydrobiologie Marine et Continentale

Option : Sciences de la mer

Thème

Énergie verte : les algues marines

Soutenu le Juillet 2024, devant le jury composé de :

Président	Mr. SMAHI DJAMEL EDDINE	M.A.A	Université de Tlemcen
Examineur	Mr. BOUKLI HACENE A. SOFIANE	M.A.A	Université de Tlemcen
Encadreur	Mr. MEZIANE ABDELKADER	M.C.B	Université de Tlemcen

Année universitaire 2023/2024

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon superviseur, Monsieur MEZIANE ABDELKADER Maître de Conférences Classe B. à l'Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, pour ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Son expertise et ses orientations ont grandement contribué à enrichir ce travail académique et à atteindre les objectifs fixés.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur SMAHI DJAMEL EDDINE Maître Assistant A. à l'Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, qui a accepté avec bienveillance de présider le jury évaluant mon Projet de Fin d'Études. Sa participation a été un honneur et son expertise précieuse a grandement enrichi cette étape cruciale de mon parcours académique.

Également, je souhaite adresser mes sincères remerciements à Monsieur BOUKLI HACENE AHMED SOFIANE Maître Assistant A. à l'Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, pour avoir accepté de faire partie de ce jury. Sa présence et son évaluation ont été d'une valeur inestimable, et je lui suis profondément reconnaissant.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers tous les enseignants qui m'ont enseigné tout au long de mes années d'études à l'université. Leur savoir et leurs conseils ont été d'une importance capitale dans mon développement académique et personnel. Merci à tous pour votre dévouement et votre engagement envers notre éducation.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

À mes frères Mouad, Imad, Abdelkader et Yahya Et ma sœur

À ceux qui m'ont élevé

À toute ma famille sans exception.

À tous mes amis.

En fin, je remercie Mr.Musa, le bibliothécaire, et à ceux qui travaillent avec lui pour leur grande aide et leur patience prolongée

SOMMAIRE

Liste d'abréviation.....	3
LISTE DES FIGURES.....	Erreur ! Signet non défini.
Introduction générale.....	6

CHAPITRE 1 : ENERGIES VERTES

1. L'ENERGIES VERTES OU RENOUEVELABLES	10
1.1. L'ENERGIE SOLAIRE.....	10
1.2. L'ENERGIE EOLIENNE.....	11
1.2.1. Fonctionnement.....	11
1.3. L'ENERGIE HYDRAULIQUE.....	11
1.4. La biométhanisation	12
2. AVANTAGE DES ENERGIES VERTES.....	12
3. INCONVÉNIENTS DES ENERGIES VERTES	13
4. CONCLUSION	13

CHAPITRE 2 : DES ALGUES A L'ELECTRICITE

2.1. Introduction	15
2.2. Généralités sur les algues	15
2.2. 1. Définition des algues	15
2.2.2. Classification des algues.....	15
2. 2. 3. Caractéristiques des algues vertes	19
2. 2. 4. L'utilisation des algues	20
2.2.4.1. Alimentation.....	20
2.2.4.2. Santé et bien-être.....	20
2.2.4.3. Biocarburants et énergie renouvelable	21
2.2.4.4. Traitement de l'eau et assainissement	21
2.2.4.5. Matériaux durables.....	21
2.2.5. Avantages de l'utilisation des algues.....	21
2.2.6. Méthodes de culture des algues	21
2. 3. La biométhanisation	22
2.3.1. Introduction	22
2.3.2. Définition.....	22

2.3.3 Applications multiples de la biométhanisation	22
2.3.4. Les principales étapes de la production de biogaz à partir d'algues	23
1. Préparation des algues.	23
2. Hydrolyse.....	23
3. Acédogénèse	23
4. Acétogénèse.....	23
5. Méthanogénèse acétoclastique.	23
2.4. Transformer le gaz de biométhanisation en électricité.....	24
2.4.1. Facteurs influençant le processus de biométhanisation	25
2.4.2. Avantages de la conversion du biogaz en électricité	25
2.4.3. Inconvénients de la conversion du biogaz en électricité	26
2.5. CONCLUSION	26

Chapitre 3 : Micro-algues et biocarburants

3.1. Introduction	28
3.2. Définition des microalgues.....	28
3.3. Des microalgues au biocarburant	28
3.3.1. Les biocarburants.....	28
3.3.1.1. Définition	28
3.3.2. Les sources de biocarburants	29
3.3.3. Le biodiesel	29
3.3.3.1. Définition de biodiesel.....	30
3.3.3.2. Les méthodes de production de biodiesel	30
3.3.3.3. Processus de fabrication du biodiesel	31
3.4. Conclusion.....	33
Conclusion générale	34
Références Bibliographiques.....	36

Liste d'abréviation

% : Pourcentage

°C : Degré Celsius

CH₄ : Méthane

CH₃COOH : Acide acétique

C₆H₁₂O₆ : Le glucose

Cm : Centimètre

CO₂ : Dioxyde de carbone

C/N : Ratio carbone/azote

g : Gramme

H₂ : Hydrogène gazeux

H₂O : L'eau

H₂SO₄ : Acide sulfurique

KOH : Hydroxyde de potassium

KW : Kilowatt

KWh : Kilowatt-heure

L : Litre

ml : Millilitre

m : Mètre

mg : Milligramme

NaOH : Hydroxyde de sodium

Nm³ : Mètre cube normalisé

pH : Potentiel hydrogène

TWh : Téra Watt-heure

µg : Microgramme

µL : Microlitre

LISTE DES FIGURES

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 1	L'énergie solaire	5
Figure 2	L'énergie éolienne	6
Figure 3	Energie hydraulique	7
Figure 4	La Bio méthanisation	7
Figure 5	Dinoflagellés photosynthétiques vues au microscope	11
Figure 6	Une colonie d'algues dorées sous microscope	11
Figure 7	Diatomées marines	12
Figure 8	Plusieurs types d'algues euglénophytes	12
Figure 9	Diversité des <i>Rhodophytes</i>	13
Figure 10	Plusieurs types d'algues <i>Phéophytes</i>	13
Figure 11	<i>Chlorophytes</i>	14
Figure 12	Le biogaz, du substrat d'origine à sa valorisation	17
Figure 13	Concepts de méthanation biologiques	18
Figure 14	Processus de transformation du gaz	20
Figure 15	Quelques exemples de microalgues	23
Figure 16	Techniques d'obtention du biodiesel	25
Figure 17	Equation de la transestérification	27
Figure 18	Réaction de transestérification	27

الملخص

نظرًا للانفجار الديموغرافي الذي يشهده العالم حاليًا، أصبحت مصادر الطاقة التقليدية من الموارد الأحفورية (النفط، الفحم، الغاز الطبيعي، الطاقة النووية) غير كافية لسد الاحتياجات العالمية الطاقوية المتزايدة. علاوة على ذلك، فإن تأثير هذه الطاقات الناضبة على البيئة يشكل خطرًا على كافة الكائنات الحية، مما يدفعنا للبحث عن حلول قابلة للتطبيق. في هذا العمل، نسلط الضوء على الطاقات المستدامة وبالأخص الغاز و الديزل الحيويين المستخلصين من الطحالب كمصدر نقي ودائم للطاقة عبر عمليتي التحلل الحيوي اللاهوائي التحويل الأستري.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المستدامة، الطحالب، الغاز الحيوي، الديزل الحيوي.

Abstract

Due to the current demographic explosion the world is experiencing, traditional energy sources from fossil resources (oil, coal, natural gas, nuclear energy) are no longer sufficient to meet the increasing global energy demands. Moreover, the environmental impact of these depleting energies poses a threat to all living organisms, prompting us to seek viable solutions. In this work, we highlight sustainable energies, particularly the biogas and biodiesel derived from algae, as a clean and enduring source of energy through the processes of anaerobic digestion and transesterification.

Keywords : sustainable energies, algae, biogas, biodiesel.

Résumé

En raison de l'explosion démographique mondiale actuelle, les sources traditionnelles d'énergie issues des ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel, énergie nucléaire) ne sont plus suffisantes pour répondre à la demande croissante en énergie à l'échelle mondiale. De plus, l'impact environnemental de ces énergies en déclin représente une menace pour toutes les formes de vie, ce qui nous pousse à rechercher des solutions pratiques. Dans cette étude, nous mettons en lumière les énergies durables, notamment le biogaz et le biodiesel produits à partir des algues, comme sources d'énergie propres et durables grâce aux processus de biodégradation anaérobie et de transestérification.

Mots-clés : énergies durables, algues, biogaz, biodiesel.

Introduction générale

La dépendance mondiale aux énergies fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel est une préoccupation majeure, car elle épuise les ressources et contribue au changement climatique. Ces combustibles dominent notre consommation d'énergie dans divers secteurs, y compris les transports, l'industrie et même la production alimentaire. Les statistiques révèlent que les combustibles fossiles représentent une part stupéfiante de 81 % de la consommation énergétique mondiale, avec le pétrole contribuant à lui seul à 33 % de cette part (Reid et al., 2020).

L'utilisation intensive du pétrole, la principale source de combustibles fossiles, suscite de vives inquiétudes. Elle conduit à l'épuisement de nos réserves de carburant et aggrave le changement climatique par l'émission de gaz à effet de serre. Ces préoccupations pointent vers la menace imminente de crises énergétiques et environnementales potentielles (Speight, 2005).

Heureusement, le monde des micro-organismes aquatiques photosynthétiques, y compris les microalgues, offre un potentiel vaste et largement inexploité pour la production de bioénergie. Ces petits organismes revêtent une importance immense en raison de leur capacité à synthétiser des composés précieux aux applications énergétiques significatives, tels que les lipides, l'hydrogène, les glucides et les protéines (Thakur et al., 2024). Leur utilisation ouvre la voie au développement de techniques innovantes pour la génération de biogaz et de biocarburants (Marechal, 2015).

Il y'a trois générations de biocarburants. La première génération utilise comme source de biomasse des cultures traditionnellement destinées à l'alimentation, telles que le maïs, la canne à sucre ou les céréales. La deuxième génération emploie la biomasse lignocellulosique, comme les résidus agricoles ou forestiers, comme matière première (Dronne et al., 2011). La troisième génération vise à se passer de l'utilisation des terres en exploitant les micro-organismes (Rigo Portocarrero et al., 2019).

Notre intérêt se porte sur la troisième génération de biocarburants, en particulier les microalgues, dont la culture connaît actuellement une croissance rapide. Les premières et deuxièmes générations de biocarburants reposent sur des terres arables, ce qui conduit à la déforestation, à une consommation accrue d'eau et à une augmentation des prix des denrées alimentaires.

Un obstacle majeur est l'utilisation des terres pour la production alimentaire ou la production de biocarburants. Cela a incité de nombreuses études à explorer des sources d'énergie alternatives, dont beaucoup se concentrent sur les algues (Calleja, 2013). La troisième génération de biocarburants n'est pas affectée par ces problèmes. Elle offre plusieurs avantages, dont une plus grande capacité de production de biomasse et des cycles de récolte plus fréquents (Zhang et al., 2015).

Les microalgues présentent une adaptabilité remarquable aux changements environnementaux. Contrairement aux plantes terrestres, elles ont un taux de croissance beaucoup plus rapide, pouvant doubler leur biomasse en seulement 3,5 heures (Thakur et al., 2024). Leur production est continue tout au long de l'année, indépendante des saisons, permettant l'extraction d'une plus grande quantité d'huile par rapport aux biocarburants de première et deuxième génération. La biomasse dérivée des algues peut être convertie en biodiesel ou en bioéthanol par des transformations chimiques ou enzymatiques (Alfonsín et

al., 2019). Presque toute la biomasse peut être transformée en énergie de transport. Les lipides sont convertis en biodiesel, tandis que le reste de la biomasse peut produire du bioéthanol.

