



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem**  
**Faculté Des Sciences de La Nature et de La Vie**  
**Département de Biotechnologie**



**UNIVERSITÉ**  
**Abdelhamid Ibn Badis**  
**MOSTAGANEM**

# Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

## MASTER EN BIOTECHNOLOGIE

**Spécialité : Biotechnologie et valorisation des plantes**

Par :

**ADDA NAWEL**

Thème :

### Extraction de la vitamine C et des huiles essentiels de la Spiruline

Soutenu le ..... devant le jury composé de :

<b>Président</b>	<b>Dr. Bekada Djamel Eddine</b>	<b>MCA</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Encadrante</b>	<b>Dr. Kies Fatima</b>	<b>MCA</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Examinatrice</b>	<b>Dr. Chikh Djaoutsi Djamilia</b>	<b>MCB</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Co-encadreur</b>	/	/	/

**Année Universitaire : 2024/2025**

## REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, la force, le courage, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail, ainsi que les moyens pour le mener à bien.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dr. Kies Fatima pour sa patience, son écoute attentive et ses conseils éclairés. Son accompagnement bienveillant a été un pilier essentiel dans la réalisation de ce mémoire, m'apportant un enrichissement tant sur le plan académique que personnel.

Mes sincères remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Je remercie tout particulièrement Dr. Bekada Djamel Eddine, président du jury, ainsi que Dr. Chikck Djaoutsi Djamila, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour leurs remarques constructives qui ont contribué à l'enrichir.

Je n'oublie pas de remercier chaleureusement Mme Fadhila, Mme Fatima et Mme Karima, techniciennes des laboratoires pédagogiques de la faculté, pour leur disponibilité et leur aide précieuse lors des analyses expérimentales.

## Dédicaces

Il est difficile de trouvé les mots justes pour exprimer toute la gratitude que je ressens aujourd'hui .ce travail est est l'aboutissement d'un parcours jalonné de doutes ,d'efforts , mais surtout de belle rencontres et de soutiens inestimables .

A mon chere père , que dieu pitié de toi. Mon modele,mon piliet,mon repère. Il est difficile de trouver les mots justes pour exprimer tout ce que tu representes pour moi,et à quel point ton absence m'a manqué . Depuis ton départ, chaque jour est un defi ,mais c'est ton image ,ton courage ,ta sagesse et ton amour qui me donnent la force d'avancer. Je te didie ce projet avec une immense émotion ,tu n'es plus la physiquement mais ton esprit m'accompagne sans chaque étape de ma vie.

J'espère de tout cœur que ,la ou tu es ,tu peux voir ce que je suis devenue , et que tu es fière de moi. Repose en paix papa,Tu me manques chaque jour.

A ma chere maman, et ma chère sœur salima,vous qui avez toujours cru en moi,meme lorsque la fatigue prenait le sessus, merci pour votre amour inconditionnel ,vos encouragements silencieux et vos sacrifices que je mesures un peu polus chaque jour. Votre presence a été ma plus grand force. Merci de m'avoir toujours soutenu durant les bons moments et les plus difficiles .

A mes proches de mon cœurs, A ma famille, A tous mes collègues et mes amies, Les mots manquent pour vous exprimer mes remerciements et ma gratitude .

## Résumé

*Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation biotechnologique de la spiruline marine (*Arthrospira platensis*), une microalgue reconnue pour sa richesse en composés bioactifs. L'objectif principal de l'étude est l'extraction et l'analyse de la vitamine C (acide ascorbique) et des huiles essentiels à partir d'échantillons locaux de spiruline, récoltés à Biskra, en Algérie.*

*Trois méthodes d'extraction hydrosoluble (macération, décoction, infusion) ont été comparées. Les résultats ont montré que la macération aqueuse sur 10 g de spiruline a permis d'obtenir la concentration la plus élevée en vitamine C, estimée à environ 24,6  $\mu\text{mol/g}$  selon les données spectrophotométriques à 520 nm. Les profils spectraux ont confirmé une absorbance maximale caractéristique de l'acide ascorbique dans l'intervalle 260–270 nm.*

