



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Université Larbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi

Faculté Des Sciences Exactes et des Sciences de La Nature et de la Vie

Département des Sciences de La Nature et de la Vie

N ° d'ordre...

N ° de série.....

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Biotechnologie Végétale

Applications industrielles et environnementales des microalgues

Présenté par :

Ben Mounah Chifa

et

Bouregba Imene

Devant le jury :

Président : Dr. Malki Samira

Université d'Oum el Bouaghi

Examineur : Dr. Khammar Hichem

Université d'Oum el Bouaghi

Rapporteur : Pr. Grama Borhane Samir

Université d'Oum el Bouaghi

Année universitaire : 2022-2023

Résumé

La biotechnologie des microalgues est un domaine de recherche qui exploite les propriétés uniques des microalgues pour diverses applications industrielles et environnementales. Notre étude avait pour objectifs de faire une synthèse sur l'intérêt et les applications biotechnologique des microalgues dont le domaine environnementale, principalement : le traitement des eaux usées, la séquestration du CO₂, le domaine énergétique et en agriculture. La biotechnologie des microalgues offre donc de nombreuses possibilités dans divers domaines, de l'énergie à l'alimentation en passant par l'environnement et la santé. Les recherches se poursuivent pour améliorer les techniques de culture, d'isolement des souches, d'optimisation des conditions de croissance et de valorisation des produits pour exploiter pleinement le potentiel des microalgues dans ces applications.

Mots clés : Microalgue, Biotechnologie, Environnement, Bioproduits.

Abstract

Microalgae biotechnology is a field of research that exploits the unique properties of microalgae for various industrial and environmental applications. The aim of our study was to provide an overview of the interest in and biotechnological applications of microalgae, mainly in the environmental field: wastewater treatment, CO₂ sequestration, energy and agriculture. Microalgae biotechnology offers numerous possibilities in various fields, from energy and food to the environment and health. Research is continuing to improve cultivation techniques, isolate strains, optimise growth conditions and add value to products in order to fully exploit the potential of microalgae in these applications.

Key words: Microalgae, Biotechnology, Environment, Bioproducts.

ملخص

التكنولوجيا الحيوية للطحالب الدقيقة هي مجال بحثي يستغل الخصائص الفريدة للطحالب الدقيقة لمختلف التطبيقات الصناعية والبيئية. كان الهدف من دراستنا هو تقديم لمحة عامة عن الاهتمام بتطبيقات التكنولوجيا الحيوية للطحالب الدقيقة ، وخاصة في المجال البيئي: معالجة مياه الصرف الصحي ، وعزل ثاني أكسيد الكربون ، والطاقة والزراعة. تقدم التكنولوجيا الحيوية للطحالب الدقيقة إمكانيات عديدة في مختلف المجالات ، من الطاقة والغذاء إلى البيئة والصحة. يستمر البحث لتحسين تقنيات الزراعة وعزل السلالات وتحسين ظروف النمو وإضافة قيمة للمنتجات من أجل الاستفادة الكاملة من إمكانيات الطحالب الدقيقة في هذه التطبيقات

الكلمات المفتاحية: الطحالب الدقيقة ، التكنولوجيا الحيوية ، البيئة ، المنتجات الحيوية

Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
1. Introduction	1
<i>Chapitre 1</i>	
2. Généralité sur les microalgues	4
3. La classification des microalgues	6
4. Composition biochimiques des microalgues	9
5. Facteurs influents sur la croissance des microalgues	11
6. Les besoins nutritifs	13
7. Croissance des microalgues	14
8. Le mode nutritionnel des microalgues	16
• 8.1. Autotrophe	16
• 8.2. Hétérotrophe	16
• 8.3. Mixotrophe	16
9. Les systèmes de cultures des microalgues	17
• 9.1. Systèmes ouverts	17
• 9.2. Systèmes PBR Fermés	18
<i>Chapitre 2</i>	
1. Les applications des microalgues	21
2. Domaine environnemental	21
• 2.1. Traitement des eaux usées	22
• 2.2. Agriculture	23
• 2.3. Séquestration du CO ₂	27
• 2.4. Domaine énergétique	34
3. Conclusion	31
Références bibliographiques	32

Liste des figures

Figure 1.	Schéma de l'ultrastructure de <i>C. vulgaris</i> représentant les différents organites (Safi et al., 2014).	5
Figure 2.	Principales microalgues cultivées actuellement : 1) <i>Spirulina</i> (<i>Arthrospira platensis</i>), 2) <i>Dunaliella salina</i> , 3) <i>Chlorella vulgaris</i> , 4) <i>Haematococcus pluvialis</i> .	8
Figure 3.	Répartition des principaux phyla de microalgues selon le système de classification des sept royaumes avec les classes utilisées pour diverses applications biotechnologiques (Levasseur et al., 2020).	9
Figure 4.	Activité photosynthétique en fonction de l'intensité lumineuse (Masojidek et al, 2004).	12
Figure 5.	Les phases de croissance des microorganismes (Lavens and Sorgeloos, 1996).	15
Figure 6.	Représentation schématique d'un système ouvert (Alcaine, 2010).	16
Figure 7.	Culture de <i>Dunaliella salina</i> en bassins naturels (Australie) (Lee, 2001).	16
Figure 8.	Installation de production d'algues en bioréacteur à tube fermé dans la province de Yunnan, en Chine (Balasubramaniam et al., 2021).	19
Figure 9.	Types de culture de microalgues à l'échelle du laboratoire. (A) photobioréacteur à couloir ; (B) photobioréacteur à colonne annulaire intérieure ; (C) culture de microalgues en bouteilles avec lumière et oxygène dans un laboratoire scientifique ; (D) photobioréacteur (Balasubramaniam et al., 2021).	20
Figure 10.	Diversité du champ d'application des microalgues (Safi et al., 2014).	21
Figure 11.	Procédé de traitement des eaux par les microalgues (Filali, 2012).	22
Figure 12.	Colonisation des feuilles et des racines par les cyanobactéries. (1) Les cyanobactéries pénètrent dans le tissu foliaire par les stomates et colonisent l'espace intercellulaire, formant une boucle cyanobactérienne. (2) À la surface des racines, les cyanobactéries présentent deux types de modèles. (3) Co-inoculation avec de l'acide 2,4-dichlorophénoxy acétique (2,4-D) (auxine synthétique) et de <i>Nostoc</i> spp. augmente la formation de para-nodules et la fixation de l'azote (Lee and Ryu, 2021).	25
Figure 13.	Effets bénéfiques des algues sur les plantes. Dans les plantes, les microalgues procaryotes telles que <i>Nostoc</i> et <i>Anabaena</i> , et les microalgues eucaryotes telles que <i>Chlorella</i> , agissent comme agents de contrôle biologique (Lee and Ryu, 2021).	26
Figure 14.	Schéma du procédé de fixation de CO ₂ par les microalgues à partir de gaz industriel (Pulz et al., 2004).	28

Liste des tableaux

Tableau 1.	Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de microalgue (Sialve esteyer, 2013).	10
Tableau 2.	Profil de minéraux de <i>C. Vulgaris</i> (100 g 100 g ⁻¹) (Safi et al., 2014).	11
Tableau 3.	Profil en vitamines de <i>C. Vulgaris</i> (mg 100g ⁻¹) (Safi et al., 2014).	11
Tableau 4.	Comparaison des avantages et inconvénients des bassins de type raceway et des photobioréacteurs.	20
Tableau 5.	Microalgues utilisées dans la remédiation des polluants présents dans les eaux usées (Balasubramaniam et al., 2021).	23
Tableau 6.	Espèces de microalgues et leur utilisation comme biofertilisant et biostimulant pour les plantes (Balasubramaniam et al., 2021).	26
Tableau 7.	Production de bioéthanol à partir de diverses espèces de microalgues (Balasubramaniam et al., 2021).	29

Introduction

1. Introduction

Les algues sont un groupe d'organismes photosynthétiques anciens allant des cyanobactéries procaryotes aux microalgues eucaryotes. Les microalgues eucaryotes. En général, les algues sont classées principalement en fonction de leur couleur, de leur forme et de leur cycle de vie. Seul un petit nombre d'algues ont été sélectionnées pour déterminer leurs applications potentielles. Les microalgues sont des micro-organismes photosynthétiques qui vont des organismes unicellulaires aux multicellulaires et qui ont évolué dans une variété d'habitats, principalement aquatiques, avec une grande variété de caractéristiques morphologiques, physiologiques et biochimiques (Barsanti et Gaultieri, 2005).

En outre, par rapport aux plantes supérieures, les microalgues présentent des rendements annuels de conversion des photons en biomasse plus élevés, que les plantes supérieures et aucune sensibilité intrinsèque à la saisonnalité. Cette caractéristique, combinée à la grande diversité des souches permet de valoriser des molécules telles que les protéines, les lipides, les glucides et les pigments, lipides, glucides, pigments, sont produites avec des rendements élevés (Grama et al., 2014a). Elles peuvent également être cultivées sur des eaux usées ou des terres non agricoles sans pesticides ne compromettent donc pas la production d'aliments ou d'autres produits à partir de cultures. En outre, elles sont capables de recycler le dioxyde de carbone atmosphérique et donc de minimiser les impacts environnementaux associés. En conséquence, et compte tenu des défis actuels en matière d'énergie, d'environnement et d'alimentation, la biotechnologie des microalgues est progressivement montée en puissance. Aujourd'hui, elle peut être divisée en quatre quatre grands domaines de recherche : le traitement des eaux usées, la séquestration du CO₂, la production de biocarburants et la production de produits à haute valeur ajoutée, la production de biocarburants et la production de molécules à haute valeur ajoutée (Grama et al., 2016).

Le monde est confronté à des défis croissants dus aux nombreuses facettes de la pollution environnementale. Face à une prise de conscience collective et individuelle sur les problèmes environnementaux, de nombreuses solutions ont été envisagées pour mieux gérer notre environnement. Le développement des technologies environnementales a pris une place de plus en plus importante dans la politique mondiale actuellement. En effet, en raison des conséquences de réchauffement climatique et émissions massives de gaz à effet de serre, plusieurs recherches se concentre sur le rôle potentiel des systèmes biologiques, plus spécifiquement la biotechnologie des microalgues. La conversion de l'énergie lumineuse en

énergie chimique par la fixation du CO₂ est dix fois plus élevée dans les microalgues que dans les plantes terrestres, ce qui rend l'efficacité de production des microalgues exceptionnelle (Barsanti et Gaultieri, 2005).

La croissance alarmante de la pollution des eaux par des matières diverses, organique ou non : pesticides, détergents, métaux lourds et d'autres substances toxiques, représente un réel danger pour la flore et la faune aquatique. Les microalgues peuvent utiliser l'azote, le phosphore, le carbone et les produits chimiques tels que les métaux lourds contenus dans les eaux usées comme source de nutriments ; c'est ce que l'on appelle la phycoremédiation (Person, 2011).

L'utilisation de la biomasse de microalgues constitue une nouvelle technologie pour l'élimination des métaux lourds tels que le zinc, le cuivre, le plomb, le mercure, le chrome et le cadmium des eaux usées. La biomasse de microalgues est une option en raison des faibles coûts d'obtention dans l'élimination des métaux lourds. Les microalgues sont également capables d'éliminer les colorants tels que l'aniline utilisée par les industries textiles, cosmétiques et alimentaires (Barsanti et Gaultieri, 2005).

Les microalgues aussi utilisées comme engrais biologiques, dont la fertilisation des sols pauvres, en particulier les sols sahariens structure et amoindrie par l'abondance des ions de sodium dans l'eau d'irrigation, ce qui engendre des conditions asphyxiantes très défavorables. Dans les régions où les conditions climatiques sont difficiles, telles que les steppes semi-arides, les déserts chauds et les régions polaires, la communauté algale forme, avec d'autres micro-organismes, une croûte de sol biologique qui protège contre les stress abiotiques et biotiques (Person, 2011).