Le principal obstacle auquel cette génération de biocarburants est confrontée est son coût. Actuellement, les "carburants d'algues" ne sont pas encore suffisamment compétitifs pour rivaliser avec les carburants traditionnels. Cependant, ce secteur fait l'objet de nombreuses recherches pour remédier à cet inconvénient. Cette recherche vise à démontrer la faisabilité de l'utilisation des microalgues pour la production de biocarburants et de biogaz, en utilisant la méthanation biologique et la transestérification (Adeniyi et al., 2018).

Le travail est divisé en trois chapitres :

Chapitre 1 : Rappel sur les énergies vertes ou renouvelables.

Chapitre 2 : Génération d'électricité à partir des algues par le processus de biométhanisation.

Chapitre 3 : Extraction de biocarburant à partir des microalgues par transestérification.

CHAPITRE I: ENERGIES VERTES

1. L'ÉNERGIES VERTES OU RENOUVELABLES

Contrairement aux ressources non renouvelables qui s'épuisent avec le temps, les ressources renouvelables, comme leur nom l'indique, ont la formidable capacité de se reconstituer naturellement. Elles constituent un véritable trésor inépuisable que la nature nous offre.

Parmi ces ressources précieuses, on trouve l'énergie solaire, puisant son énergie dans la chaleur et la lumière du soleil. L'énergie éolienne, quant à elle, tire parti de la force du vent pour produire de l'électricité, l'énergie hydraulique exploite la puissance des cours d'eau pour générer de l'énergie renouvelable. et la bio méthanisation (Qazi et al., 2019).

1.1. L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire, c'est le cadeau précieux de la nature, la chaleur et la lumière du soleil qui nous parviennent sous forme de rayonnements électromagnétiques. Grâce aux technologies modernes, nous pouvons exploiter cette énergie propre de multiples façons (Lund, 2007).

Deux techniques principales permettent de capter l'énergie du soleil

- **L'énergie solaire photovoltaïque** : Cette technologie convertit directement la lumière du soleil en électricité. Des cellules photovoltaïques, composées de matériaux semi-conducteurs comme le silicium, produisent un courant électrique lorsqu'elles sont exposées aux rayons du soleil (Liu et al., 2019).
- **L'énergie solaire thermique** : Cette technique utilise la chaleur du soleil pour chauffer de l'eau ou de l'air. Des panneaux solaires thermiques captent la chaleur du soleil et la transfèrent à un fluide, comme de l'eau ou de l'huile de chauffage, qui alimente ensuite les systèmes de chauffage ou d'eau chaude sanitaire des maisons et des bâtiments (Stutz et al., 2017).



Figure 1 : L'énergie solaire (Lewis, 2016)

1.2. L'ENERGIE EOLIENNE

Le terme "énergie éolienne" désigne le procédé qui permet d'utiliser la force du vent pour produire de l'énergie mécanique ou de l'électricité. Un générateur joue alors le rôle de transformateur, convertissant l'énergie mécanique du vent en énergie électrique(Son et Ma, 2017).

1.2.1. Fonctionnement

Le principe de l'énergie éolienne repose sur une idée simple : lorsque le vent souffle sur les pales des éoliennes, il exerce une force de poussée qui les fait tourner. L'axe de rotation des éoliennes est relié à un générateur électrique. C'est ainsi que l'énergie mécanique du mouvement de rotation se transforme en énergie électrique(Joas et al., 2016).



Figure 2 : l'énergie éolienne(Veers *et al.*, 2019)

1.3. L'ENERGIE HYDRAULIQUE

L'énergie hydraulique, également appelée hydroélectricité, désigne la production d'électricité grâce à des générateurs entraînés par des turbines. Ces turbines convertissent l'énergie potentielle de l'eau en chute ou à écoulement rapide en énergie mécanique.

Le fonctionnement de l'énergie hydraulique repose sur un principe simple : l'énergie potentielle que renferme l'eau en mouvement (chute ou courant fort) est exploitée pour faire tourner des turbines à eau. Ces turbines sont reliées à des générateurs électriques qui convertissent l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique(Cunefare *et al.*, 2013).



Figure 3 : Energie hydraulique(Lee *et al.*, 2018)

1.4. La biométhanisation

La biométhanisation est un processus naturel qui décompose la matière organique en l'absence d'oxygène, produisant ainsi du biogaz, un mélange gazeux principalement composé de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂). Ce biogaz peut ensuite être valorisé de différentes manières, notamment pour(Agneessens *et al.*, 2017) :

- **Produire de l'électricité** : Le biogaz peut être utilisé pour alimenter des moteurs à combustion interne ou des turbines à gaz afin de produire de l'électricité(Tao *et al.*, 2019).
- **Chauffage** : Le biogaz peut être brûlé directement pour produire de la chaleur pour le chauffage des bâtiments ou des procédés industriels.
- **Transport**: Le biogaz peut être épuré et transformé en biométhane, un gaz aux caractéristiques proches du gaz naturel, qui peut être utilisé pour alimenter des véhicules(Agneessens *et al.*, 2017).



Figure 4 : la Bio méthanisation(FRANCOIS, 2021)

2. AVANTAGE DES ENERGIES VERTES

Renouvelables et inépuisables: Contrairement aux énergies fossiles, les sources d'énergie renouvelables, comme le soleil, le vent, l'eau et la biomasse, sont inépuisables et se renouvellent naturellement(Androniceanu et Sabie, 2022).

Propres et durables: Elles ne produisent pas d'émissions nocives ni de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à lutter contre le changement climatique et à protéger l'environnement.

Diversification du mix énergétique: Leur développement permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de diversifier les sources d'approvisionnement énergétique.

Création d'emplois: L'industrie des énergies renouvelables est un secteur en pleine croissance qui crée des emplois dans divers domaines, tels que la fabrication, l'installation et la maintenance.

Avantages économiques: À long terme, les énergies renouvelables peuvent contribuer à réduire les factures d'énergie et à améliorer la sécurité énergétique des pays.

3. INCONVÉNIENTS DES ENERGIES VERTES

Coûts initiaux: L'investissement initial dans les infrastructures d'énergies renouvelables peut être élevé.

Intermittence: Certaines sources d'énergie renouvelables, comme l'énergie solaire et éolienne, sont intermittentes, ce qui nécessite des solutions de stockage pour garantir une production d'électricité continue(Korinnyi *et al.*, 2021).

Impact environnemental: L'installation de certaines infrastructures d'énergies renouvelables, comme les barrages hydroélectriques, peut avoir un impact sur l'environnement et la biodiversité.

Acceptabilité sociale: L'implantation de certains projets d'énergies renouvelables peut se heurter à des résistances locales liées à l'impact visuel ou sonore(Midilli *et al.*, 2006).

4. CONCLUSION

L'adoption à grande échelle des énergies renouvelables est essentielle pour relever les défis environnementaux et construire un avenir durable pour les générations présentes et futures. En investissant dans ces sources d'énergie propres et renouvelables, nous pouvons préserver notre planète, garantir la sécurité énergétique et créer un avenir prospère pour tous.

CHAPITRE 2 : DES ALGUES A L'ELECTRICITE

2.1. Introduction

Dans un contexte d'exacerbation des défis environnementaux, la recherche de solutions énergétiques alternatives et durables est devenue une priorité cruciale. Les algues, organismes photosynthétiques omniprésents dans les milieux aquatiques, se positionnent comme l'une des solutions les plus innovantes et prometteuses. Ces organismes possèdent une capacité remarquable à absorber le dioxyde de carbone et à le convertir en une biomasse riche, ce qui en fait une source phénoménale d'énergie renouvelable.

Mais comment transformer cette biomasse en une énergie utilisable ? C'est là que la technique de la "méthanisation" joue un rôle central. Grâce à un processus naturel appelé "digestion anaérobie", cette biomasse est convertie en l'absence d'oxygène en biogaz, un mélange de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂). Ce biogaz présente des caractéristiques polyvalentes : il peut être utilisé directement pour produire de l'électricité ou de la chaleur, ou être transformé en "biométhane", un gaz propre et combustible utilisé dans les transports et les applications industrielles (Oliveira et al., 2018).

Cependant, les avantages de la "méthanisation" ne s'arrêtent pas là. Les avantages du processus de conversion de la biomasse en biogaz ne se limitent pas à son rôle en tant que source d'énergie renouvelable, mais vont au-delà pour inclure des bénéfices environnementaux significatifs. Ce processus contribue à réduire la quantité de déchets envoyés aux décharges, ce qui aide à protéger l'environnement contre les risques de pollution. De plus, cette conversion aide à diminuer les émissions de gaz à effet de serre, jouant ainsi un rôle crucial dans la lutte contre le réchauffement climatique et les changements climatiques.

2.2. Généralités sur les algues

2.2. 1. Définition des algues

Les algues sont des organismes aquatiques ou semi-aquatiques caractérisés par la présence de chlorophylle dans leurs cellules. Les algues sont abondantes dans les eaux marines, les lacs, les étangs et les eaux courantes, et elles se trouvent également sur les rochers humides et dans les zones très humides à la surface de la terre. Les algues dépendent de l'eau, de la lumière, des sels dissous, ainsi que de l'air pour leur croissance et leur développement. (Kouzuma et Watanabe, 2015).

Il existe une grande diversité d'algues, avec plus de 35 000 espèces recensées. Elles peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires, et leur taille varie de quelques micromètres à plusieurs mètres. Les algues se distinguent des plantes terrestres par l'absence de racines, de tiges et de feuilles (Guiry, 2012).

Les algues jouent un rôle important dans les écosystèmes aquatiques. Elles sont à la base de la chaîne alimentaire pour de nombreux animaux marins (Frenkel et al., 2014)

2.2.2. Classification des algues

Les scientifiques s'appuient sur un critère essentiel : la nature des pigments que contiennent ces organismes ("Traité d'algologie," 1934). Ces pigments, véritables empreintes digitales, révèlent des caractéristiques précieuses et permettent de classer les algues en différents groupes (Merrifield, 1887)

- **Les Pyrophytes**, également connues sous le nom de dinoflagellés, se distinguent par leur couleur brune unique. Leurs parois cellulaires sont composées de plaques de cellulose situées sous la membrane plasmique. Ces organismes constituent une partie essentielle du phytoplancton et jouent un rôle important dans le phénomène de "marée rouge" qui affecte certains plans d'eau. Il est à noter que certaines espèces de dinoflagellés ne possèdent pas de pigments photosynthétiques, ce qui signifie qu'elles sont incapables de réaliser la photosynthèse



Figure 5 : Dinoflagellés photosynthétiques vues au microscope (Bose et Sarma, 1975)

- **Les Chrysophytes**, également connues sous le nom d'algues dorées, se distinguent par leur couleur éclatante, allant du jaune au brun. Ces algues microscopiques font partie intégrante du plancton d'eau douce, jouant un rôle crucial dans les écosystèmes aquatiques. Leur paroi cellulaire présente une composition unique, composée de pectine, un polysaccharide structurel, imprégnée de silice, un minéral conférant solidité et protection. Cette structure complexe permet aux *Chrysophytes* de prospérer dans divers environnements d'eau douce.