*Concernant les composés lipidiques, l'extraction Soxhlet avec solvant méthanolique a permis d'isoler des fractions huileuses riches en acides gras insaturés et présentant une activité antioxydante potentielle. Ces huiles essentiels ont révélé une composition prometteuse en composés volatils, ouvrant la voie à des applications nutraceutiques et cosmétiques.*

*Cette recherche souligne non seulement la variabilité des rendements d'extraction selon la méthode employée, mais met également en évidence le potentiel industriel inexploité de la spiruline algérienne, notamment dans des domaines stratégiques liés à la santé, à l'alimentation fonctionnelle et à la durabilité environnementale.*

### **Mots-clés**

*Arthrospira platensis, Vitamine C (acide ascorbique), huiles essentiels, Ressources naturelles algériennes, Biotechnologie marine.*

## Abstract

*This study is part of a marine biotechnological valorization approach focused on Spirulina (Arthrospira platensis), a microalga well known for its richness in bioactive compounds. The main objective was the extraction and analysis of vitamin C (ascorbic acid) and essential oils from locally harvested spirulina samples in Biskra, Algeria.*

*Three aqueous extraction methods—maceration, decoction, and infusion—were compared. The aqueous maceration of 10 g of spirulina yielded the highest vitamin C concentration, estimated at approximately 24.6  $\mu\text{mol/g}$ , based on UV-visible spectrophotometric analysis at 520 nm. The spectral profiles confirmed maximum absorbance peaks characteristic of ascorbic acid in the 260–270 nm range.*

*For lipid components, extraction via Soxhlet apparatus using methanolic solvent enabled the isolation of essential oil fractions rich in unsaturated fatty acids and exhibiting potential antioxidant activity. The volatile profile of these oils supports their potential application in the nutraceutical and cosmetic industries.*

*The findings not only reveal variation in extraction yields depending on the method used, but also highlight the underexploited industrial potential of Algerian spirulina, especially in strategic fields like functional nutrition, health, and sustainable development.*

### *Key-words*

*Arthrospira platensis, Vitamin C (ascorbic acid), Essential oils, Algerian natural resources, Marine biotechnology.*

# Sommaire

<b>Partie I. bibliographique</b>	<b>1</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I. Spiruline</b>	<b>2</b>
1. Généralités et présentation de la Spiruline	2
2. Cycle biologique de la spiruline ( <i>Arthrospira platensis</i> )	4
3. Diversité morphologique, génétique, et écologique d' <i>Arthrospira platensis</i>	7
4. Habitat de la spiruline ( <i>Arthrospira</i> )	10
5. Valeur nutritionnelle d' <i>Arthrospira platensis</i>	12
6. Potentiel biotechnologique de l' <i>Arthrospira platensis</i>	16
7. Aspects biotechnologiques et valorisation de l' <i>Arthrospira platensis</i>	18
<b>Chapitre II. Vitamine C (acide ascorbique) et huiles essentiels</b>	<b>21</b>
<b>1. Vitamine C</b>	<b>21</b>
1.1 Définition approfondie de la vitamine C	21
1.2 Effets biologiques, thérapeutiques et analytiques de la vitamine C (acide ascorbique)	22
1.3 Méthodes d'analyse de l'acide L-ascorbique (méthodes chimiques	24
	26
1.4. Extraction de la vitamine C à partir de la spiruline	
1.5. Rôles métaboliques et fonctions biochimiques majeures de l'acide ascorbique	26
<b>2. Huiles essentiels</b>	<b>28</b>
2.1. Définition des huiles essentiels	28
2.2. Fonctions physiologiques et écologiques des huiles essentiels dans les plantes	29
2.3. Modes d'utilisation des huiles essentiels	30