Au cours de la dernière décennie, les bioraffineries d'algues ont été étudiées comme une approche permettant d'optimiser l'utilisation de plusieurs composants pour différentes applications. En outre, si elles sont connectées à d'autres infrastructures industrielles, les usines de production d'algues peuvent bénéficier des ressources associées (par exemple, l'eau, la chaleur) et fonctionner comme une source de services supplémentaires tels que le traitement des eaux usées. Cette synergie devrait permettre de réduire les coûts et d'accroître la durabilité environnementale de la production de microalgues, mais des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser ces approches (Barsanti et Gaultieri, 2005).

Notre étude avait pour objectifs de faire une synthèse sur l'intérêt et les applications biotechnologiques des microalgues dans le domaine environnemental. Une revue

bibliographique est présentée dans la première partie de ce mémoire, avec une présentation générale des micro-algues, leurs modes de croissance, leurs classifications et les différentes modes de leurs cultures. La deuxième partie décrit les différents domaines d'applications environnementales de ces microorganismes, on termine par une conclusion générale.

Chapitre 1

2. Généralité sur les microalgues

Les microalgues sont des organismes photosynthétiques microscopiques appartenant à divers groupes taxonomiques, dont les cyanobactéries, les chlorophytes (algues vertes), les diatomées, les dinoflagellés et bien d'autres. On les trouve dans divers environnements aquatiques, tels que les océans, les lacs, les étangs et les rivières, ainsi que dans les habitats terrestres humides (Barsanti et Gualtieri, 2006).

Les microalgues peuvent avoir des modes de croissance photoautotrophe, hétérotrophe et certaines algues peuvent aussi se développer par mixotrophie en combinant les deux modes (Borowitzka, 1999). En plus, les microalgues présentent l'avantage d'avoir un cycle de division très court, de l'ordre de quelques heures, permettant une production rapide de la biomasse (Person et al., 2011).

Les microalgues ont été utilisées par l'homme depuis des centaines d'années comme nourriture, fourrage, remèdes et également comme engrais. Au 14^{ème} siècle, les Aztèques récoltaient l'*Arthrospira* « spiruline » ; une cyanobactérie du lac Texcoco. Ils ont utilisé le tecuitlatl ; une sorte de gâteau à base de spiruline, comme une partie importante de leur alimentation. Très probablement, l'utilisation de cette cyanobactérie comme nourriture au Tchad remonte à la même période, ou même plutôt, à l'Empire Kanem (9^{ème} siècle) (Barsanti et Gualtieri, 2006).

Elles ont la capacité de se développer rapidement dans des milieux et elles peuvent croître dans des conditions extrêmes (espèces halophiles dans les milieux très salés, espèces thermophiles dans les milieux très chauds). Les microalgues sont présentes dans quasiment tous les écosystèmes terrestres (Person et al., 2011). Sur plus de 800 000 espèces d'algues qui existent dans la nature, seules 5 000 ont été caractérisées à ce jour et seul un petit nombre d'espèces d'algues a été sélectionné pour déterminer leurs applications potentielles. Les algues sont classées en microalgues et macroalgues en fonction de leur taille (Lee and Ryu, 2021). Ces microorganismes se caractérisent principalement par:

- La taille : les microalgues sont généralement des organismes unicellulaires dont la taille varie de quelques micromètres à quelques centaines de micromètres. Toutefois, certaines espèces peuvent former des colonies ou des structures filamenteuses.
- Photosynthèse : les microalgues utilisent la lumière du soleil, le dioxyde de carbone et l'eau pour réaliser la photosynthèse, un processus par lequel elles convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique, produisant de l'oxygène comme sous-produit. Cette

capacité de photosynthèse fait d'elles des producteurs primaires dans les écosystèmes aquatiques et des contributeurs importants à la production mondiale d'oxygène.

- Pigments : les microalgues contiennent divers pigments qui leur donnent leurs couleurs caractéristiques. Ces pigments comprennent les chlorophylles (vertes), les caroténoïdes (jaunes, orange, rouges) et les phycobilines (rouges, bleues). Les pigments permettent aux microalgues d'absorber l'énergie lumineuse à différentes longueurs d'onde, maximisant ainsi leur efficacité photosynthétique.
- Polyvalence nutritionnelle : les microalgues peuvent être autotrophes, c'est-à-dire qu'elles tirent leur énergie de la photosynthèse et synthétisent leurs propres composés organiques, ou hétérotrophes, c'est-à-dire qu'elles dépendent de sources externes de matière organique pour se nourrir. Certaines espèces de microalgues présentent un comportement mixotrophe, capables à la fois de photosynthèse et d'hétérotrophie, en fonction des conditions environnementales.
- Biodiversité : les microalgues présentent une immense diversité, avec des milliers d'espèces connues présentant un large éventail de morphologies, de caractéristiques physiologiques et d'adaptations écologiques. Cette diversité contribue à l'équilibre écologique global et à la fonctionnalité des écosystèmes aquatiques.

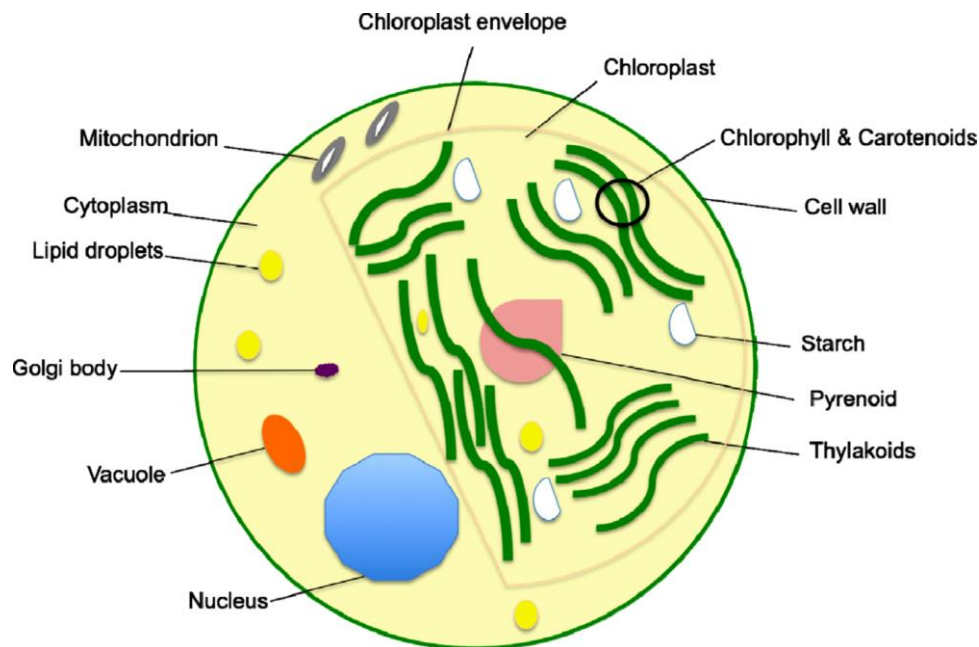


Figure 1 : Schéma de l'ultrastructure de *C. vulgaris* représentant les différents organites (Safi et al., 2014).

Les microalgues ont fait l'objet d'une attention particulière en raison de leur large éventail d'applications potentielles. Elles sont étudiées pour leur utilisation dans la production de biocarburants, la biorestauration des eaux polluées, le traitement des eaux usées, l'alimentation aquacole, les nutraceutiques, les cosmétiques et même comme source de nouveaux composés bioactifs. Leurs taux de croissance élevés, leur absorption efficace des nutriments et leur capacité à se développer dans divers environnements en font des candidats attrayants pour des applications biotechnologiques durables (Barsanti et Gualtieri, 2006).

Les microalgues en biotechnologie sont actuellement l'objet d'un intérêt sans précédent et de l'investissement dans le monde entier (Cadoret et al., 2012). Pour la plupart de ces applications, le marché est encore en développement et l'utilisation des biotechnologies des microalgues va s'étendre dans de nouveaux domaines. Les efforts de recherche et de développement se poursuivent afin de libérer tout le potentiel des microalgues et d'étendre leurs applications dans divers domaines. L'exploitation de leurs capacités uniques peut contribuer à un avenir plus durable et plus respectueux de l'environnement (Grama et al., 2016).

La biotechnologie des microalgues n'a cessé de monter en puissance. Aujourd'hui, elle peut être divisée en quatre grands domaines de recherche : le traitement des eaux usées, la séquestration du CO₂, la production de biocarburants et la production de molécules à haute valeur ajoutée (Levasseur et al., 2020).

3. La classification des microalgues

Traditionnellement, les microalgues ont été classées en fonction de leurs pigments photosynthétiques. Cependant, les systèmes de classification actuels prennent en compte d'autres critères, notamment cytologiques et morphologiques, les constituants de la paroi cellulaire et la nature chimique des produits de stockage. Sur la base de ces caractéristiques, certaines méthodes sont couramment employées pour identifier et classer les espèces d'algues, y compris les observations morphologiques au microscope, la classification moléculaire à l'aide de séquences génétiques spécifiques (Levasseur et al., 2020). Les microalgues sont classées dans différents groupes taxonomiques en fonction de leurs caractéristiques morphologiques, physiologiques et génétiques. La classification des microalgues est en constante évolution, car de nouvelles espèces sont découvertes et les progrès des techniques moléculaires permettent de mieux comprendre leurs relations phylogénétiques.

Les principaux groupes taxonomiques de microalgues sont:

- **Les cyanobactéries (Cyanophyta)** : les cyanobactéries, également connues sous le nom d'algues bleues, sont des micro-organismes procaryotes capables de réaliser la photosynthèse. Elles sont le plus anciens organismes sur terre avec des archives fossiles datant de 3, 5 milliards d'années. Elles se caractérisent par leur capacité à produire de l'oxygène par photosynthèse oxygénique. Les cyanobactéries se trouvent dans divers habitats, notamment dans l'eau douce, les milieux marins, le sol et même dans des environnements extrêmes tels que les sources chaudes.
- **Chlorophytes** : les chlorophytes, ou algues vertes, sont des microalgues eucaryotes qui contiennent de la chlorophylle a et b, ce qui leur donne une couleur verte. On les trouve généralement dans l'eau douce, bien que certaines espèces puissent également vivre dans des environnements marins et terrestres. Les chlorophytes présentent des morphologies diverses, allant des formes unicellulaires aux structures filamenteuses et coloniales.
- **Bacillariophyta** : les bacillariophytes, également connues sous le nom de diatomées, sont des microalgues eucaryotes caractérisées par leurs parois cellulaires en silice, qui forment des structures microscopiques complexes et magnifiques. Les diatomées sont présentes dans les milieux marins et d'eau douce et jouent un rôle important dans la production primaire et le cycle des nutriments. Les bacillariophycées sont des organismes photosynthétiques représentées par les diatomées, appelées «algues brunes», cette couleur est due à la présence chlorophylles a et c, le bêta- carotène, la fucoxanthine, la diatoxanthine et la diadinoxanthine.
- **Haptophytes** : les haptophytes sont un groupe de microalgues eucaryotes qui possèdent des écailles de carbonate de calcium uniques appelées coccolithes. On les trouve principalement dans les environnements marins, en particulier dans les régions de haute mer, et elles jouent un rôle crucial dans le cycle du carbone marin.
- **Dinoflagellés (Dinophyta)** : les dinoflagellés sont des microalgues eucaryotes qui présentent un large éventail de formes, allant d'organismes unicellulaires à des colonies complexes. Ils se caractérisent par la présence de deux flagelles qui leur permettent de se déplacer. Les dinoflagellés sont présents dans les habitats marins et d'eau douce et sont connus pour leur capacité à former des efflorescences algales nuisibles (HAB) dans certaines conditions.