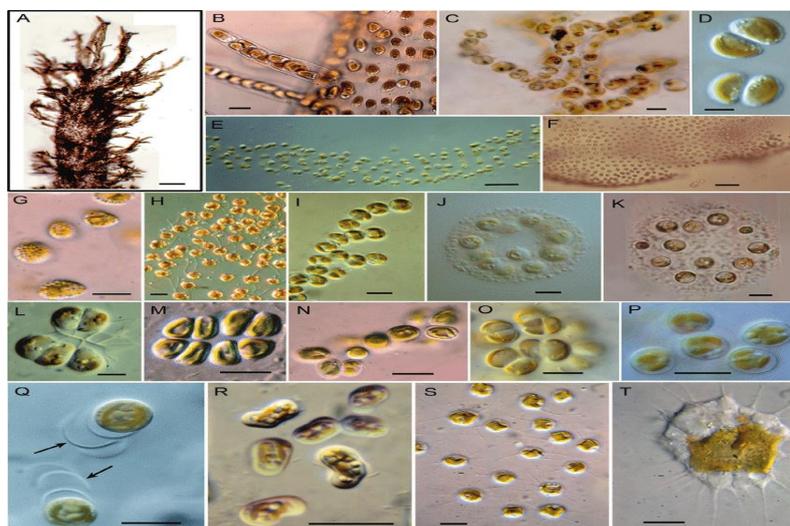


Figure 6 : une colonie d'algues dorées sous microscope (Nicholls et Wujek, 2015)

- **Les diatomées**, appelées *Bacillariophytes*, se distinguent par leur coloration unique, allant du jaune au brun en passant par le vert. Leur paroi cellulaire est principalement constituée de silice, formant un squelette externe rigide. Cette structure complexe offre protection et soutien, rendant les diatomées bien adaptées à divers environnements aquatiques. Les diatomées jouent un rôle crucial dans les écosystèmes marins, constituant une partie importante du phytoplancton et contribuant à la production d'oxygène par la photosynthèse.

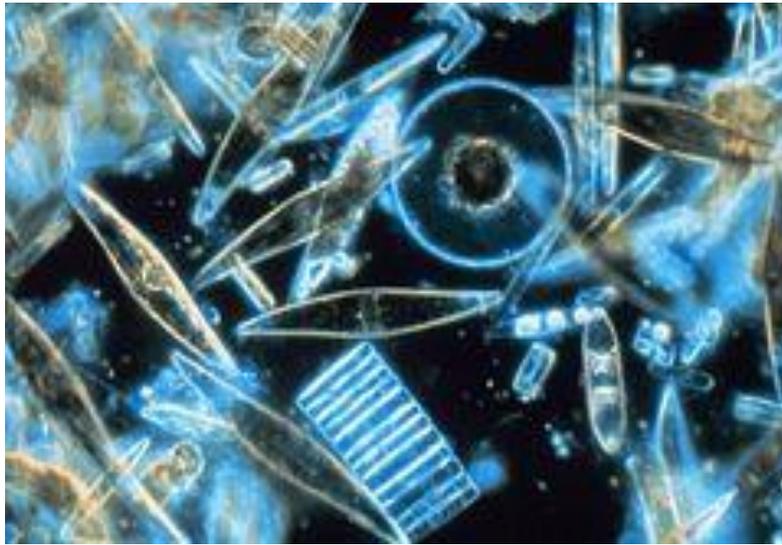


Figure 7 : Diatomées marines vues au microscope vues au microscope

- **Les Euglénophytes**, des algues flagellées fascinantes, peuplent les eaux stagnantes. Leur paroi cellulaire unique est composée de plaques protéiques situées sous la membrane plasmique. Cette structure flexible permet aux euglénophytes de se déplacer de manière fluide dans leur environnement aquatique. Particularité notable, certaines espèces d'euglénophytes ont perdu la capacité de photosynthèse et ne possèdent plus de chlorophylle. Ces algues hétérotrophes obtiennent leurs nutriments en absorbant des composés organiques, les rapprochant ainsi du monde animal.

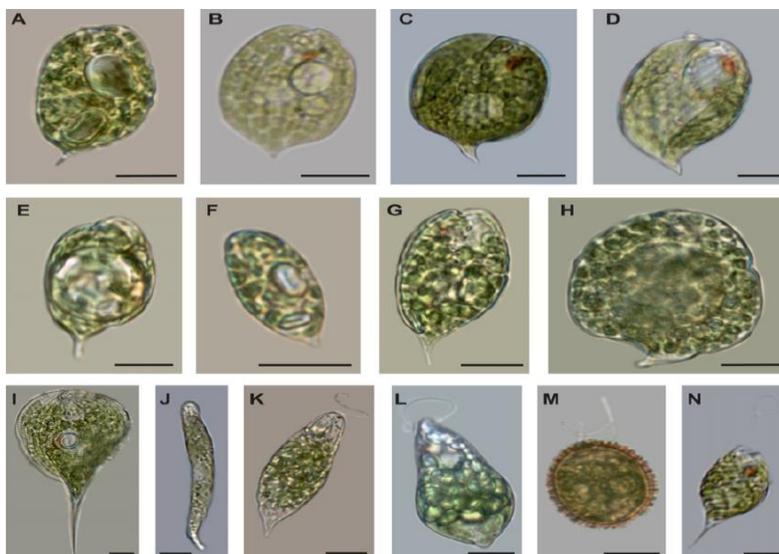


Figure 8 : Plusieurs types d'algues euglénophytes sous microscope(Płachno *et al.*, 2015)

- **Les Rhodophytes**, communément appelées algues rouges, telles que *Porphyra* et *Nemalion*, s'épanouissent principalement dans les eaux salées chaudes. Ces algues remarquables ont la capacité de coloniser des profondeurs marines considérables, atteignant parfois jusqu'à 200 mètres. Leur paroi cellulaire présente une composition unique, associant de la cellulose à d'autres polysaccharides, conférant à ces algues une structure robuste et adaptée à leur environnement. Il est important de noter que la majorité des *Rhodophytes* sont des organismes pluricellulaires, présentant une organisation complexe et fascinante.

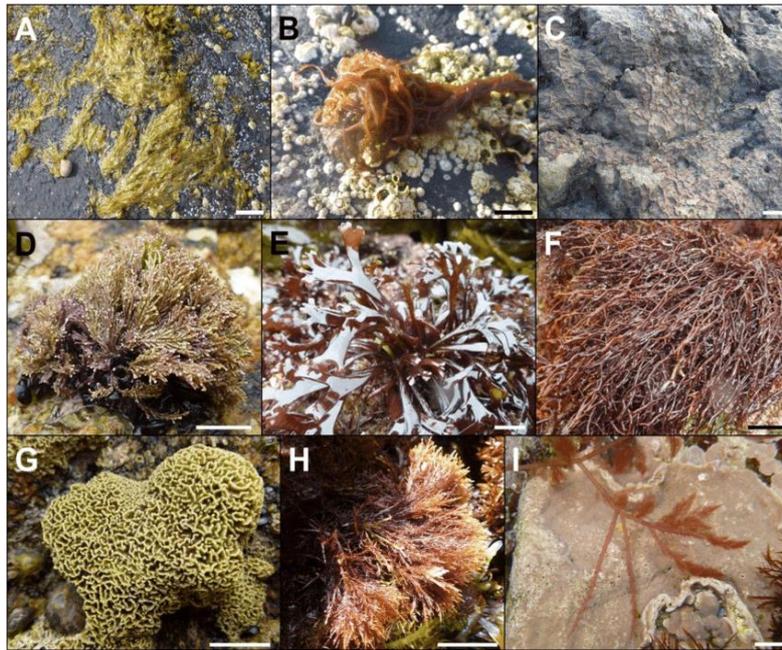


Figure 9 : Diversité des *Rhodophytes*(Marniemi et Parkki, 1975)

- **Les Phéophytes**, également connues sous le nom d'algues brunes, telles que *Fucus* et *Laminaria*, affectionnent les eaux salées plutôt froides. Ces algues robustes prospèrent dans des profondeurs allant jusqu'à 20 mètres. Leur paroi cellulaire, tout comme celle des *Rhodophytes*, est constituée de cellulose et d'autres polysaccharides, leur conférant une structure solide et adaptée à leur environnement. La plupart des *Phéophytes* sont des organismes pluricellulaires, présentant une organisation complexe et fascinante.

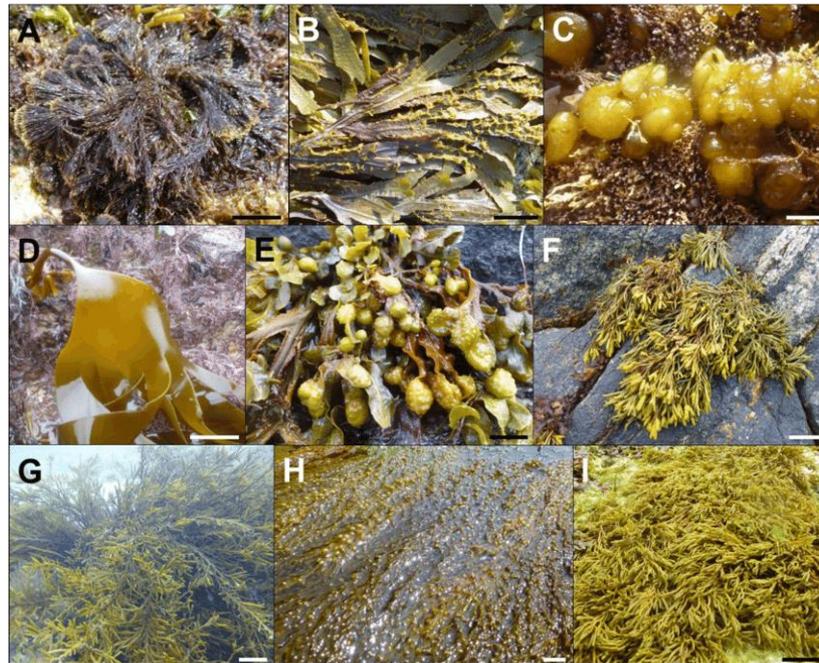


Figure 10 : Plusieurs types d'algues *Phéophytes* (Marniemi et Parkki, 1975)

Les Chlorophytes ou algues vertes, telles que *Codium*, *Caulerpes* et *Characées*, peuplent principalement la zone des marées. Ces algues omniprésentes s'épanouissent dans des profondeurs atteignant jusqu'à 10 mètres. Leur paroi cellulaire présente une composition simple et efficace, constituée uniquement de cellulose, un matériau biopolymère robuste et flexible. À l'instar des *Rhodophytes* et des *Phéophytes*, la majorité des *Chlorophytes* sont des organismes pluricellulaires, présentant une organisation complexe et remarquable. Les trois derniers groupes peuvent encore être classés chez les Végétaux.

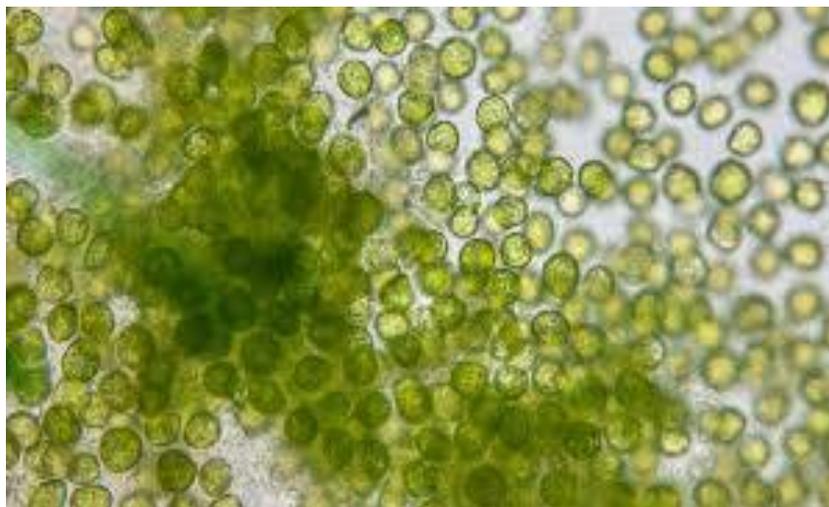


Figure 11 : *Chlorophytes* vues au microscope (Kay et Barton, 1991)

Les trois derniers groupes peuvent encore être classés chez les Végétaux.