- **Euglenophyta** : les euglénophytes, ou euglénoides, sont des microalgues unicellulaires qui possèdent une structure unique, appelée flagelle, qui leur permet de se déplacer. On les trouve dans divers milieux aquatiques, notamment en eau douce et en eau saumâtre.
- **Cryptophytes** : les cryptophytes sont des microalgues eucaryotes dotées de deux flagelles et d'une structure distinctive appelée cryptochrome. On les trouve principalement dans les eaux douces et les milieux marins.
- **Rhodophytes** : les Rhodophyta, ou algues rouges, sont des microalgues eucaryotes qui contiennent un pigment appelé phycoérythrine, qui leur donne une couleur rouge. On les trouve principalement dans les environnements marins, bien que certaines espèces puissent également vivre en eau douce. Les algues rouges peuvent aller de formes unicellulaires à de grandes structures multicellulaires (Barsanti et Gualtieri, 2006).

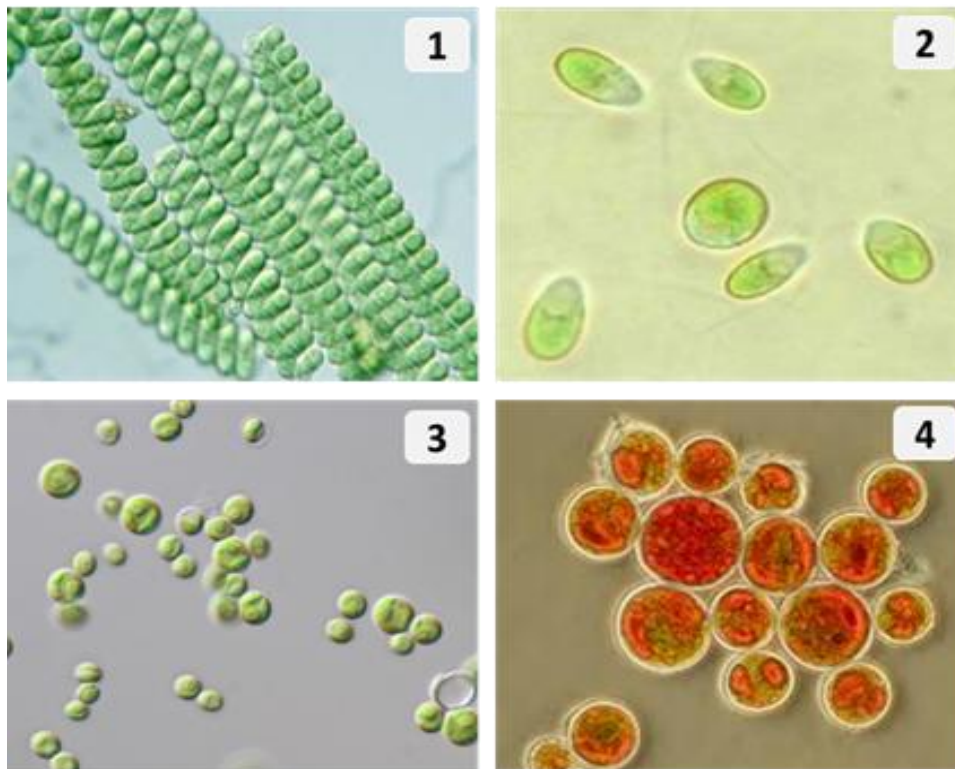


Figure 2 : Principales microalgues cultivées actuellement : 1) *Spirulina* (*Arthrospira platensis*), 2) *Dunaliella salina*, 3) *Chlorella vulgaris*, 4) *Haematococcus pluvialis*.

Ce ne sont là que quelques exemples des principaux groupes taxonomiques de microalgues. Au sein de chaque groupe, il existe de nombreuses espèces présentant des caractéristiques uniques et s'adaptant à différents environnements. Les progrès des techniques moléculaires ont permis de mieux comprendre les relations phylogénétiques entre les

microalgues, ce qui a conduit à des révisions et à des affinements constants de leur classification (Person et al., 2011).

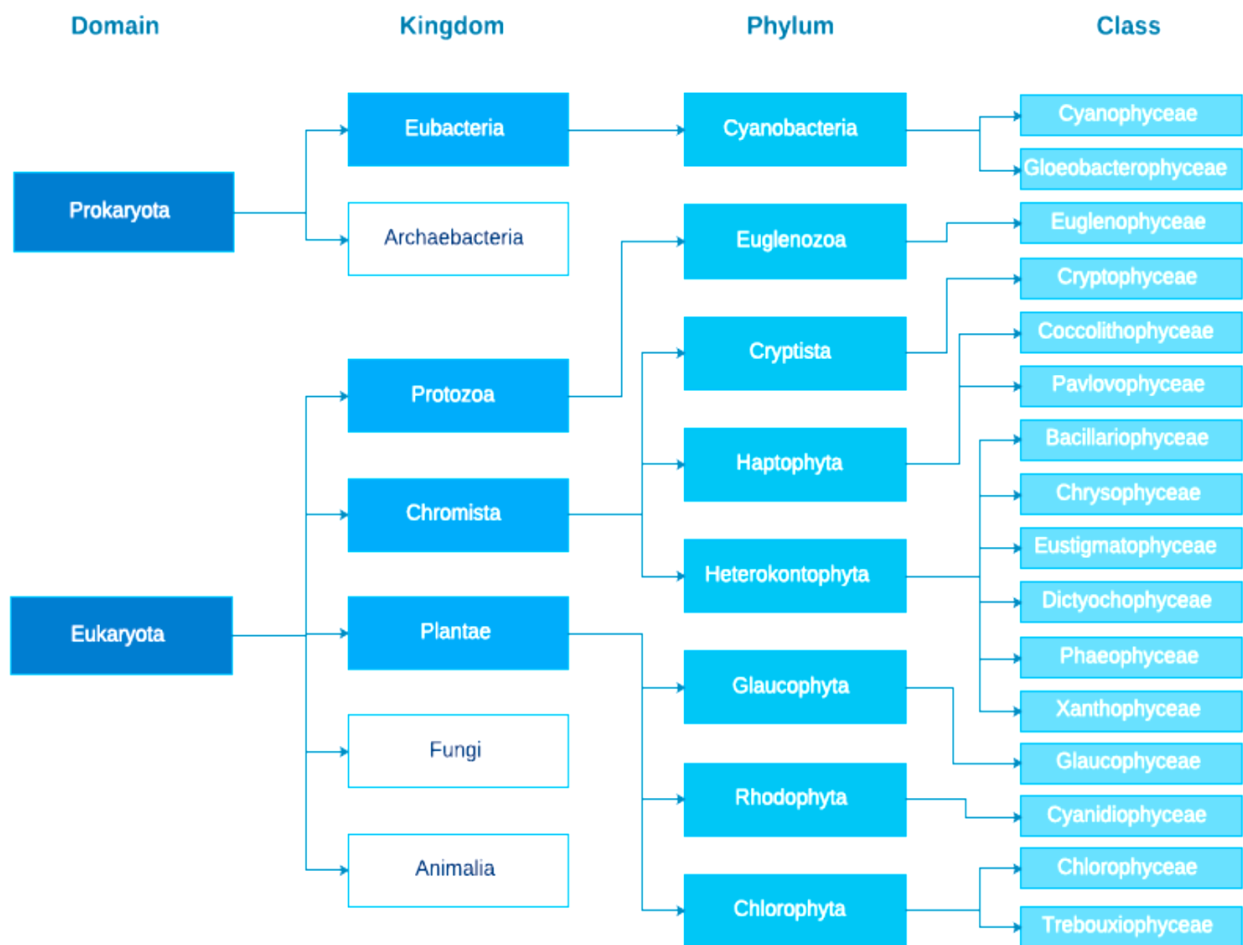


Figure 3 : Répartition des principaux phyla de microalgues selon le système de classification des sept royaumes avec les classes utilisées pour diverses applications biotechnologiques (Levasseur et al., 2020).

4. Composition biochimiques des microalgues

La composition des microalgues varie en fonction de l'espèce, des conditions de culture et de l'environnement. Cependant, en général, les microalgues sont riches en nutriments essentiels et contiennent une gamme de composés bioactifs. Voici une liste des composants courants présents dans les microalgues :

- **Protéines** : les microalgues sont souvent considérées comme une excellente source de protéines, certaines espèces contenant jusqu'à 70% de leur poids sec en protéines. Elles contiennent tous les acides aminés essentiels nécessaires à l'organisme humain.

- **Lipides** : les microalgues peuvent accumuler des lipides riches en acides gras, notamment des acides gras polyinsaturés (oméga-3 et oméga-6). Ces lipides peuvent être extraits et utilisés dans la production de biocarburants, d'huiles alimentaires ou de compléments alimentaires.
- **Glucides** : les microalgues contiennent des glucides, notamment des polysaccharides tels que le glycogène et les carraghénanes. Ces glucides peuvent servir de source d'énergie pour les microalgues elles-mêmes ou être utilisés dans diverses applications industrielles.
- **Vitamines** : les microalgues peuvent être une source de vitamines, notamment les vitamines A, C, E, et certaines vitamines du groupe B. Les concentrations varient selon les espèces.
- **Minéraux** : les microalgues sont riches en minéraux essentiels tels que le fer, le magnésium, le calcium, le potassium et le zinc. Ces minéraux sont importants pour de nombreuses fonctions corporelles.
- **Pigments** : les microalgues contiennent une gamme de pigments photosynthétiques tels que la chlorophylle (verte), les caroténoïdes (jaune, orange, rouge) et les phycobilines (rouge, bleu). Ces pigments sont responsables de la couleur caractéristique des microalgues et ont des propriétés antioxydantes.
- **Composés bioactifs** : les microalgues contiennent divers composés bioactifs tels que les polyphénols, les antioxydants, les phytostérols et les peptides bioactifs. Ces composés peuvent avoir des effets bénéfiques pour la santé humaine, tels que des propriétés anti-inflammatoires, anticancéreuses et immunostimulantes.

Il convient de noter que la composition des microalgues peut varier considérablement en fonction des conditions de culture, des nutriments disponibles et des facteurs environnementaux (Person et al., 2011).

Tableau 1: Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de microalgue (Sialve esteyer, 2013).

Compartiment Biochimique	Fonction	Ordre de grandeur (% Massique)
Protéines	Structure et métabolisme	40-60
Lipides	Structure et réserve énergétique	5_60
Sucres	Structure et réserve énergétique	8_30
Acides nucléiques	Support, vecteur et régulateur de l'information génétique	5_10

Tableau 2 : Profil de minéraux de *C. Vulgaris* (100 g 100 g⁻¹) (Safi et al., 2014).

Microelements			
Na	N/A	1.35	N/A
K	1.13	0.05	2.15
Ca	0.16	0.59	0.27
Mg	0.36	0.34	0.44
P	N/A	1.76	0.96
Macroelements			
Cr	N/A	tr	tr
Cu	N/A	tr	0.19
Zn	N/A	tr	0.55
Mn	N/A	tr	0.40
Se	N/A	tr	N/A
I	N/A	N/A	0.13
Fe	0.20	0.26	0.68

tr: traces; N/A: not available.

Tableau 3 : Profil en vitamines de *C. Vulgaris* (mg 100 g⁻¹) (Safi et al., 2014).

B1 (Thiamine)	2.4	N/A	1.5
B2 (Riboflavin)	6.0	N/A	4.8
B3 (Niacin)	N/A	N/A	23.8
B5 (Pantothenic acid)	N/A	N/A	1.3
B6 (Pyridoxine)	1.0	N/A	1.7
B7 (Biotin)	N/A	N/A	191.6
B9 (Folic acid)	N/A	N/A	26.9
B12 (Cobalamin)	tr	N/A	125.9
C (Ascorbic acid)	100.0	39.0	15.6
E (Tocopherol)	20.0	2787.0	N/A
A (Retinol)	N/A	13.2	N/A

tr: traces; N/A: not available.

5. Facteurs influents sur la croissance des microalgues

La croissance des microalgues est influencée par plusieurs facteurs, à la fois environnementaux et intrinsèques. Les facteurs les plus importants qui influent sur la croissance des microalgues sont:

- **Lumière :** Les microalgues sont des organismes photosynthétiques qui ont besoin de lumière pour la photosynthèse. La quantité, l'intensité et la qualité de la lumière jouent un rôle crucial dans la croissance des microalgues. Des niveaux de lumière adéquats sont nécessaires pour permettre une bonne photosynthèse et favoriser la croissance des microalgues. L'intensité lumineuse joue un rôle important, à faibles intensités

lumineuses, le taux de photosynthèse dépend linéairement de l'intensité lumineuse, mais avec l'augmentation de l'intensité lumineuse, l'activité de la photosynthèse augmente jusqu'à atteindre un plateau.

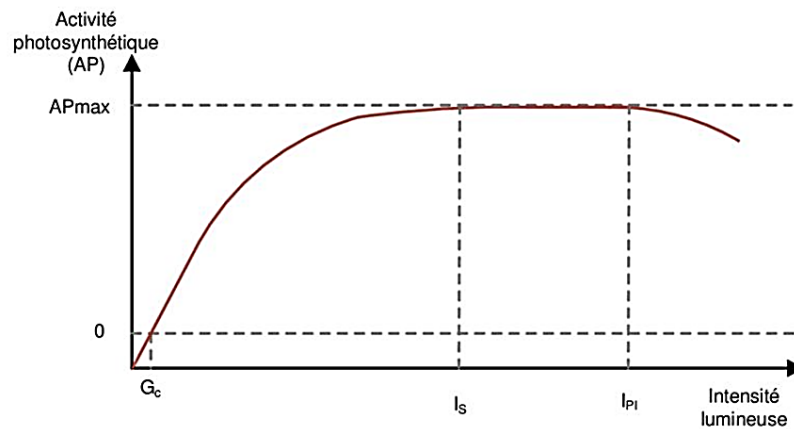


Figure 4 : Activité photosynthétique en fonction de l'intensité lumineuse (Masojidek et al, 2004).

- **Température** : la température est un facteur clé pour la croissance des microalgues, car elle influence la vitesse des processus métaboliques. Chaque espèce de microalgue a une plage de température optimale pour sa croissance. Des températures trop élevées ou trop basses peuvent inhiber la croissance des microalgues. Pour chaque température, il y a une intensité lumineuse spécifique pour atteindre le taux de photosynthèse maximal (Hu, 2004).
- **Nutriments** : les microalgues nécessitent des nutriments essentiels tels que le carbone, l'azote, le phosphore et les micronutriments pour leur croissance. Les concentrations et les ratios de ces nutriments dans le milieu de culture peuvent affecter la croissance des microalgues. Un déséquilibre ou une carence en nutriments peut limiter la croissance des microalgues.
- **CO₂** : le dioxyde de carbone (CO₂) est une source de carbone essentielle pour la photosynthèse des microalgues. Des concentrations adéquates de CO₂ sont nécessaires pour une croissance optimale. Certaines espèces de microalgues sont capables d'utiliser des sources de carbone alternatives, telles que le bicarbonate, en présence de niveaux de CO₂ limités.
- **pH** : le potentiel hydrogène (pH) a une grande importance dans les cultures de microalgues car il détermine la solubilité des minéraux et du dioxyde de

carbone dans le milieu. Le pH du milieu de culture affecte la disponibilité des nutriments et la fonction enzymatique des microalgues. Chaque espèce de microalgue a une plage de pH préférentielle pour sa croissance optimale. Des fluctuations extrêmes du pH peuvent avoir un impact négatif sur la croissance des microalgues.

- **Agitation** : l'agitation du milieu de culture peut améliorer la distribution de la lumière, faciliter les échanges gazeux et prévenir l'accumulation de produits métaboliques toxiques. Une agitation adéquate est nécessaire pour maintenir une croissance homogène des microalgues.
- **Contaminants** : la présence de contaminants tels que les agents pathogènes, les toxines et les métaux lourds peut avoir un effet néfaste sur la croissance des microalgues. Un environnement de culture sain et exempt de contaminants est essentiel pour favoriser la croissance des microalgues.

Il est important de noter que chaque espèce de microalgue a des exigences spécifiques en termes de ces facteurs de croissance. Par conséquent, il est nécessaire de comprendre les besoins spécifiques de chaque espèce pour optimiser leur croissance dans un système de culture donné.

6. Les besoins nutritifs

Les microalgues ont des besoins nutritifs spécifiques pour leur croissance et leur développement. Les principaux éléments nutritifs nécessaires aux microalgues sont :

- **Carbone (C)** : le carbone est essentiel pour la photosynthèse, qui est le processus par lequel les microalgues convertissent la lumière en énergie chimique. Les microalgues peuvent utiliser le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air ou le bicarbonate (HCO_3^-) dans l'eau comme source de carbone.
- **Azote (N)** : l'azote est un élément clé pour la synthèse des protéines et des acides nucléiques. Les microalgues peuvent assimiler l'azote sous forme d'ammonium (NH_4^+), de nitrate (NO_3^-), ou d'autres composés d'azote organique. L'azote est un élément essentiel des protéines de structure et de fonctionnement, c'est l'élément le plus important après le carbone (Becker, 1994).
- **Phosphore (P)** : le phosphore est nécessaire à la synthèse des acides nucléiques, des phospholipides et de l'adénosine triphosphate (ATP), une molécule d'énergie essentielle. Les microalgues peuvent utiliser le phosphate (PO_4^{3-}) présent dans l'eau comme source de phosphore. Une carence en phosphore peut entraîner des

accumulations de pigments chez certaines microalgues, mais l'impact est plus faible qu'une carence azotée (Becker, 1994).

- **Soufre (S)** : le soufre est un composant essentiel des acides aminés et des protéines. Les microalgues peuvent assimiler le sulfate (SO_4^{2-}) présent dans l'eau comme source de soufre.
- **Micronutriments** : les microalgues ont également besoin de divers micronutriments pour leur croissance, tels que le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le molybdène (Mo), le cobalt (Co), et le nickel (Ni). Ces éléments sont nécessaires comme cofacteurs pour les enzymes et les réactions biochimiques (Richmond et al., 2014).

Outre ces éléments nutritifs, les microalgues ont également besoin d'eau, de lumière et de gaz (principalement du dioxyde de carbone) pour leur croissance. La disponibilité de ces éléments nutritifs peut varier en fonction de la composition du milieu de culture, de la source d'eau et des conditions environnementales. Il est important de maintenir un équilibre adéquat de ces éléments nutritifs pour assurer une croissance optimale des microalgues dans les systèmes de culture. Des études et des ajustements appropriés sont nécessaires pour déterminer les besoins nutritifs spécifiques des différentes espèces de microalgues (Richmond et al., 2014).

7. Croissance des microalgues

La croissance des microalgues est un processus dynamique qui peut être influencé par différents facteurs. Voici les principales étapes de croissance des microalgues :

- **Phase de lag** : au début de la culture, les microalgues sont en phase de lag où elles s'adaptent à leur nouvel environnement. Durant cette phase, les microalgues peuvent prendre du temps pour s'acclimater et ajuster leur métabolisme en fonction des conditions de culture.
- **Phase exponentielle** : une fois adaptées, les microalgues entrent dans une phase de croissance exponentielle. Pendant cette phase, les microalgues se multiplient rapidement et la biomasse augmente de manière exponentielle. Les conditions de culture optimales, telles que la disponibilité adéquate de lumière, de nutriments et de CO_2 , favorisent une croissance maximale pendant cette phase.
- **Phase stationnaire** : à un certain stade de la culture, les microalgues atteignent une densité cellulaire maximale et entrent dans une phase stationnaire. La croissance des microalgues ralentit et le taux de multiplication cellulaire équilibre le taux de mortalité

cellulaire. Les facteurs limitants, tels que l'épuisement des nutriments ou l'accumulation de produits métaboliques toxiques, peuvent contribuer à cette phase stationnaire.

- **Phase de déclin** : si les conditions de culture ne sont pas optimales ou si les ressources sont épuisées, les microalgues entrent dans une phase de déclin. La densité cellulaire diminue progressivement et la croissance des microalgues est inhibée. Dans certains cas, la survie des microalgues peut être compromise et la culture peut éventuellement mourir (Richmond et al., 2014).

Il est important de contrôler et d'optimiser les conditions de culture pour favoriser une croissance maximale des microalgues. Cela comprend la fourniture adéquate de lumière, de nutriments, de CO₂ et de conditions environnementales appropriées telles que la température et le pH. La surveillance régulière de la densité cellulaire, de la biomasse, des paramètres de croissance et des conditions de culture peut aider à ajuster les facteurs de croissance pour optimiser la productivité des microalgues (Person et al., 2011).

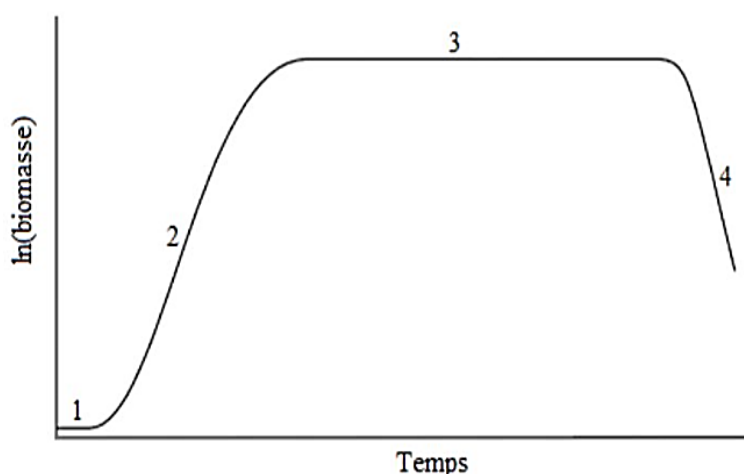


Figure 5 : Les phases de croissance des microorganismes (Lavens and Sorgeloos, 1996).

- **Phase de latence**: la phase de latence correspond à la période où le microorganisme s'adapte au milieu, la vitesse de croissance durant cette période est quasi nulle.
- **Phase exponentielle** : c'est la phase où la vitesse de croissance est à son maximum et est constante. Les microorganismes se multiplient et la mortalité est faible.
- **Phase stationnaire**: durant cette phase, la capacité du milieu est atteinte, la croissance est nulle, le taux de reproduction est égal au taux de mortalité.
- **Phase de déclin** : phase durant laquelle les microorganismes meurent et ne se reproduisent plus (Lavens and Sorgeloos, 1996).

8. Le mode nutritionnel des microalgues

Les microalgues peuvent adopter différents modes nutritionnels en fonction de leur capacité à produire leur propre nourriture. Dans le développement récent de la culture des algues, celles-ci ne sont pas limitées au seul mode de culture photoautotrophe, dans lequel elles ne peuvent utiliser que le carbone inorganique (CO₂) et non le carbone organique pour améliorer leur croissance en utilisant la double voie de la photosynthèse et de la phosphorylation oxydative. Ainsi, une nouvelle stratégie de culture des microalgues pour les cultiver de manière mixotrophe est très importante pour éliminer les contraintes économiques et leur exploitation efficace afin d'obtenir une biomasse plus élevée (Ceron-Garcia et al., 2000).