2. 2. 3. Caractéristiques des algues vertes

Les algues vertes nous captivent par leur étonnante diversité. Leurs formes vont du minuscule organisme unicellulaire aux colonies denses et aux ****longs filaments enchevêtrés****. Certaines espèces possèdent des crampons qui leur permettent de se fixer sur des surfaces, ce qui leur confère un avantage certain dans les milieux aquatiques agités (Domozych *et al.*, 2012).

Les algues vertes filamenteuses (Zygnématales) sont largement répandues, formant des amas touffus et chevelus à la texture gluante lorsqu'on les touche, dans les mares et les eaux stagnantes. Leur développement est particulièrement important au printemps, mais on les retrouve tout au long de l'année dans les plans d'eau bien éclairés, tels que les mares, les étangs et même les bassins de jets d'eau, où elles cohabitent avec d'autres espèces d'algues filamenteuses comme la diatomée *Melosira*.

2. 2. 4. L'utilisation des algues

Les algues sont utilisées on domaines suivant (Ariede *et al.*, 2017)

2.2.4.1. Alimentation

- **Source de nutriments:** Les algues, riches en protéines, vitamines, minéraux et fibres, constituent un excellent complément alimentaire pour l'homme et l'animal. Elles sont particulièrement appréciées pour leur teneur en acides gras oméga-3, bénéfiques pour la santé cardiovasculaire.
- **Algues comestibles:** De nombreuses espèces d'algues, comme la spiruline, la chlorella et le wakamé, sont consommées fraîches, séchées ou en poudre, apportant une saveur unique et des nutriments précieux à nos assiettes.
- **Alternatives aux protéines animales:** Les algues, grâce à leur teneur élevée en protéines, peuvent être transformées en produits innovants imitant la viande, le poisson et les produits laitiers, offrant une alternative durable et plus écologique aux protéines animales.

2.2.4.2. Santé et bien-être

- **Cosmétiques:** Les algues, riches en antioxydants et en composés hydratants, sont utilisées dans la formulation de crèmes, lotions et masques pour la peau et les cheveux, améliorant leur élasticité et leur vitalité.
- **Compléments alimentaires:** Des extraits d'algues, comme la spiruline et la chlorella, sont vendus sous forme de compléments alimentaires, appréciés pour leurs propriétés antioxydantes, détoxifiantes et stimulantes du système immunitaire.
- **Pharmaceutique:** Certaines algues produisent des composés bioactifs aux propriétés thérapeutiques prometteuses, en cours d'investigation pour le traitement de maladies telles que le cancer et les maladies inflammatoires.
- **Pharmacie:** on utilise les propriétés laxatives ou vermifuges de certaines algues (*Corallina officinalis*), leurs propriétés antibactériennes ou antifongiques, vermifuges (*Hypnea carragheen*), anticoagulantes (*Phyllophora*).
- **Médecine:** trouvent également leur place dans le domaine médical. En thalassothérapie, les bains d'algues, également connus sous le nom d'algothérapie, sont couramment utilisés pour traiter les rhumatismes et d'autres affections de l'appareil locomoteur. Les propriétés anti-inflammatoires et antalgiques des algues permettent de soulager la douleur et l'inflammation, favorisant ainsi la mobilité et le bien-être des

patients. En chirurgie et en gynécologie, les stipes de *Laminaria*, une algue brune aux propriétés remarquables, jouent un rôle crucial. Ces stipes, naturellement déshydratés et stérilisés, sont employés pour débrider les plaies infectées ou dilater les voies naturelles. Leur capacité à absorber l'eau et à se dilater progressivement permet une action douce et efficace, minimisant les traumatismes et favorisant la guérison. (Ibañez et Cifuentes, 2013).

2.2.4.3. Biocarburants et énergie renouvelable

- **Biomasse:** Les algues peuvent être cultivées à grande échelle et transformées en biomasse, une source d'énergie renouvelable pour la production de biocarburants et de chaleur.
- **Huile algale:** L'huile extraite de certaines algues est riche en lipides et peut être convertie en biodiesel, un substitut écologique aux carburants fossiles.
- **Biogaz:** La fermentation des algues permet de produire du biogaz, une source d'énergie propre pour le chauffage, l'électricité et le transport.

2.2.4.4. Traitement de l'eau et assainissement

- **Épuration des eaux usées:** Les algues peuvent être utilisées pour éliminer les nutriments polluants, tels que l'azote et le phosphore, des eaux usées, contribuant à la protection de l'environnement.
- **Bioremédiation:** Certaines algues sont capables de bioaccumuler des contaminants, comme les métaux lourds et les hydrocarbures, des sols et des eaux polluées, permettant leur décontamination.
- **Aquaculture:** Les algues jouent un rôle crucial dans l'équilibre des écosystèmes aquatiques, favorisant la croissance des poissons et des crustacés en aquaculture.

2.2.4.5. Matériaux durables

- **Bioplastiques:** Les algues peuvent être utilisées pour produire des bioplastiques biodégradables et compostables, une alternative durable aux plastiques dérivés du pétrole.
- **Béton et matériaux de construction :** Des algues peuvent être incorporées dans le béton et d'autres matériaux de construction, améliorant leur résistance et réduisant leur impact environnemental.
- **Emballages alimentaires :** Des films et emballages biodégradables à base d'algues peuvent remplacer les emballages en plastique traditionnels, réduisant ainsi les déchets et l'empreinte carbone.

2.2.5. Avantages de l'utilisation des algues

- **Croissance rapide :** Production rapide de biomasse.
- **Adaptation à différents environnements :** Croissance en eau salée, saumâtre ou douce.
- **Capacité de fixation du CO₂ :** Contribution à la lutte contre le changement climatique.
- **Richesse en composés organiques :** Source adaptée à la conversion en biogaz.

2.2.6. Méthodes de culture des algues

- **Systèmes de culture en milieu ouvert** : Simples et peu coûteux, mais le contrôle est difficile de la qualité de l'eau et de la contamination (Li *et al.*, 2011).
- **Systèmes de culture en milieu fermé** : Meilleur contrôle des conditions de croissance pour une biomasse de qualité constante.
- **Culture intégrée à l'aquaculture** : Valorisation des nutriments des déchets des poissons et purification de l'eau.

2. 3. La biométhanisation

2.3.1. Introduction

L'équation chimique globale de la biométhanisation des algues peut être représentée par (Ritchie, 2008) :



Où :

- **C₆H₁₂O₆** : représente une molécule de glucose, un composé sucré commun présent dans les algues.
- **CH₄** : représente le gaz méthane.
- **CO₂** : représente le dioxyde de carbone.

Avec une capacité installée de plus de 2,2 TWh à la fin de 2019, la filière biométhane connaît une croissance fulgurante, affichant une augmentation de 12% en 2017. Cependant, pour poursuivre son expansion et s'imposer comme une alternative viable aux énergies fossiles, il est crucial de réduire les coûts de production.

Nous prenons pour exemple. Le modèle français s'articule autour d'une unité de référence produisant 150 Nm³/h de biométhane. Cette unité est majoritairement de nature agricole, avec plus de 50% des projets s'inscrivant dans ce domaine. Cette prédominance souligne le rôle central de l'agriculture dans la valorisation des déchets organiques et la production d'énergie renouvelable.

2.3.2. Définition

Intégrée au bouquet des énergies renouvelables, la biométhanisation s'illustre comme un processus ingénieux de valorisation du potentiel énergétique des matières organiques fermentescibles. Cette technologie transforme ces déchets en biogaz, un mélange de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂), ou en biométhane, une version purifiée du biogaz. La biométhanisation peut également générer de l'électricité, de la chaleur et du carburant (Ansari *et al.*, 2017).

2.3.3 Applications multiples de la biométhanisation

Le terme "méthanisation" englobe l'ensemble des procédés et filières qui dégradent la matière organique fermentescible en l'absence d'oxygène, par le biais de la digestion anaérobie. Ce processus aboutit à la formation d'un digestat, une fraction solide et/ou liquide, et d'un biogaz sous forme gazeuse (Zabranska et Pokorna, 2018).

Le schéma ci-joint présente une vue simplifiée des diverses applications industrielles de la biométhanisation. Ces applications varient en fonction des substrats utilisés, des procédés mis en œuvre et des modalités de valorisation du biogaz produit.

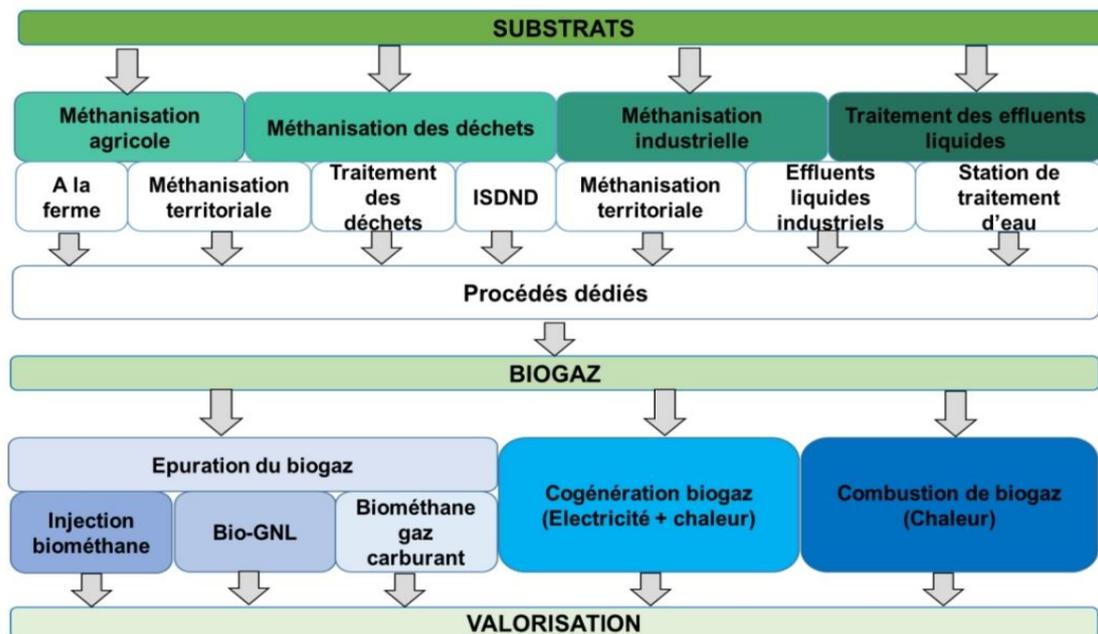


Figure 12 : Le biogaz, du substrat d'origine à sa valorisation(Loic *et al.*, 2020)

2.3.4. Les principales étapes de la production de biogaz à partir d'algues

- 1. Préparation des algues** : Les algues, qui peuvent provenir de milieux naturels comme les lacs ou les océans, ou être cultivées dans des bassins dédiés. Elles doivent être préparées. Cela peut inclure le nettoyage des algues pour éliminer les impuretés ou les débris, ainsi que leur broyage ou leur hachage afin d'augmenter la surface accessible aux micro-organismes(Rodriguez et al., 2015)
- 2. Hydrolyse** : Au cours de cette étape, les molécules organiques complexes présentes dans les algues, telles que les glucides, les lipides et les protéines sont décomposées en molécules plus petites et assimilables par les micro-organismes. Cette étape est réalisée par des enzymes extracellulaires produites par des bactéries hydrolytiques.
- 3. Acédogénèse** : Les molécules issues de l'hydrolyse, comme le glucose et les acides aminés, sont ensuite fermentées par des bactéries acédogènes en acide acétique (CH_3COOH), en hydrogène (H_2) et en dioxyde de carbone (CO_2).
- 4. Acétogénèse** : L'acide acétique et d'autres composés produits par l'acédogénèse sont convertis en acétate (CH_3COO^-) et en hydrogène (H_2) par des bactéries acétogènes.
- 5. Méthanogénèse acétoclastique**: Il s'agit de l'étape finale de la fermentation anaérobie. L'acétate et l'hydrogène produits lors des étapes précédentes sont transformés en méthane (CH_4) et en dioxyde de carbone (CO_2) par des archées méthanogènes.