8. 1. Photoautotrophes

La plupart des microalgues sont des organismes autotrophes, ce qui signifie qu'elles sont capables de produire leur propre nourriture par photosynthèse. Elles utilisent la lumière du soleil, le dioxyde de carbone (CO₂) et les nutriments pour produire des composés organiques tels que les glucides, les lipides et les protéines. Les microalgues sont largement et principalement connues comme étant des organismes photoautotrophes (Richmond et al., 2014).

8. 2. Hétérotrophe

Certains types de microalgues peuvent être hétérotrophes, ce qui signifie qu'ils dépendent de la consommation d'autres organismes ou de la matière organique déjà formée pour obtenir leur nutrition. Les microalgues hétérotrophes peuvent utiliser des sources de carbone organique telles que les sucres, les acides aminés ou les lipides pour leur métabolisme et leur croissance.

Les microalgues au métabolisme essentiellement hétérotrophe sont cultivées dans des bioréacteurs fermés appelés fermenteurs. Cette technique ne nécessite pas de lumière et la biomasse est alimentée par une source de carbone organique. Ainsi, les microalgues se développent dans un fermenteur biologique à cuve agitée où un degré élevé de carbone est obtenu (Safi et al., 2014).

8. 3. Mixotrophe

Certaines microalgues peuvent adopter un mode mixotrophe, ce qui signifie qu'elles sont capables à la fois de la photosynthèse autotrophe et de la nutrition hétérotrophe. Elles peuvent produire leur propre nourriture par photosynthèse lorsque les conditions sont favorables, mais elles peuvent également se nourrir de matière organique lorsqu'elle est disponible. La mixotrophie est une variante de l'hétérotrophie dans laquelle le CO₂ et d'autres

sources. Le COD peut être assimilé simultanément (Lee, 2000). Ces caractéristiques, associées au mode de culture mixotrophe, permettent de réduire considérablement les difficultés liées à la récolte de la biomasse, à l'allongement de la durée de conservation et à la viabilité industrielle limitée (Lee, 2001).

Il est important de noter que le mode nutritionnel des microalgues peut varier en fonction des conditions environnementales, telles que la disponibilité de la lumière, des nutriments et du CO₂.

9. Systèmes de culture des microalgues

Il existe plusieurs systèmes de culture des microalgues utilisés pour leur production à grande échelle. Les deux principales méthodes de production de biomasse micro algue sont les systèmes ouverts (bassins) et les photobioréacteurs (systèmes fermés).

9.1. système ouvertes

Les systèmes de culture en ouvert, tels que les étangs ou les bassins, sont utilisés pour la culture de microalgues à grande échelle. Dans ces systèmes, les microalgues sont cultivées à la surface de l'eau dans des étangs peu profonds ou des bassins, exposées à la lumière naturelle. Les conditions de croissance, telles que la température, la disponibilité des nutriments et le pH, peuvent varier en fonction des conditions environnementales. Les systèmes en ouvert sont souvent utilisés pour la production commerciale de microalgues, en raison de leur faible coût et de leur simplicité (Safi et al., 2014).

Les systèmes ouverts sont la méthode de production la plus courante et la moins coûteuse pour la production de biomasse à grande échelle. Ces systèmes se répartissent entre les eaux naturelles (lacs, lagunes et étangs), les eaux usées et les étangs ou réservoirs artificiels. Ils sont généralement construits à côté de centrales électriques ou d'industries lourdes qui rejettent massivement du dioxyde de carbone (Safi et al., 2014).

La culture ouverte nécessite des espèces robustes à la contamination. Elle est également peu contrôlée (maîtrise faible des paramètres physico-chimiques) et très dépendante des variations saisonnières et climatiques (production restreinte aux saisons propices) (Barsanti et Gualtieri, 2006).

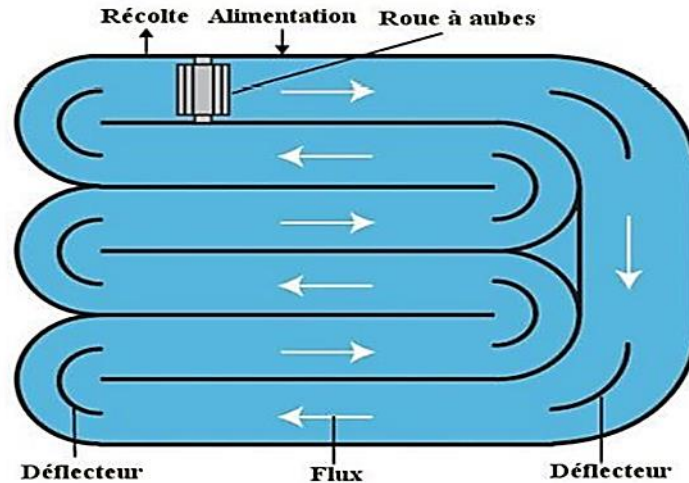


Figure 6 : Représentation schématique d'un système ouvert (Alcaine, 2010).



Figure 7 : Culture de *Dunaliella salina* en bassins naturels (Australie) (Lee, 2001).

La recherche continue de nouvelles souches potentielles pour la production à grande échelle de ces pigments progresse toujours, car les principales souches actuelles sont encore limitées à quelques espèces. Les principales souches actuelles se limitant à quelques espèces, la recherche de nouvelles souches potentielles pour la production à grande échelle de ces pigments continue de progresser, à savoir *Spirulina platensis*, *Haematococcus pluvialis* et *Chlorella* sp. (Balasubramaniam et al., 2021).

9.2. Systèmes fermés – les photobioréacteurs

Cette technologie a été mise en œuvre principalement pour surmonter certains acteurs limitants dans les systèmes ouverts, ce qui a permis d'accroître la biomasse dans un environnement contrôlé (pH, intensité lumineuse, température, etc.). En outre, ces systèmes

sont plus appropriés pour les souches sensibles qui ne peuvent pas rivaliser avec les autres souches. L'alimentation des biomasses en CO₂ se fait par le bullage des tubes (Safi et al., 2014).



Figure 8 : Installation de production d'algues en bioréacteur à tube fermé dans la province de Yunnan, en Chine (Balasubramaniam et al., 2021).

Les photobioréacteurs sont des systèmes fermés conçus spécifiquement pour la culture de microalgues. Ils sont généralement constitués de tubes ou de colonnes transparentes qui permettent la pénétration de la lumière et la captation maximale de l'énergie solaire. Les photobioréacteurs offrent un meilleur contrôle des conditions de culture, tels que l'intensité lumineuse, la température, la concentration de CO₂ et les nutriments. Cela permet d'optimiser la croissance des microalgues et de maximiser la production de biomasse. La conception des photobioréacteurs doit être optimisée pour chaque espèce de microalgues, par rapport à ses caractéristiques physiologiques et à ses caractéristiques de croissance (Sierra et al., 2008).

Il existe des géométries très variées de PBR. On peut cependant distinguer les grands types :

- les PBRs plats.
- les photobioréacteurs cylindriques.
- les photobioréacteurs « plastic bag ».
- un type particulier de réacteurs pour la culture de microalgues en l'absence de lumière : les fermenteurs (Sierra et al., 2008).

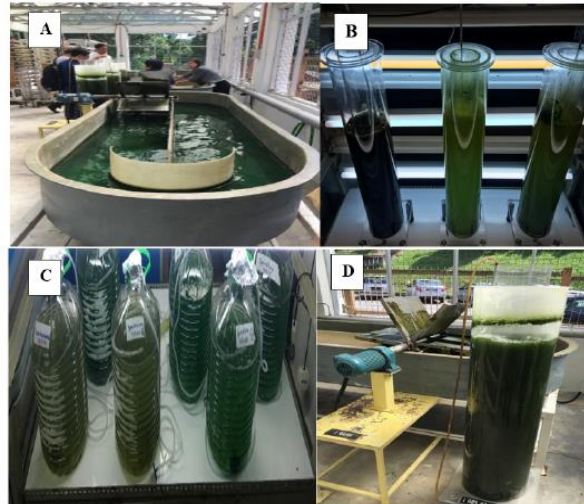


Figure 9 : Types de culture de microalgues à l'échelle du laboratoire. (A) photobioréacteur à couloir ; (B) photobioréacteur à colonne annulaire intérieure ; (C) culture de microalgues en bouteilles avec lumière et oxygène dans un laboratoire scientifique ; (D) photobioréacteur (Balasubramaniam et al., 2021).

Les principaux avantages et inconvénients des deux types sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 4: Comparaison des avantages et inconvénients des bassins de type raceway et des photobioréacteurs.

Paramètres \ Systèmes	Bassin de type « raceway »	Photobioréacteur
Risque de contamination	Fort, sauf pour les espèces extrémophiles	très faible si le procès est maîtrisé
Impacts des conditions extérieures	Important	Faible
Dimensions des réacteurs	Illimitée	Limitée
Concentration en biomasse	Faible	Elevée, jusqu'à 10 g. l ⁻¹
Rapport S/V	Faible (1 à 8)	Elevé (de 20 à 100)
Perte en CO ₂	Importantes	Maîtrisables
Concentration en O ₂	Faible	Elevée
Eclairage	Dépendance totale aux conditions climatiques	Possibilité d'éclairage en continu mais la source lumineuse est gourmande en énergie
Agitation	Nécessaire	Nécessaire
Coût	Elevé	Faible à modérée

Chapitre 2

1. Les applications des microalgues

Les microalgues ont de nombreuses applications dans différents domaines. Au vu de leur biodiversité et leurs propriétés biochimiques, les microalgues se révèlent très prometteuses pour de nombreuses applications dans des domaines variés tels que l'industrie pharmaceutique, agro-alimentaire, l'environnement et les énergies renouvelables (Grama et al., 2014c). Les principales utilisations sont détaillées comme suite :

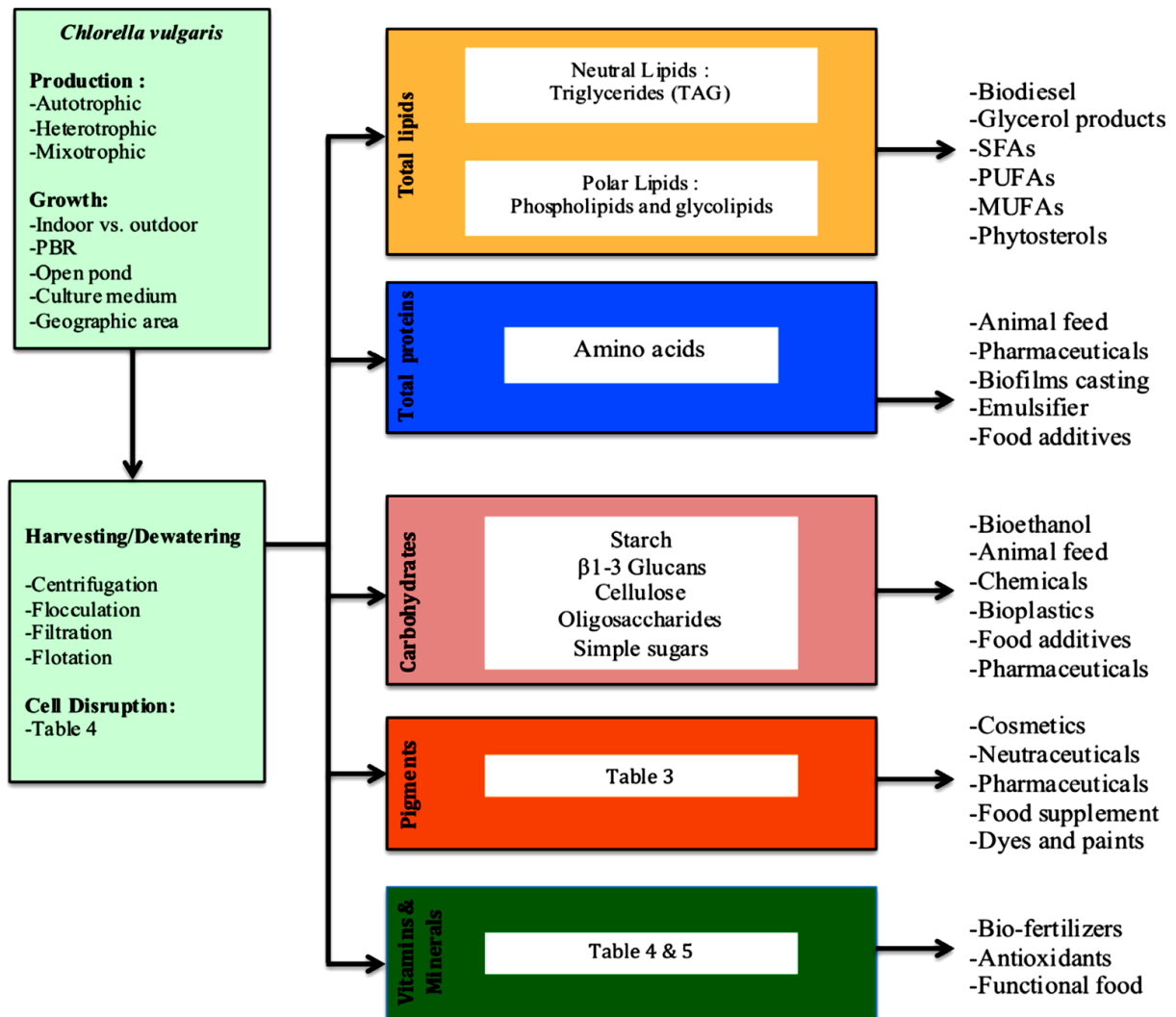


Figure 10 : Diversité du champ d'application des microalgues (Safi et al., 2014).

2. Domaine environnemental

Les principales applications des microalgues dans les secteurs environnementales s'intègre dans optique de dépollution pour transformer nos déchets en produits par exemple le traitement des eaux usées chargées en nitrates, phosphates, l'épuration d'effluents gazeux (Person et al., 2011).

2.1. Traitement des eaux usées

Les microalgues peuvent utiliser l'azote, le phosphore, le carbone et les produits chimiques tels que les métaux lourds contenus dans les eaux usées comme source de nutriments; c'est ce que l'on appelle la phycoremédiation (Venkatesan et al., 2015).

- **Dépollution de l'eau** : les microalgues peuvent être utilisées pour la dépollution des eaux usées, en particulier pour l'élimination des nutriments tels que les nitrates et les phosphates. Elles absorbent ces substances lors de leur croissance, contribuant ainsi à réduire la pollution de l'eau.
- **Bioremédiation** : les microalgues sont utilisées dans la bioremédiation pour décomposer les contaminants organiques et inorganiques présents dans l'eau, le sol ou l'air. Elles sont capables de dégrader certains polluants et de les transformer en composés non toxiques.
- **Restauration des écosystèmes** : les microalgues peuvent jouer un rôle clé dans la restauration des écosystèmes marins et d'eau douce. Elles peuvent être utilisées pour réintroduire des espèces végétales et animales indigènes, favoriser la régénération des habitats et améliorer la qualité de l'eau.
- **Surveillance de la qualité de l'eau** : les microalgues sont utilisées comme bioindicateurs pour évaluer la qualité de l'eau et la présence de substances toxiques. Leur réaction à différents paramètres environnementaux peut être utilisée pour surveiller et prévenir la pollution de l'eau.

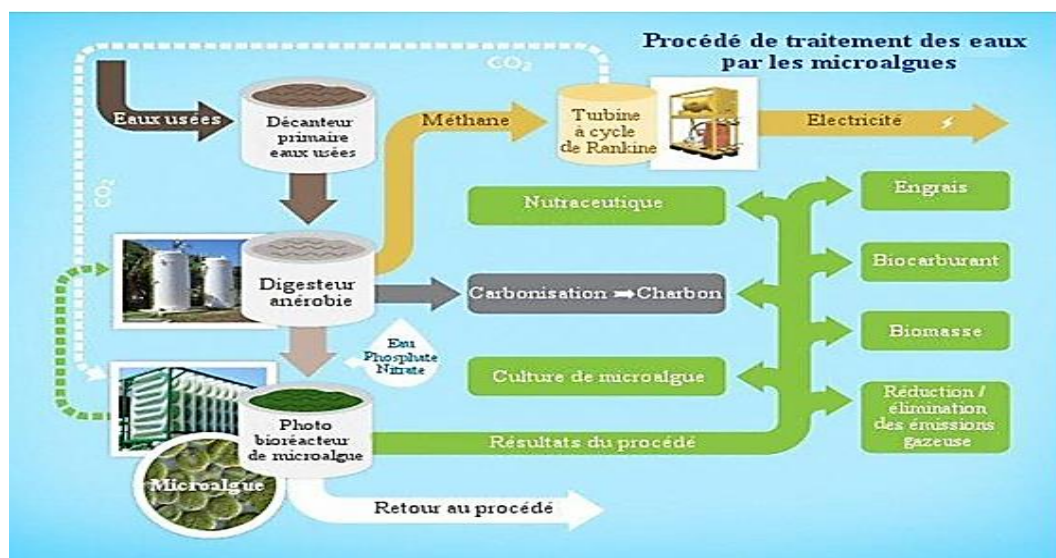


Figure 11 : Procédé de traitement des eaux par les microalgues (Filali, 2012).

Les microalgues sont très utilisées dans le traitement des eaux usées et en décontaminant les milieux pollués et lutter contre l'eutrophisation. Le traitement des eaux usées à base de microalgues repose sur leur action détoxifiante et dépolluante, grâce à leur capacité d'assimiler de nombreux nutriments et oligoéléments nécessaires à leur croissance elles peuvent éliminer certains éléments présents dans les eaux usées (Venkatesan et al., 2015).

Tableau 5 : Microalgues utilisées dans la remédiation des polluants présents dans les eaux usées (Balasubramaniam et al., 2021).

Pollutants	Microalgae Bioremediation
Nitrogen & Phosphorus	<i>Phormidium</i> sp., <i>Spirulina maxima</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Scenedesmus dimorphus</i> , <i>Scenedesmus quadricauda</i> , <i>Chlorella sorokiniana</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> ESP-6
Heavy Metals	<i>Chlorella</i> sp., <i>Tetradesmus</i> sp., <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Porphyridium</i> sp., <i>Chaetoceros</i> sp., <i>Oscillatoria</i> sp., <i>Sprogyra</i> sp., <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Anacytis</i> sp., <i>Chlamydomonas</i> sp., <i>Anabaena</i> sp., <i>Ceratium</i> sp., <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Calothrix</i> sp., <i>Arthrospira platensis</i>
Colorants	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Cosmarium</i> sp., <i>Nostoc linckia</i> , <i>Spirogyra</i> sp.
	Emerging Pollutants
Antibiotics	<i>Nannochloris</i> sp., Mixture of algae-bacteria consortia in pilot high rate algae pond (HRAP), Mixture of algae-bacteria consortia (dominated by <i>Coelastrum</i> sp.) in HRAP, Mixture of algae-bacteria consortia in 1-L HRAP <i>S. obliquus</i> , <i>C. vulgaris</i> ,
Phenol	<i>Chlorella</i> sp., <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Chlamydomonas mexicana</i> , <i>Chlorella sorokiniana</i> <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Chlorella pyrenoidosa</i>

Ces applications environnementales des microalgues démontrent leur potentiel pour contribuer à la protection de l'environnement, à la dépollution et à la restauration des écosystèmes (Balasubramaniam et al., 2021).

2.2. Agriculture

Les effets directs et indirects des bactéries et des champignons sur les plantes sont bien connus, mais ceux des algues sont un nouveau concept émergent. Les microalgues sont considérées comme accélérateur et protecteur de cultures en limitant la prolifération des épiphytes et des parasites et permettent l'adhésion des particules et le stockage de l'eau dans les sols ainsi que la fixation de l'azote (Metting, 1996). Les microalgues peuvent être utilisées de différentes manières en agriculture, notamment :

- **Fertilisants et amendements du sol :** Les biofertilisants sont des substances ou des produits naturels contenant des micro-organismes vivants qui améliorent les propriétés

chimiques et biologiques des sols, relancent la fertilité des sols et stimulent la croissance des plantes. Les microalgues contiennent des nutriments essentiels tels que l'azote, le phosphore, le potassium et des éléments-traces, qui peuvent être utilisés comme fertilisants pour améliorer la fertilité du sol. Elles peuvent également servir d'amendements organiques pour améliorer la structure du sol et sa capacité à retenir l'eau.

- **Bioactivateurs de croissance des plantes** : les extraits de microalgues peuvent être utilisés comme bioactivateurs de croissance des plantes. Ils contiennent des hormones végétales naturelles, des acides aminés, des vitamines et d'autres composés bénéfiques qui favorisent la germination des graines, la croissance des racines, la vigueur des plantes et la résistance aux stress environnementaux.
- **Biostimulants** : certains extraits de microalgues peuvent être utilisés comme biostimulants pour améliorer la croissance, la qualité et la productivité des cultures. Ils agissent en stimulant les processus métaboliques des plantes, en renforçant leur système immunitaire et en améliorant leur capacité à absorber les nutriments du sol (Metting, 1996).
- **Biofertilisants** à base de microalgues : Les microalgues peuvent être transformées en biofertilisants liquides ou en poudres riches en nutriments pour nourrir les plantes de manière naturelle et durable. Ces biofertilisants fournissent aux plantes une gamme complète de nutriments essentiels, ainsi que des acides aminés, des enzymes et des facteurs de croissance
- **Biopesticides** : certaines espèces de microalgues produisent des métabolites naturels qui peuvent être utilisés comme biopesticides pour lutter contre les ravageurs et les maladies des plantes. Ces biopesticides sont souvent plus respectueux de l'environnement que les pesticides chimiques conventionnels (Lee and Ryu, 2021).
- **Aquaponie** : les microalgues peuvent être cultivées en combinaison avec l'élevage de poissons dans les systèmes d'aquaponie. Les nutriments produits par les poissons sont utilisés par les microalgues pour leur croissance, tandis que les microalgues filtrent l'eau et fournissent de l'oxygène aux poissons (Metting, 1996).

Toutefois, selon un récent changement de paradigme, les algues sont considérées comme des organismes omniprésents, présents dans les tissus végétaux et dans le sol. Des preuves de plus en plus nombreuses suggèrent que les algues font partie du microbiome des

plantes. De nouveaux résultats indiquent que les plantes réagissent aux algues et activent les voies de signalisation en aval correspondantes abiotiques (Lee and Ryu, 2021).