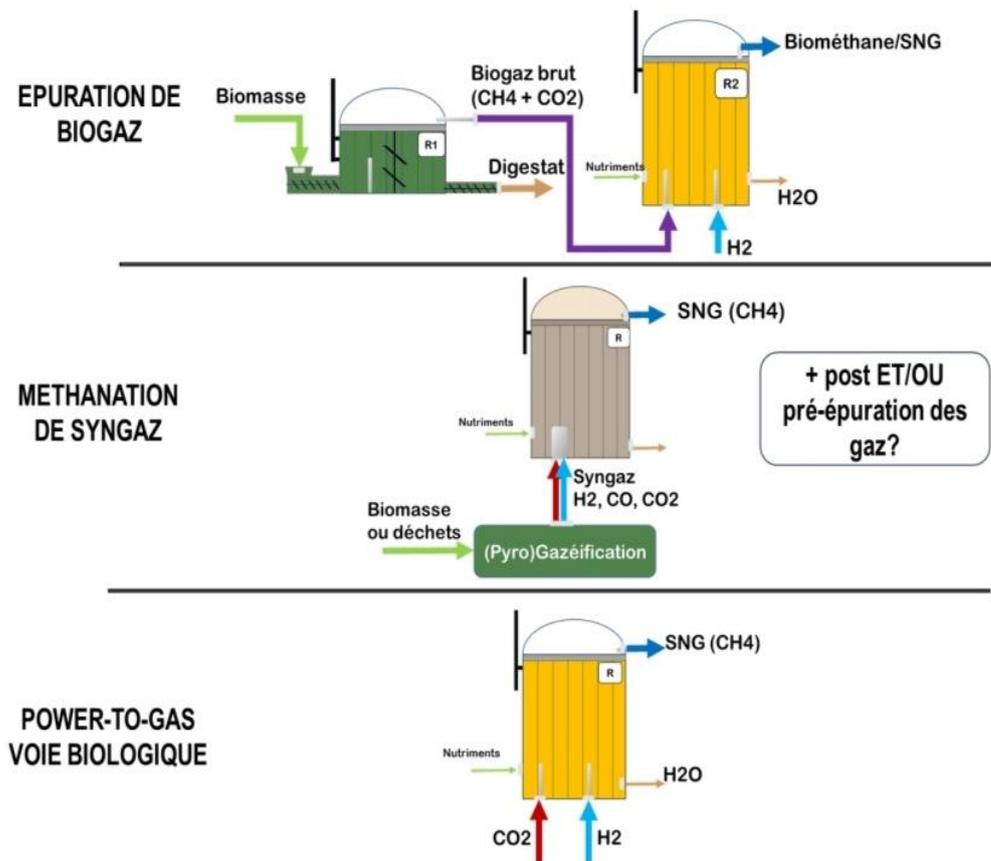


Figure 13 : Concepts de méthanation biologiques(Schmoldt *et al.*, 1975)

En plus des étapes mentionnées précédemment, la production de biogaz à partir d'algues peut également inclure d'autres étapes telles que

- **Prétraitement des algues** : Un prétraitement peut être nécessaire pour améliorer la dégradabilité des algues et augmenter la production de biogaz.
- **Post-traitement du biogaz** : Le biogaz brut peut contenir des impuretés telles que le dioxyde de carbone, le sulfure d'hydrogène et l'eau. Ces impuretés peuvent être éliminées par un processus de purification afin d'obtenir du biométhane de haute qualité.
- **Valorisation du digestat** : Le digestat est le résidu solide restant après la production de biogaz. Il peut être riche en nutriments et peut être utilisé comme engrais ou amendement pour les sols (Wirth *et al.*, 2015).

2.4. Transformer le gaz de biométhanisation en électricité

Le gaz de biométhanisation, principalement composé de méthane (CH_4), peut être converti en électricité par deux procédés principaux (Cheng *et al.*, 2009)

- **Moteurs à combustion interne:**
Le gaz de biométhanisation alimente un moteur à combustion interne, similaire à celui d'une voiture, qui produit de l'énergie mécanique. L'énergie mécanique est ensuite convertie en électricité par un générateur couplé au moteur.

- **Piles à combustible à hydrogène:**

Le gaz de biométhanisation est reformé en hydrogène (H₂) et dioxyde de carbone (CO₂) par un processus appelé vaporeformage. L'hydrogène alimente une pile à combustible, où il réagit avec l'oxygène (O₂) pour produire de l'électricité, de l'eau (H₂O) et de la chaleur.

Les normes d'équivalence

- 1m³ de biogaz permet à une lampe d'éclairer pendant 6 à 7 heures et de diffuser une luminosité équivalente à 60 W de lumière électrique;

- 1m³ de biogaz peut aussi produire 1,25 kWh d'électricité. En effet, ce gaz renouvelable peut servir de matière première précieuse pour la fabrication d'une large gamme de produits chimiques essentiels.

Parmi les produits dérivés du biométhane figurent le chloroforme, un solvant utilisé dans la synthèse organique et la production de réfrigérants, l'acétylène, un composé clé pour la production de plastiques et de caoutchoucs, et le méthanol, un alcool polyvalent utilisé dans divers domaines tels que la fabrication de carburants, de produits chimiques et de produits pharmaceutiques.

2.4.1. Facteurs influençant le processus de biométhanisation

La Température : joue un rôle important dans l'activité des micro-organismes responsables de la dégradation de la matière organique. La plupart des micro-organismes préfèrent des températures comprises entre 30 et 40 degrés Celsius. Des températures basses ralentissent le processus, tandis que des températures élevées peuvent tuer les micro-organismes (Andreides *et al.*, 2021).

Le pH : est également un facteur important dans la biométhanisation. La plupart des micro-organismes préfèrent une plage de pH comprise entre 6,5 et 8,0. Un écart par rapport à cette plage inhibe l'activité des micro-organismes.

L'Humidité : est essentielle pour maintenir l'activité des micro-organismes dans le processus de biométhanisation. Un manque d'humidité dessèche la matière organique et ralentit le processus. À l'inverse, une humidité excessive peut entraîner une accumulation d'eau dans le digesteur, ce qui peut affecter sa capacité et l'efficacité du processus.

L'équilibre nutritionnel : La biométhanisation nécessite un équilibre adéquat entre les éléments nutritifs tels que le carbone, l'azote et le phosphore. La plupart des micro-organismes préfèrent un ratio C/N compris entre 20 et 30. Une carence en azote peut nuire à la croissance des micro-organismes et à l'efficacité du processus

2.4.2. Avantages de la conversion du biogaz en électricité

Les avantages de la biométhanisation s'étendent sur divers domaines (Lafratta *et al.*, 2020)

- **Dans le traitement des déchets :** Le processus naturel nécessite moins d'espace que le compostage aérobie ou l'enfouissement et réduit considérablement le volume et le poids des déchets à enfouir.
- **Sur le plan énergétique :** Une production nette d'énergie et génération d'un combustible renouvelable de haute qualité valorisable dans plusieurs applications

finales. Ce qui a pour effet l'augmentation de la diversité des sources d'approvisionnement en électricité.

- **Sur le plan environnemental :** Une réduction significative des émissions de CO₂ et de CH₄, avec une production d'un compost propre (stérile) et d'un fertilisant liquide riche en matières nutritives utilisables en agriculture.
- **Sur le plan économique :** Il est plus rentable que toutes les autres formes de traitement avec la création d'emplois et de nouvelles opportunités économiques dans les zones rurales.

2.4.3. Inconvénients de la conversion du biogaz en électricité

- **Coûts initiaux élevés:** La construction d'installations de production de biogaz et de conversion en électricité peut impliquer des coûts d'investissement importants.
- **Efficacité énergétique modérée:** La conversion du biogaz en électricité présente une efficacité énergétique modérée, inférieure à celle d'autres sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire ou éolienne.
- **Émissions polluantes:** La combustion du biogaz peut générer des émissions polluantes, bien que généralement à un niveau inférieur à celles des combustibles fossiles.

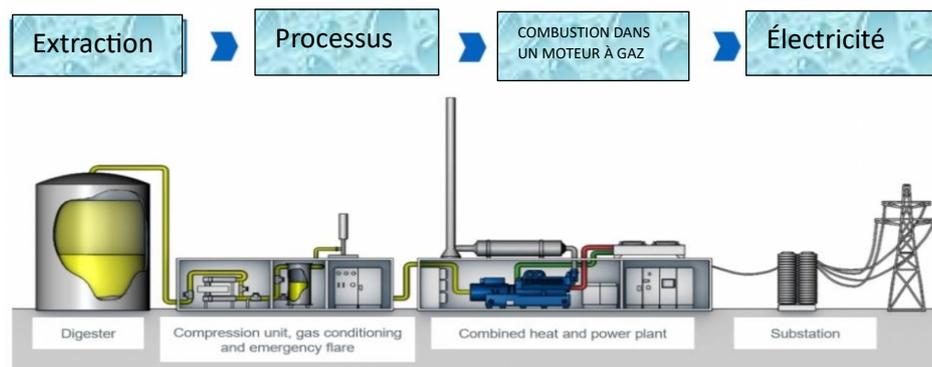


Figure 14 : Processus de transformation du gaz de biométhanisation en électricité(Jörg, 2012)

2.5. CONCLUSION

La biométhanisation représente une technologie prometteuse pour la production d'une énergie renouvelable et durable, contribuant à la transition énergétique et à la lutte contre le changement climatique. En valorisant les déchets organiques et en créant des emplois locaux, la biométhanisation offre également des perspectives socio-économiques positives. Les défis techniques et réglementaires doivent être surmontés pour permettre à cette filière de se développer pleinement et de jouer un rôle significatif dans la production d'énergie propre et durable.

Chapitre 3 :

Micro-algues et

biocarburants

3.1. Introduction

Même si le pétrole et le charbon ont sans aucun doute contribué au progrès humain, leur caractère non renouvelable appelle à une réflexion urgente sur l'avenir de nos sources d'énergie. L'épuisement inévitable de ces ressources fossiles, associé aux graves impacts environnementaux résultant de leur combustion, nous oblige à explorer des alternatives durables. Dans ce contexte, les microalgues se présentent comme une source d'énergie renouvelable prometteuse, capable de répondre aux défis énergétiques et environnementaux de demain grâce aux biocarburants.

3.2. Définition des microalgues

Les microalgues sont des organismes microscopiques eucaryotes photosynthétiques vivant dans les mers, les océans, les eaux douces et les eaux saumâtres (Shafiee et Topal, 2009). La diversité des microalgues surpasse largement celle des plantes terrestres, dévoilant un univers biologique d'une richesse incomparable. Les estimations du nombre d'espèces vont de 50 000 à un million d'espèces dont 30 000 sont connues à l'heure actuelle et seulement une dizaine est cultivée. Les lipides présents dans les microalgues peuvent eux être utilisés dans le but de produire du biodiesel. Ces organismes constituent un groupe polyphylétique et très diversifié de procaryotes (les algues bleues ou cyanobactéries) et eucaryotes (où l'on retrouve les algues vertes, rouges et brunes). La classification des microalgues repose sur une multitude de critères, permettant de les regrouper en divisions distinctes. Ces critères prennent en compte divers aspects fondamentaux de la biologie des microalgues, tels que, Pigmentation, Produits de stockage de la photosynthèse, Organisation des membranes photosynthétiques, Caractéristiques morphologiques. (Calleja, 2013).



Figure 15 : Quelques exemples de microalgues(*Euglena gracilis* et *Chlorella vulgaris*)
(Marniemi et Parkki, 1975)

3.3. Des microalgues au biocarburant

3.3.1. Les biocarburants

3.3.1.1. 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 (Dronne et al., 2011).

3.3.2. Les sources de biocarburants

En effet, les biocarburants se distinguent en trois générations en fonction de la source de la biomasse utilisée pour leur production :

1. 1^{ère} génération

Les biocarburants de première génération se divisent en deux filières principales, répondant aux besoins des deux grands types de moteurs à explosion (Commission Énergie et changement climatique, 2010). :

- **La filière huile**

Principalement le colza, mais aussi le tournesol, l'huile de coco ou l'huile de palme. Un fort potentiel pour le recyclage des huiles végétales et animales usagées. L'huile extraite des cultures oléagineuses peut être filtrée et utilisée directement dans les moteurs diesel, pure ou mélangée au diesel. Des adaptations des véhicules peuvent être nécessaires pour des mélanges dépassant 30% d'huile. Transformation de l'huile en biodiesel par transestérification. Utilisé dans les moteurs diesel en mélange ou pur, généralement sans adaptations des moteurs (Costa et Réquillart, 2000).

- **La filière sucre**

Principalement la betterave sucrière et le froment, mais aussi la pomme de terre. Production d'éthanol à partir de soja (USA) ou de canne à sucre (Brésil). L'utilisation de la matière cellulosique provenant de vieux papiers, bois et déchets de bois (recyclage des palettes, résidus de scieries...), pailles et cultures énergétiques (taillis à courtes rotations) offre le plus gros potentiel de production à coût réduit (Costa et Réquillart, 2000)..

2. 2^{ème} génération

Issus de sources lignocellulosiques (bois, feuilles, paille, etc), ainsi que des cultures dédiées non comestibles, constituent la matière première de ces biocarburants. Un avantage environnemental notable: Ils permettent d'éviter la concurrence avec la production alimentaire et contribuent ainsi à une gestion plus durable des terres agricoles(Costa et Réquillart, 2000).

3. 3^{ème} génération

Les micro-algues, des usines à énergie renouvelable : Ces micro-organismes marins ou d'eau douce possèdent un potentiel extraordinaire pour produire divers types de biocarburants.

Le méthane issu de la digestion anaérobie des algues et le biodiesel dérivé de leur huile ne sont que quelques exemples des carburants durables obtenus grâce à ces microalgues (Tam et al., 2021).

3.3.3. Le biodiesel

3.3.3.1. Définition de biodiesel

Issu d'une réaction chimique entre des corps gras végétaux ou animaux et un alcool léger, le biodiesel se présente sous forme d'ester méthylique. Ce biocarburant renouvelable se distingue par ses qualités environnementales et sa capacité à se substituer au gazole sans nécessiter de modifications majeures des moteurs à combustion (Costa et Réquillart, 2000).

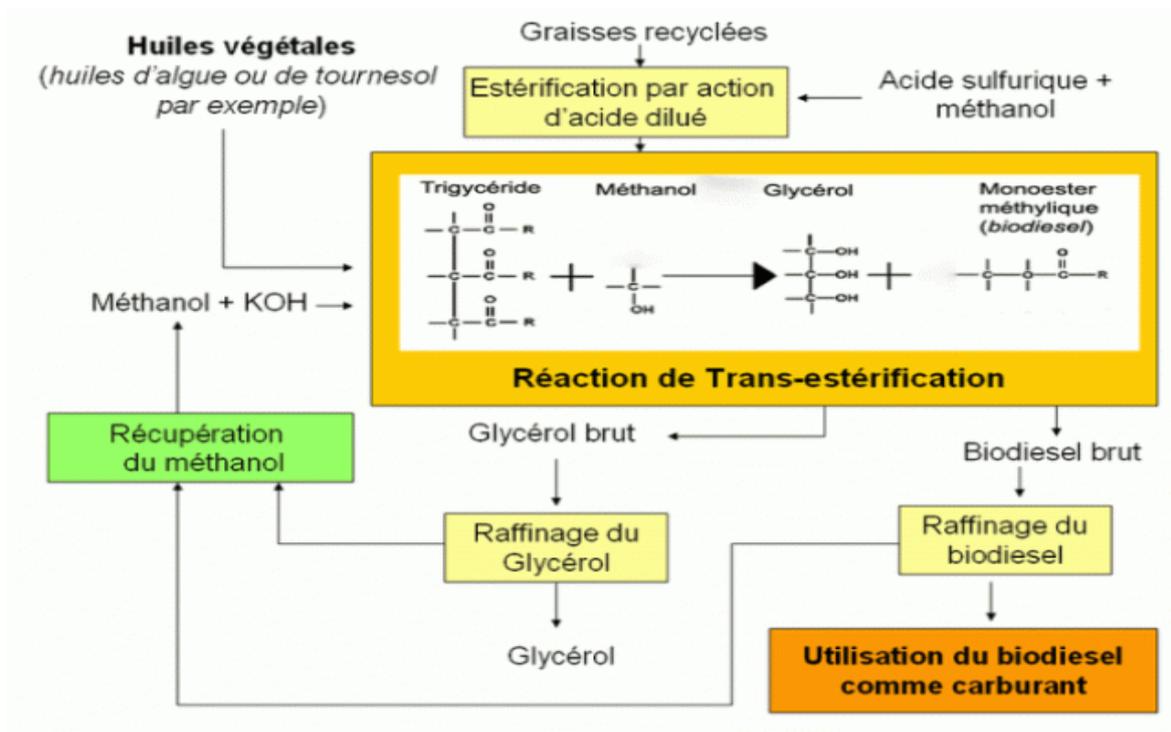


Figure 16 : Techniques d'obtention du biodiesel (Nguyen, 2010).

3.3.3.2. Les méthodes de production de biodiesel

De nombreux efforts ont été déployés pour développer des dérivés d'huiles végétales aux propriétés et performances comparables à celles du diesel. Parmi les différentes approches explorées, quatre méthodes principales se distinguent

- **Microémulsion** Cette technique implique la création de fines gouttelettes d'huile végétale dispersées dans une phase aqueuse à l'aide de surfactants. La microémulsion ainsi obtenue peut être utilisée directement comme carburant ou mélangée au diesel.
- **Pyrolyse** Ce procédé consiste à chauffer rapidement l'huile végétale en l'absence d'oxygène, ce qui la décompose en gaz, liquides et solides. Les vapeurs produites peuvent être condensées et raffinées pour obtenir un carburant de type diesel.
- **Dilution** Cette méthode simple consiste à mélanger directement l'huile végétale avec du diesel, ce qui peut améliorer la lubrification et réduire les émissions. Cependant, la proportion d'huile pouvant être utilisée est limitée en raison de problèmes de compatibilité et de performance

- **Transestérification** Cette technique, la plus répandue, consiste à réagir l'huile végétale avec un alcool (méthanol ou éthanol) en présence d'un catalyseur pour produire des esters gras et du glycérol. Les esters gras, appelés biodiesel, présentent des propriétés physicochimiques proches de celles du diesel et peuvent être utilisés directement ou mélangés au diesel.

3.3.3.3. Processus de fabrication du biodiesel

La production de biodiesel n'est pas un processus unique, mais plutôt un voyage en deux étapes distinctes mais complémentaires (Berna, 2009). :

3.3.3.3.1. Production de l'huile

La première étape de la production de biodiesel est l'extraction de l'huile des graines.

- **Par pressage** : Le pressage à froid, principalement utilisé pour extraire l'huile des noix, consiste en des pressages successifs à une température inférieure à 80 °C. Cette méthode a un rendement faible, laissant entre 6 et 12 % de matière grasse dans le résidu de pressage, appelé tourteau. En revanche, le pressage à chaud implique de préchauffer les graines à 90 °C avant de les presser avec une vis sans fin, atteignant une température pouvant aller jusqu'à 120 °C. Cette méthode améliore le rendement, réduisant la teneur en matière grasse du tourteau à environ 4 à 6 %.
- **Par extraction** : L'extraction d'huile consiste à retirer l'huile des graines en utilisant un solvant. D'abord, les graines sont dépoussiérées et souvent décortiquées ou dépelliculées. Ensuite, les lipides sont extraits en les dissolvant dans un solvant organique (comme l'hexane) chauffé à une température de 50 à 60 °C, puis en faisant percoler le solvant à contre-courant pendant 4 à 5 heures. Le mélange d'huile et de solvant obtenu est ensuite distillé par chauffage à 115-120 °C sous aspiration et avec injection de vapeur. Cette méthode offre un meilleur rendement que le pressage, produisant des tourteaux déshuilés contenant seulement 0,5 à 2,5 % de matière grasse.

3.3.3.3.2. Transformation de l'huile (transestérification)

La transestérification, ou alcoololyse, est une réaction chimique où un ester est transformé en un autre ester. Cette méthode est couramment utilisée pour produire du biodiesel. Le processus implique le mélange d'huiles végétales, de graisses animales ou d'huiles dérivées de micro-algues avec un alcool tel que l'éthanol ou le méthanol, en présence d'un catalyseur. Le catalyseur peut être basique, comme l'hydroxyde de sodium (NaOH) ou de potassium (KOH), ou acide, comme l'acide sulfurique (H₂SO₄) (Berna, 2009).

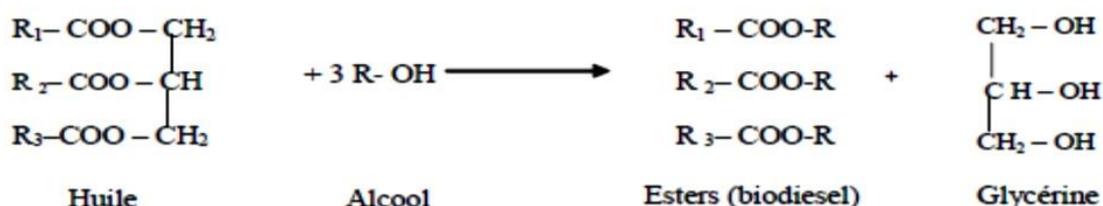


Figure 17 : Equation de la transestérification (Keong et al., 2016).