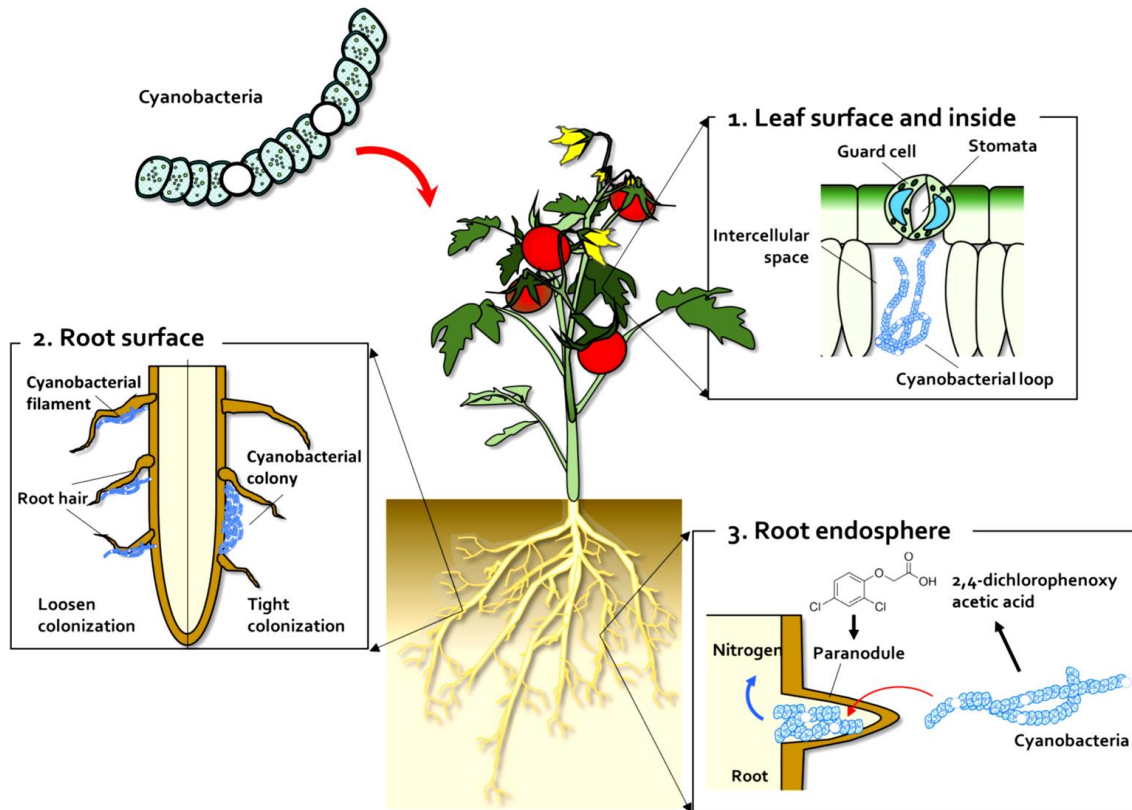


Figure 12 : Colonisation des feuilles et des racines par les cyanobactéries. (1) Les cyanobactéries pénètrent dans le tissu foliaire par les stomates et colonisent l'espace intercellulaire, formant une boucle cyanobactérienne. (2) À la surface des racines, les cyanobactéries présentent deux types de modèles. (3) Co-inoculation avec de l'acide 2,4-dichlorophénoxy acétique (2,4-D) (auxine synthétique) et de *Nostoc* spp. augmente la formation de para-nodules et la fixation de l'azote (Lee and Ryu, 2021).

L'utilisation des microalgues en agriculture offre de nombreux avantages, tels que la réduction de l'utilisation de produits chimiques, l'amélioration de la fertilité du sol, la stimulation de la croissance des plantes et la promotion de pratiques agricoles durables. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les techniques de culture et déterminer les doses et les modes d'application les plus appropriés. Bien que des preuves de plus en plus nombreuses suggèrent que les composés sécrétés et les composants des parois cellulaires des algues induisent des changements physiologiques et structurels dans les plantes qui les protègent contre les stress biotiques et abiotiques (Lee and Ryu, 2021).

Tableau 6 : Espèces de microalgues et leur utilisation comme biofertilisant et biostimulant pour les plantes (Balasubramaniam et al., 2021).

Microalgae	Crops
<i>Acutodesmus dimorphus</i>	Tomato
<i>Spirulina platensis</i> , <i>Chlorella vulgaris</i>	Maize
<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Hibiscus esculentus</i>
<i>Chlorella vulgaris</i> (UTEX 2714), <i>Scenedesmus dimorphus</i> (UTEX 1237)	Rice
<i>Spirulina platensis</i> , <i>Chlorella vulgaris</i>	Onion
<i>Chlorella vulgaris</i>	Tomato and Cucumber seeds
<i>Scenedesmus</i> sp.	Rice
<i>Anabaena azolla</i>	Rice
<i>Nostoc muscorum</i>	Maize
<i>Nostoc rivulare</i>	

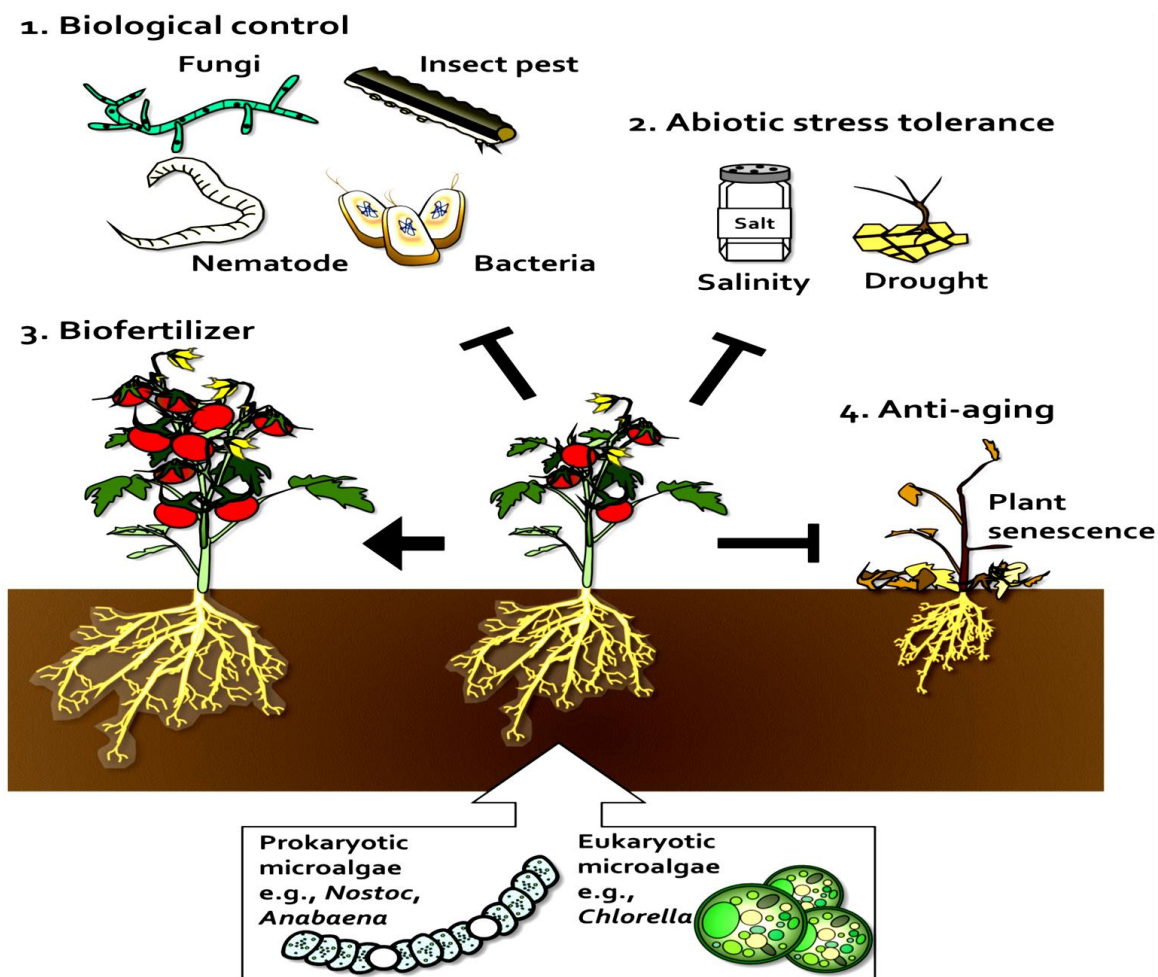


Figure 13 : Effets bénéfiques des algues sur les plantes. Dans les plantes, les microalgues procaryotes telles que *Nostoc* et *Anabaena*, et les microalgues eucaryotes telles que *Chlorella*, agissent comme agents de contrôle biologique (Lee and Ryu, 2021).

Collectivement, ces rapports suggèrent que les substances algales peuvent inhiber directement les bactéries phytopathogènes, les champignons, les parasites et les nématodes. Cependant, la plupart de ces composés algaux ne présentent une activité antagoniste contre les phytopathogènes qu'*in vitro*. Il est donc important de vérifier l'activité des composés algaux purifiés *in planta*. (Lee and Ryu, 2021).

La modification de la rhizosphère à l'aide de microalgues, y compris des cyanobactéries et des microalgues eucaryotes, est un potentiel de concevoir et de modifier la structure et l'efficacité du microbiome de la rhizosphère, améliorant ainsi la santé des plantes (Lee and Ryu, 2021).

2.3. Séquestration du CO₂

Les microalgues ont la capacité de capturer le CO₂ atmosphérique par la photosynthèse. Elles utilisent le CO₂ comme source de carbone pour leur croissance et produisent de l'oxygène en retour. Cette propriété est utilisée dans les systèmes de captage et de séquestration du carbone pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (Safi et al., 2014).

Les microalgues jouent un rôle important dans la séquestration du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique. Elles sont capables de capturer le CO₂ par le biais de la photosynthèse, un processus par lequel elles utilisent la lumière du soleil pour convertir le CO₂ en biomasse et en oxygène. Ce processus permet de retirer le CO₂ de l'atmosphère, ce qui contribue à réduire l'effet de serre et les émissions de gaz à effet de serre. La microalgue capte la lumière du soleil et réalise la photosynthèse en produisant environ la moitié de l'oxygène atmosphérique sur la terre et le sol. C'est pourquoi leur culture à proximité des centrales à combustion est d'une importance capitale pour leur développement et aussi elle a une grande importance en raison de leur remarquable capacité à absorber le dioxyde de carbone qu'ils transforment en biocarburant potentiel, en denrées alimentaires, en aliments pour animaux et en composants de valeur à forte valeur ajoutée (Safi et al., 2014).

Pour favoriser la séquestration du CO₂ par les microalgues, différentes approches sont utilisées. Cela peut inclure la culture en masse des microalgues dans des photobioréacteurs, des étangs ou des bassins ouverts, où elles sont exposées à la lumière du soleil pour maximiser leur photosynthèse et leur capacité de fixation du CO₂. Le CO₂ peut également être fourni directement aux cultures de microalgues, par exemple en utilisant des fumées industrielles riches en CO₂ (Wang et al., 2008).

Une fois le CO₂ capturé par les microalgues, différentes options peuvent être envisagées pour son utilisation ultérieure. Cela peut inclure la production de biocarburants à partir de la biomasse algale, tels que le biodiesel ou le bioéthanol. Le résidu solide après extraction des lipides peut également être utilisé comme source de nutriments pour l'alimentation animale ou l'agriculture (Wang et al., 2008).

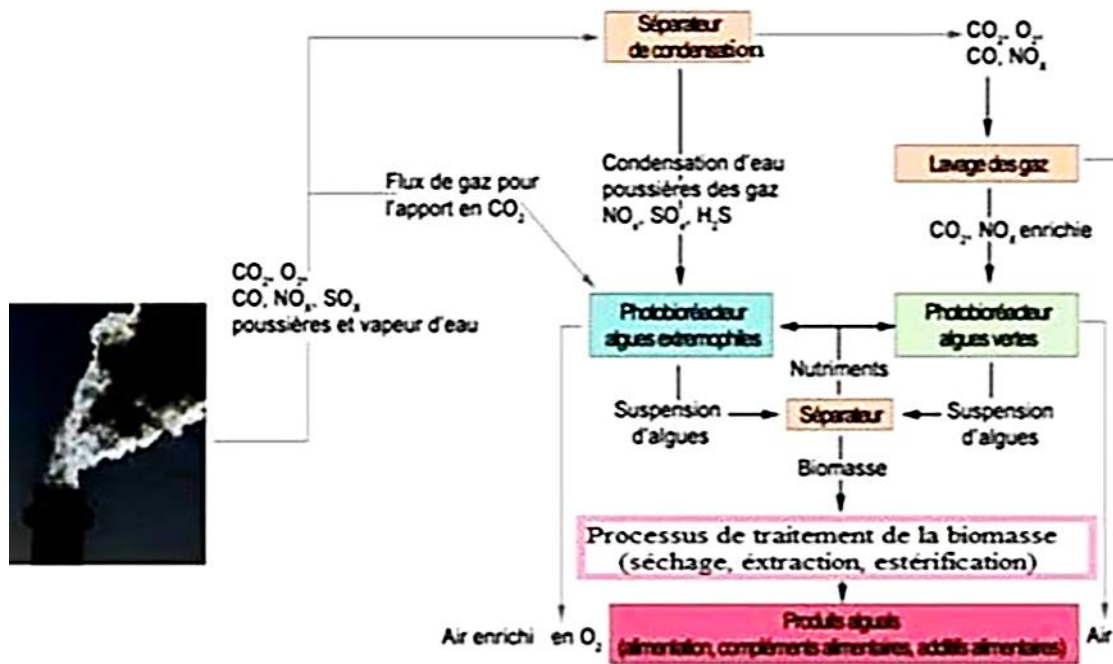


Figure 14 : Schéma du procédé de fixation de CO₂ par les microalgues à partir de gaz industriel (Pulz et al., 2004).