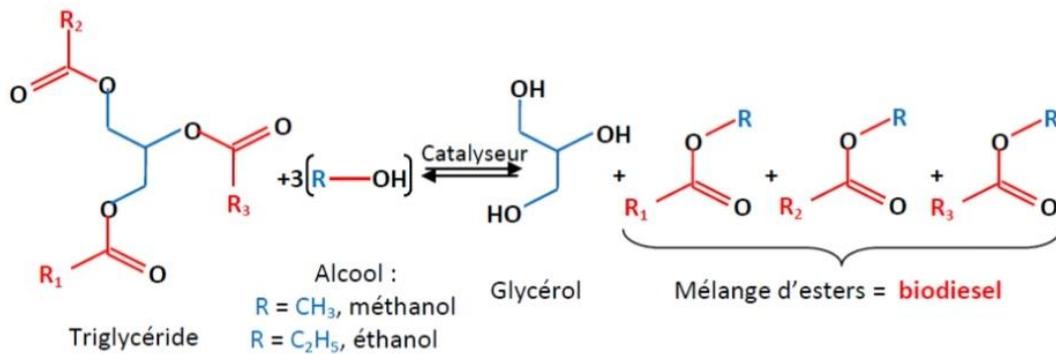


Figure 18 : Réaction de transestérification (Mesbahi, 2012)

3.3.3.3. Les étapes de la transestérification

1. Réaction

- Le mélange d'alcool et de catalyseur est versé dans un réacteur fermé.
- L'huile végétale est ajoutée au réacteur.
- Le mélange est chauffé à une température légèrement supérieure au point d'ébullition de l'alcool (environ 80 °C) pour accélérer la réaction.
- La réaction dure entre une et deux heures (Berna, 2009).

2. Séparation des produits

- La réaction produit trois produits : le glycérol, le biodiesel et l'excès d'alcool.
- Étant donné que la densité du glycérol est plus élevée que celle du biodiesel, les deux phases peuvent être séparées par gravité simplement en extrayant le glycérol du bas du réservoir de décantation.
- La séparation peut être accélérée en utilisant une centrifugeuse (Anastopoulos et al., 2009).

3. Récupération de l'alcool

- Après la séparation du glycérol et du biodiesel, l'excès d'alcool est retiré de chaque phase par évaporation ou distillation.
- L'alcool récupéré est réutilisé dans un nouveau processus.

4. Traitement du glycérol

- Le catalyseur est neutralisé à l'aide d'un acide, produisant ainsi du glycérol brut avec une pureté de 80 à 88 %.
- A ce stade, le glycérol peut contenir de l'eau, des savons, de l'alcool et des traces de catalyseur non utilisé.
- Pour des besoins spécifiques (comme les marchés pharmaceutiques et cosmétiques), le glycérol est distillé pour obtenir une pureté supérieure à 99 %. (Thakur et al., 2024).

5. Lavage du biodiesel

Deux techniques principales sont communément employées pour le lavage du biodiesel

- Lavage à l'eau chaude : Cette méthode consiste à mélanger le biodiesel avec de l'eau chaude, généralement à une température comprise entre 70 et 90°C. L'eau chaude permet de dissoudre les résidus de catalyseur et les impuretés, qui se séparent ensuite du biodiesel par décantation. Cette technique simple et efficace est largement utilisée à l'échelle industrielle.

- Lavage à l'acide : Cette méthode utilise un acide dilué, tel que l'acide citrique ou l'acide phosphorique, pour neutraliser les résidus de catalyseur et convertir les savons en acides gras libres. Les acides gras libres sont ensuite séparés du biodiesel par extraction par solvant. Cette technique plus complexe est généralement utilisée pour produire du biodiesel de qualité supérieure destiné à des applications critiques.

3.4. Conclusion

Les microalgues représentent une ressource prometteuse pour la production de biocarburants, offrant une alternative durable aux combustibles fossiles traditionnels. En commençant par la définition des microalgues, nous avons exploré leur potentiel en tant que source de biocarburants, en particulier pour la production de biodiesel. Les microalgues se distinguent par leur capacité à produire des composés énergétiques précieux, notamment des lipides, qui peuvent être transformés en biodiesel.

Le biodiesel représente l'une des principales sources d'énergie renouvelable. Il présente des propriétés non toxiques, biodégradables, un pouvoir calorifique élevé, une faible teneur en soufre et son utilisation diminue l'émission d'imbrûlés et de suies. Il peut également être employé dans les moteurs diesel sans nécessiter de modifications. En revanche, des difficultés techniques sont associées à ses caractéristiques d'écoulement à basse température, à l'émission des NOx et à la stabilité pendant le stockage. Toutefois, le biodiesel est produit par transestérification, qui est la méthode la plus couramment employée pour la production de biodiesel. Il s'agit d'une réaction chimique qui implique de remplacer l'alcool d'un ester par un autre. Cette méthode est couramment employée afin de diminuer la viscosité des triglycérides. La transestérification est une réaction réversible qui se produit lorsque les réactifs sont mélangés. La présence d'un catalyseur favorise grandement ce processus.

Conclusion générale

Face aux défis croissants en matière d'énergie et d'environnement, la valorisation énergétique des algues, à travers la biométhanisation et la production de biodiesel, se présente comme une solution prometteuse et durable.

La biométhanisation des algues, processus de conversion de la biomasse algale en biogaz, offre une alternative écologique et renouvelable à la production d'énergie. Cette technologie présente de nombreux avantages, notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la production d'un biogaz riche en méthane et la valorisation des déchets algaux.

D'un autre côté, la production de biodiesel à base de micro-algues constitue une alternative durable aux combustibles fossiles. Les micro-algues se distinguent par leur croissance rapide, leur productivité élevée en biomasse et leur teneur élevée en lipides pouvant être transformés en biodiesel grâce au processus de transestérification.

Au cœur de la transformation des huiles végétales et des graisses animales en biodiesel réside la transestérification, une étape chimique essentielle. Cette opération implique la réaction de ces matières grasses avec un alcool (méthanol ou éthanol) en présence d'un catalyseur (hydroxyde de sodium ou hydroxyde de potassium).

La culture des algues ne requiert pas de terres arables, contribuant ainsi à la préservation des forêts et des ressources en eau, ce qui constitue un avantage supplémentaire pour faire du biodiesel à base d'algues une alternative durable et attrayante aux combustibles fossiles.

Certaines nations et entreprises ont connu des succès tangibles dans les technologies de production d'énergie à partir des algues, telles que :

États-Unis : Projet "Algenol" pour la production de biodiesel.

Inde : Projet "Seamiotic" pour la production de biogaz.

Espagne : Projet "BioFuel Systems" pour la production de biodiesel.

L'atteinte de la viabilité économique et environnementale des technologies à base d'algues à grande échelle nécessite une période de 5 à 10 ans de développement continu, d'amélioration technologique, de soutien gouvernemental et d'expansion des infrastructures. Au cours de cette période, ces technologies passeront du statut de solutions émergentes à celui de composants essentiels du mix énergétique mondial, contribuant ainsi à créer un avenir plus durable et moins impactant sur l'environnement.

Références Bibliographiques

Adeniyi, O.M., Azimov, U., Burluka, A., 2018. Algae biofuel: Current status and future applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 90, 316–335. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.067>

Agneessens, L.M., Ottosen, L.D.M., Voigt, N.V., Nielsen, J.L., De Jonge, N., Fischer, C.H., Kofoed, M.V.W., 2017. In-situ biogas upgrading with pulse H₂ additions: The relevance of methanogen adaption and inorganic carbon level. *Bioresour. Technol.* 233, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.016>

Alfonsín, V., Maceiras, R., Gutiérrez, C., 2019. Bioethanol production from industrial algae waste. *Waste Manag.* 87, 791–797. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.019>

Andreides, D., Bautista Quispe, J.I., Bartackova, J., Pokorna, D., Zabranska, J., 2021. A novel two-stage process for biological conversion of syngas to biomethane. *Bioresour. Technol.* 327, 124811. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124811>

Androniceanu, A., Sabie, O.M., 2022. Overview of Green Energy as a Real Strategic Option for Sustainable Development. *Energies* 15, 8573. <https://doi.org/10.3390/en15228573>

Ansari, F.A., Wahal, S., Gupta, S.K., Rawat, I., Bux, F., 2017. A comparative study on biochemical methane potential of algal substrates: Implications of biomass pre-treatment and product extraction. *Bioresour. Technol.* 234, 320–326. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.068>

Ariede, M.B., Candido, T.M., Jacome, A.L.M., Velasco, M.V.R., De Carvalho, J.C.M., Baby, A.R., 2017. Cosmetic attributes of algae - A review. *Algal Res.* 25, 483–487. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.05.019>

Berna, H., 2009. Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique (Thèse doctorat).

Bose, K.S., Sarma, R.H., 1975. Delineation of the intimate details of the backbone conformation of pyridine nucleotide coenzymes in aqueous solution. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 66, 1173–1179. [https://doi.org/10.1016/0006-291x\(75\)90482-9](https://doi.org/10.1016/0006-291x(75)90482-9)

Calleja, P., 2013. L'exploitation industrielle des micro-algues: *Ann. Mines - Responsab. Environ.* N° 70, 36–41. <https://doi.org/10.3917/re.070.0036>

Cheng, S., Xing, D., Call, D.F., Logan, B.E., 2009. Direct Biological Conversion of Electrical Current into Methane by Electromethanogenesis. *Environ. Sci. Technol.* 43, 3953–3958. <https://doi.org/10.1021/es803531g>

Commission Énergie et changement climatique (Ed.), 2010. Les biocarburants, Communications à l'Académie des technologies. Éd. le Manuscrit, Paris.

Costa, S., Réquillart, V., 2000. Évaluation publique de la production de biocarburants. Application au cas de l'ester méthylique de colza. *Économie Prévision* 142, 27–46. <https://doi.org/10.3406/ecop.2000.5986>

Cunefare, K.A., Skow, E.A., Erturk, A., Savor, J., Verma, N., Cacan, M.R., 2013. Energy harvesting from hydraulic pressure fluctuations. *Smart Mater. Struct.* 22, 025036. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/2/025036>

Domozych, D.S., Ciancia, M., Fangel, J.U., Mikkelsen, M.D., Ulvskov, P., Willats, W.G.T., 2012. The Cell Walls of Green Algae: A Journey through Evolution and Diversity. *Front. Plant Sci.* 3. <https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00082>

Dronne, Y., Forslund, A., Guyomard, H., 2011. Les biocarburants de deuxième génération et la compétition pour l'usage des terres. *Ol. Corps Gras Lipides* 18, 1–9. <https://doi.org/10.1051/ocl.2011.0361>

FRANCOIS, J., 2021. France : les sénateurs s'intéressent à la biométhanisation.

Frenkel, J., Vyverman, W., Pohnert, G., 2014. Pheromone signaling during sexual reproduction in algae. *Plant J.* 79, 632–644. <https://doi.org/10.1111/tpj.12496>

Guiry, M.D., 2012. HOW MANY SPECIES OF ALGAE ARE THERE? *J. Phycol.* 48, 1057–1063. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01222.x>

Ibañez, E., Cifuentes, A., 2013. Benefits of using algae as natural sources of functional ingredients. *J. Sci. Food Agric.* 93, 703–709. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6023>

Joas, F., Pahle, M., Flachsland, C., Joas, A., 2016. Which goals are driving the Energiewende? Making sense of the German Energy Transformation. *Energy Policy* 95, 42–51.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.003>

Jörg, W.F., 2012. Biogaz en Allemagne (Renforcement des capacités de formation et de formation continue dans le secteur de l'environnement, Maghreb / volet «Biogaz» Atelier de Sensibilisation et de Planification Maroc).