2.4. Domaine énergétique

Les microalgues ont un potentiel prometteur dans le domaine énergétique en raison de leur capacité à produire et stocker des composés riches en énergie. La production d'énergie est devenue la priorité de la population mondiale en raison de la demande de carburant pour les transports, la production d'électricité et le fonctionnement des industries manufacturières. Il existe deux groupes de sources d'énergie : les sources non renouvelables (fossiles) et les sources renouvelables (Balasubramaniam et al., 2021). La valorisation de la biomasse algale pourrait conduire à la production de bioénergie électricité et/ou chaleur générée par combustion directe, ou sous forme de biométhane après méthanisation ou sous forme de biocarburant ou d'hydrogène et également elle représente une source importante de métabolites à hautes valeurs ajoutées (Bouzidi et al., 2022).

2.4.1. Biométhane

Le biométhane est un gaz naturel renouvelable produit à partir de matières organiques, telles que les déchets agricoles, les déchets alimentaires et les microalgues. Les microalgues peuvent être utilisées comme matière première pour la production de biométhane grâce à un processus appelé digestion anaérobie. Les microalgues peuvent également produire différentes formes d'énergie, biométhane. après fermentation dans des digesteurs de biogaz, le biogaz qu'ils produisent est constitué à 70% le méthane (Céline D., 2013). La production de biométhane à partir des microalgues présente des avantages potentiels, tels que la valorisation des déchets organiques, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la production d'un carburant renouvelable.

2.4.2. Bioéthanol

Le bioéthanol est un biocarburant liquide produit à partir de matières premières renouvelables, telles que les plantes riches en sucre ou en amidon. Les microalgues peuvent également être utilisées comme matière première pour la production de bioéthanol. Les méthodes de prétraitement chimique et enzymatique sont généralement utilisées pour la production de bioéthanol. Les acides forts couramment utilisés sont l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique et l'acide nitrique, tandis que des enzymes telles que les amylases, les cellulases et les invertases sont utilisées (Balasubramaniam et al., 2021). Le bioéthanol présente des avantages environnementaux par rapport aux carburants fossiles, car il contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la dépendance aux combustibles fossiles. De plus, les microalgues ont un potentiel de production élevé de bioéthanol par unité de surface, ce qui en fait une matière première intéressante pour la production de biocarburant (Balasubramaniam et al., 2021).

Tableau 7 : Production de bioéthanol à partir de diverses espèces de microalgues (Balasubramaniam et al., 2021).

Microalgae	Ethanol Yield (g Ethanol/g Substrate)
<i>Chlorococcum infusionum</i>	0.26
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	0.24
<i>Chlorococcum humicola</i>	0.52
<i>Scenedesmus abundans</i> PKU AC 12	0.103
<i>Chlorella vulgaris</i> FSP-E	11.66 (87.59%)
<i>Scenedesmus obliquus</i> CNW-N	8.55 (99.8%)
<i>Desmodesmus</i> sp. FG	0.24
strain SP2-3 (unidentified green microalga)	0.24
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	0.12

2.4.3. biohydrogène

Les microalgues vertes et les cyanobactéries peuvent produire de l'hydrogène par biophotolyse. Le biohydrogène est un gaz combustible produit à partir de sources renouvelables, telles que les microalgues, par un processus appelé "production biologique d'hydrogène". Les microalgues peuvent être utilisées comme matière première pour la production de biohydrogène en raison de leur capacité à effectuer la photosynthèse et à produire de l'hydrogène par le biais de processus biologiques (Melis and Happe, 2001).

Le biohydrogène présente des avantages environnementaux par rapport aux combustibles fossiles, car sa combustion ne produit que de l'eau et aucune émission de gaz à effet de serre. De plus, les microalgues sont une source prometteuse de biohydrogène en raison de leur capacité à produire de grandes quantités de biomasse et de leur efficacité photosynthétique élevée. Cependant, la production de biohydrogène à partir des microalgues nécessite encore des recherches approfondies pour optimiser les processus de culture, de fermentation et de purification, ainsi que pour améliorer les rendements et les coûts de production. Il existe plusieurs microalgues vertes et cyanobactéries telles que *Tetraspora* sp. CU2551, *R. rubrum*, *R. spheroides*, *Rhodobacter capsulatus*, *C. vulgaris*, *C. reinhardtii*, *Anabaena* sp. et *Nostoc* sp. qui ont été largement étudiées pour la production d'hydrogène (Balasubramaniam et al., 2021).

2.4.4. biodiesel

Le biodiesel est un carburant renouvelable produit à partir de matières premières telles que les huiles végétales, les graisses animales et même les microalgues. Les microalgues sont de plus en plus étudiées comme une source potentielle de matière première pour la production de biodiesel en raison de leur capacité à accumuler des lipides riches en huile (Grama et al., 2014c).

Nous avons vu que, élevées dans des conditions dites de « stress », certaines espèces les microalgues peuvent accumuler des niveaux élevés de lipides, plus précisément triglycérides. Ces derniers réagissent par transestérification avec les alcools, ce qui donne esters pour moteurs à combustion interne (Céline, 2013). Les biocarburants à base d'algues ont le potentiel de répondre à la demande mondiale car ils n'entrent pas en concurrence avec la production de produits alimentaires (Balasubramaniam et al., 2021). Il est important de noter que la production de biodiesel à partir de microalgues est encore en développement et fait l'objet de recherches intensives pour améliorer l'efficacité et la rentabilité du processus.

Conclusion

3. Conclusion

La diversité biologique des microalgues fournit une gamme exceptionnelle d'adaptabilité et représente un vaste potentiel en tant que source d'alimentation humaine et animale, biomatériaux, molécules originales en biotechnologie. L'augmentation spectaculaire de la population mondiale, les préoccupations concernant l'équilibre écologique, la pollution, la demande mondiale d'énergie à défaut de pétrole et de charbon ont tous conduit à s'orienter vers une attitude plus «bio», ce qui signifie une augmentation générale de l'attention portée aux ressources renouvelables (Metting, 1996). Des études montrent que les applications majeures des microalgues dans les filières environnementales intègrent une perspective de décontamination pour transformer nos déchets en produits. Les microalgues sont largement utilisées dans le traitement des eaux usées et dans la désinfection des milieux pollués grâce à leur surface cellulaire spécifique et étendue et leur capacité à abaisser les niveaux de phosphore et de nitrate. Les microalgues présentent également des avantages agricoles tels que l'amélioration de la composition minérale du sol et des engrais, et ont également la capacité de capturer les métaux lourds et de réduire l'accumulation de dioxyde de carbone, car les microalgues produisent de l'énergie tout en consommant du dioxyde de carbone et créent ainsi des avantages environnementaux.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Balasubramaniam, V., Gunasegavan, R. D. N., Mustar, S., Lee, J. C., & Mohd Noh, M. F. (2021). Isolation of industrial important bioactive compounds from microalgae. *Molecules*, 26(4), 943.
- Barsanti, L., paolo Gualtieri, 2014. *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*, Second Edition.
- Becker, E. W. (1994). *Microalgae: biotechnology and microbiology* (Vol. 10). Cambridge University Press.
- Bouzidi, N. E., Grama, S. B., Khelef, A. E., Yang, D., & Li, J. (2022). Inhibition of antioxidant enzyme activities enhances carotenogenesis in microalga *Dactylococcus dissociatus* MT1. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10.
- Cerón Garcí, M. C., Fernández Sevilla, J. M., Acien Fernandez, F. G., Molina Grima, E., & García Camacho, F. (2000). Mixotrophic growth of *Phaeodactylum tricornutum* on glycerol: growth rate and fatty acid profile. *Journal of Applied Phycology*, 12, 239-248.
- Grama, B. S., Chader, S., Khelifi, D., Agathos, S. N., & Jeffryes, C. (2014). Induction of canthaxanthin production in a *Dactylococcus* microalga isolated from the Algerian Sahara. *Bioresource technology*, 151, 297-305.
- Grama, B. S., Chader, S., Khelifi, D., Stenuit, B., Jeffryes, C., & Agathos, S. N. (2014). Characterization of fatty acid and carotenoid production in an *Acutodesmus* microalga isolated from the Algerian Sahara. *biomass and bioenergy*, 69, 265-275.
- Grama, B. S., Delhaye, A., Chader, S., Khelifi, D., Agathos, S. N., & Jeffryes, C. (2014). Canthaxanthin, astaxanthin and adonixanthin production from a *Dactylococcus* microalga in a new flat plate airlift photobioreactor. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 79, 65.
- Grama, B. S., Delhaye, A., Agathos, S. N., & Jeffryes, C. (2016). β -Carotene and Other Carotenoids and Pigments from Microalgae. *Industrial Biotechnology of Vitamins, Biopigments, and Antioxidants*, 265-286.
- Jeffryes, C., Severi, V., Delhaye, A., Urbain, B., Grama, B. S., & Agathos, S. N. (2016). Energy conversion in an internally illuminated annular-plate airlift photobioreactor. *Engineering in Life Sciences*, 16(4), 348-354.
- Pulz, O., Gross, W., 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 65, 635–648. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1647-x>
- Richmond, A., 2004. *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*.
- Lavens, P., & Sorgeloos, P. (1996). *Manual on the production and use of live food for aquaculture* (No. 361). Food and Agriculture Organization (FAO).
- Lee, S. M., & Ryu, C. M. (2021). Algae as new kids in the beneficial plant microbiome. *Frontiers in Plant Science*, 12, 599742.

- Levasseur, W., Perré, P., & Pozzobon, V. (2020). A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification. *Biotechnology advances*, *41*, 107545.
- Lee, Y. K. (2001). Microalgal mass culture systems and methods: their limitation and potential. *Journal of applied phycology*, *13*, 307-315.
- Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P. Y., & Vaca-Garcia, C. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *35*, 265-278.
- Metting, F. B. (1996). Biodiversity and application of microalgae. *Journal of industrial microbiology*, *17*, 477-489.
- Melis, A., & Happe, T. (2001). Hydrogen production. Green algae as a source of energy. *Plant physiology*, *127*(3), 740-748.
- Richmond, A. (Ed.). (2008). Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. John Wiley & Sons.
- Sierra, E., Acien, F. G., Fernández, J. M., García, J. L., González, C., & Molina, E. (2008). Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, *138*(1-3), 136-147.
- Venkatesan, J., Manivasagan, P., & Kim, S. K. (2015). Marine microalgae biotechnology: present trends and future advances. In *Handbook of marine microalgae* (pp. 1-9). Academic Press.
- Wang, B., Li, Y., Wu, N., & Lan, C. Q. (2008). CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, *79*, 707-718.