Kay, R.A., Barton, L.L., 1991. Microalgae as food and supplement. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 30, 555–573. <https://doi.org/10.1080/10408399109527556>

Keong, L.S., Patle, D.S., Shukor, S.R., Ahmad, Z., 2016. Biodiesel Production using Heterogeneous Catalyst in CSTR: Sensitivity Analysis and Optimization. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 121, 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/121/1/012007>

Korinnyi, S., Mikhailutsa, M., Bondarenko, A., 2021. GREEN ENERGY: SALVATION OR THREAT TO THE GLOBAL ECONOMIC AND ENERGY SYSTEM. *East. Eur. Econ. Bus. Manag.* <https://doi.org/10.32782/easterneurope.29-1>

Kouzuma, A., Watanabe, K., 2015. Exploring the potential of algae/bacteria interactions. *Curr. Opin. Biotechnol.* 33, 125–129. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.02.007>

Lafratta, M., Thorpe, R.B., Ouki, S.K., Shana, A., Germain, E., Willcocks, M., Lee, J., 2020. Dynamic biogas production from anaerobic digestion of sewage sludge for on-demand electricity generation. *Bioresour. Technol.* 310, 123415. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123415>

Lee, U., Han, J., Elgowainy, A., Wang, M., 2018. Regional water consumption for hydro and thermal electricity generation in the United States. *Appl. Energy* 210, 661–672. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.025>

Lewis, N.S., 2016. Research opportunities to advance solar energy utilization. *Science* 351, aad1920. <https://doi.org/10.1126/science.aad1920>

Li, Y., Zhou, W., Hu, B., Min, M., Chen, P., Ruan, R.R., 2011. Integration of algae cultivation as biodiesel production feedstock with municipal wastewater treatment: Strains screening and significance evaluation of environmental factors. *Bioresour. Technol.* 102, 10861–10867. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.064>

Liu, J., Chen, X., Cao, S., Yang, H., 2019. Overview on hybrid solar photovoltaic-electrical energy storage technologies for power supply to buildings. *Energy Convers. Manag.* 187, 103–121. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.080>

Loic, A., Gérard, Antonin., Carole, B., 2020. Biométhanation par injection de dihydrogène. Etat de l'art et potentiel d'émergence.

Marechal, E., 2015. Carburants à base d'algues oléagineuses - Principes, filières, verrous. *Bioprocédés Bioprod.* <https://doi.org/10.51257/a-v1-in186>

Marniemi, J., Parkki, M.G., 1975a. Radiochemical assay of glutathione S-epoxide transferase and its enhancement by phenobarbital in rat liver in vivo. *Biochem. Pharmacol.* 24, 1569–1572. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(75\)90080-5](https://doi.org/10.1016/0006-2952(75)90080-5)

Marniemi, J., Parkki, M.G., 1975b. Radiochemical assay of glutathione S-epoxide transferase and its enhancement by phenobarbital in rat liver in vivo. *Biochem. Pharmacol.* 24, 1569–1572. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(75\)90080-5](https://doi.org/10.1016/0006-2952(75)90080-5)

Marniemi, J., Parkki, M.G., 1975c. Radiochemical assay of glutathione S-epoxide transferase and its enhancement by phenobarbital in rat liver in vivo. *Biochem. Pharmacol.* 24, 1569–1572. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(75\)90080-5](https://doi.org/10.1016/0006-2952(75)90080-5)

Merrifield, M.P., 1887. The Classification of Algæ. *Nature* 36, 313–315. <https://doi.org/10.1038/036313b0>

Mesbahi, D., 2012. 'La transestérification hétérogène de l'huile de tournesol sous alumine: Production du biodiesel EEHV''. *Mém. Magister.*

Midilli, A., Dincer, I., Ay, M., 2006. Green energy strategies for sustainable development. *Energy Policy* 34, 3623–3633. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.08.003>

Nguyen, V.C., 2010. Maîtrise de l'aptitude technologique des oléagineux par modification structurelle : applications aux opérations d'extraction et de transestérification in-situ (Thèse doctorat). Université de La Rochelle.

Nicholls, K.H., Wujek, D.E., 2015. Chrysophyceae and Phaeothamniophyceae, in: *Freshwater Algae of*

North America. Elsevier, pp. 537–586. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385876-4.00012-8>

Oliveira, L.R.G.D., Santos Filho, D.A.D., Vasconcelos, K.C., Lucena, T.V.D., Jucá, J.F.T., Santos, A.F.D.M.S., 2018. Methanization potential of anaerobic biodigestion of solid food waste. *Rev. Bras. Eng. Agríc. E Ambient.* 22, 69–73. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p69-73>

Płachno, B.J., Wołowski, K., Augustynowicz, J., Łukaszek, M., 2015. Diversity of algae in a thallium and other heavy metals-polluted environment. *Ann. Limnol. - Int. J. Limnol.* 51, 139–146. <https://doi.org/10.1051/limn/2015010>

Qazi, A., Hussain, F., Rahim, N.Abd., Hardaker, G., Alghazzawi, D., Shaban, K., Haruna, K., 2019. Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions. *IEEE Access* 7, 63837–63851. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906402>

Reid, W.V., Ali, M.K., Field, C.B., 2020. The future of bioenergy. *Glob. Change Biol.* 26, 274–286. <https://doi.org/10.1111/gcb.14883>

Rigo Portocarrero, I., Amin Ferraz, D., Oliveira, L.P.S., 2019. LOS BIOCARBURANTES SOSTENIBLES: UN ANÁLISIS DEL MARCO REGULATORIO DE LA UNIÓN EUROPEA. *Veredas Direito Direito Ambient. E Desenvol. Sustentável* 16, 67–89. <https://doi.org/10.18623/rvd.v16i36.1614>

Ritchie, R.J., 2008. Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls a, b, c, and d and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents. *Photosynthetica* 46, 115–126. <https://doi.org/10.1007/s11099-008-0019-7>

Rodriguez, C., Alaswad, A., Mooney, J., Prescott, T., Olabi, A.G., 2015. Pre-treatment techniques used for anaerobic digestion of algae. *Fuel Process. Technol.* 138, 765–779. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.06.027>

Schmoldt, A., Benthe, H.F., Haberland, G., 1975. Digitoxin metabolism by rat liver microsomes. *Biochem. Pharmacol.* 24, 1639–1641.

Shafiee, S., Topal, E., 2009. When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy* 37, 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016>

Son, J.-Y., Ma, K., 2017. Wind Energy Systems. *Proc. IEEE* 105, 2116–2131. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2695485>

Speight, J.G., 2005. Petroleum Refinery Processes, in: Kirk-Othmer (Ed.), *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471238961.1805060919160509.a01.pub2>

Stutz, B., Le Pierres, N., Kuznik, F., Johannes, K., Palomo Del Barrio, E., Bédécarrats, J.-P., Gibout, S., Marty, P., Zalewski, L., Soto, J., Mazet, N., Olives, R., Bezian, J.-J., Minh, D.P., 2017. Storage of thermal solar energy. *Comptes Rendus Phys.* 18, 401–414. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.09.008>

Tam, L.T., Hong, D.D., Ranga Rao, A., Ravishankar, G.A., 2021. Astaxanthin production and technology in Vietnam and other Asian countries, in: *Global Perspectives on Astaxanthin*. Elsevier, pp. 595–633. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823304-7.00007-6>

Tao, B., Alessi, A.M., Zhang, Y., Chong, J.P.J., Heaven, S., Banks, C.J., 2019. Simultaneous biomethanisation of endogenous and imported CO₂ in organically loaded anaerobic digesters. *Appl. Energy* 247, 670–681. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.058>

Thakur, P., Majumder, S., Thakur, A., 2024. Microalgae Synthesis for Biodiesel Production, in: Pal, D.B., Rai, A.K., Siddiqui, S. (Eds.), *Sustainable Clean Energy Production Using Waste Biomass, Clean Energy Production Technologies*. Springer Nature Singapore, Singapore, pp. 273–298. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0840-6_11

Traité d'algologie: introduction à la biologie et à la systématique des algues, 1934. . *Nature* 134, 400–400. <https://doi.org/10.1038/134400c0>

Veers, P., Dykes, K., Lantz, E., Barth, S., Bottasso, C.L., Carlson, O., Clifton, A., Green, J., Green, P., Holttinen, H., Laird, D., Lehtomäki, V., Lundquist, J.K., Manwell, J., Marquis, M., Meneveau, C., Moriarty, P., Munduate, X., Muskulus, M., Naughton, J., Pao, L., Paquette, J., Peinke, J., Robertson, A., Sanz Rodrigo, J., Sempreviva, A.M., Smith, J.C., Tuohy, A., Wiser, R., 2019. Grand challenges in the science of wind energy. *Science* 366, eaau2027. <https://doi.org/10.1126/science.aau2027>

Wirth, R., Lakatos, G., Maróti, G., Bagi, Z., Minárovics, J., Nagy, K., Kondorosi, É., Rákhely, G., Kovács, K.L., 2015. Exploitation of algal-bacterial associations in a two-stage biohydrogen and biogas generation process. *Biotechnol. Biofuels* 8, 59. <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0243-x>

Zabranska, J., Pokorna, D., 2018. Bioconversion of carbon dioxide to methane using hydrogen and hydrogenotrophic methanogens. *Biotechnol. Adv.* 36, 707–720.

<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.12.003>

Zhang, Y., Li, Y., Zhang, X., Tan, T., 2015. Biodiesel production by direct transesterification of microalgal biomass with co-solvent. *Bioresour. Technol.* 196, 712–715.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.052>

الملخص

نظرًا للانفجار الديموغرافي الذي يشهده العالم حاليًا، أصبحت مصادر الطاقة التقليدية من الموارد الأحفورية (النفط، الفحم، الغاز الطبيعي، الطاقة النووية) غير كافية لسد الاحتياجات العالمية الطاقوية المتزايدة. علاوة على ذلك، فإن تأثير هذه الطاقات الناضبة على البيئة يشكل خطرًا على كافة الكائنات الحية، مما يدفعنا للبحث عن حلول قابلة للتطبيق. في هذا العمل، نسلط الضوء على الطاقات المستدامة وبالأخص الغاز و الديزل الحيويين المستخلصين من الطحالب كمصدر نقي ودائم للطاقة عبر عمليتي التحلل الحيوي اللاهوائي التحويل الأستري.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المستدامة، الطحالب، الغاز الحيوي، الديزل الحيوي.

Abstract

Due to the current demographic explosion the world is experiencing, traditional energy sources from fossil resources (oil, coal, natural gas, nuclear energy) are no longer sufficient to meet the increasing global energy demands. Moreover, the environmental impact of these depleting energies poses a threat to all living organisms, prompting us to seek viable solutions. In this work, we highlight sustainable energies, particularly the biogas and biodiesel derived from algae, as a clean and enduring source of energy through the processes of anaerobic digestion and transesterification.

Keywords : sustainable energies, algae, biogas, biodiesel.

Résumé

En raison de l'explosion démographique mondiale actuelle, les sources traditionnelles d'énergie issues des ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel, énergie nucléaire) ne sont plus suffisantes pour répondre à la demande croissante en énergie à l'échelle mondiale. De plus, l'impact environnemental de ces énergies en déclin représente une menace pour toutes les formes de vie, ce qui nous pousse à rechercher des solutions pratiques. Dans cette étude, nous mettons en lumière les énergies durables, notamment le biogaz et le biodiesel produits à partir des algues, comme sources d'énergie propres et durables grâce aux processus de biodégradation anaérobie et de transestérification.

Mots-clés : énergies durables, algues, biogaz, biodiesel.