<b>2.4. Domaines d'application des huiles essentiels</b>	<b>32</b>
<b>2.5. Techniques d'extraction des huiles lipidiques d'algues</b>	<b>33</b>
<b>2.6. Rendement d'extraction des lipides et des composés volatils chez la spiruline</b>	<b>35</b>
<b>Partie II. PARTIE expérimentale</b>	<b>41</b>
<b>Chapitre III. Matériel et Méthodes</b>	<b>41</b>
<b>1. Matériel biologique : Spiruline (<i>Arthrospira platensis</i>)</b>	<b>41</b>
<b>1.1. Méthodes d'extractions</b>	<b>43</b>
<b>2. Analyse de la vitamine C</b>	<b>45</b>
<b>2.1 Méthode de dosage de l'acide ascorbique</b>	<b>45</b>
<b>2.2 Dosage spectrophotométrique:</b>	<b>46</b>
<b>3. Extraction des huiles essentiels</b>	<b>52</b>
<b>3.1. Extraction des huiles essentiels de la spiruline par Soxhlet avec n-hexane</b>	<b>52</b>
<b>Chapitre IV. Résultats et discussions</b>	<b>55</b>
<b>1. Décoction de 10 g de spiruline</b>	<b>55</b>
<b>1.1. Analyse critique des longueurs d'onde sélectionnées</b>	<b>55</b>
<b>1.2. Interprétation et comparaison avec la littérature</b>	<b>57</b>
<b>2. Macération de 10 g de spiruline</b>	<b>57</b>
<b>3. Décoction, macération, et infusion de 1 g de spiruline</b>	<b>59</b>
<b>4. Extraction eau /méthanol</b>	<b>61</b>
<b>4.1. Contexte méthodologiques</b>	<b>61</b>
<b>4.2. Analyses des pics</b>	<b>61</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>66</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>67</b>

## *Listes des figures*

Figure 1: Frise chronologique (Mollo & Noury, 2013 modifiée) .....	4
Figure 2: Cycle biologique de la spiruline (Balloni et al. 1980 in Charpy, 2008) .....	6
Figure 3: Cycle biologique de la spiruline modifié (Charpy et al, 2008). .....	7
Figure 4: Zones naturelles de croissance de la spiruline dans le monde (Fox, 1999 modifiée) .....	8
Figure 5: Composition chimique de la spiruline (Lecointre, 2017 modifiée) .....	13
Figure 6: Panorama des biotechnologies modernes et de leurs applications .....	17
Figure 7: Structure chimique de la vitamine C (Acide ascorbique) <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Vitamine_C">https://fr.wikipedia.org/wiki/Vitamine_C</a> (C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>6</sub> ) .....	22
Figure 8: Activité biochimique de l'acide ascorbique en tant que cofacteur métabolique (Design réalisé par Dr. KIES F.) .....	27
Figure 9: Mécanismes redox de la vitamine C : neutralisation des radicaux libres et régénération de la vitamine E (Design réalisé par Dr. KIES F.) .....	28
Figure 10: Dispositif et matériel utilise pour l'extraction des lipides Soxhlet (Figure réalisée par l'encadrante Dr. KIES F à partir d'un protocole standardisé adapté à l'étude). .....	35
Figure 11: Échantillon de la spiruline AL kiram (photo prise par Adda Nawel) .....	41
Figure 12: Carte de localisation de la ferme aquacole Al Kiram (Loutayah, Biskra, Algérie) .....	42
Figure 13: Illustration du Protocole d extraction de composés hydrosolubles et methanolosolubles a partir de 1g de spiruline (Designed by Kies, F) .....	43
Figure 14: Spectrophotomètre UV-visible utilisé dans l'analyse (source : laboratoire interne) .....	46
Figure 15: Une série de solutions étalons d'acide ascorbique .....	46
Figure 16: Comparaison des extraits spiruliniques par titrage iodométrique .....	52
Figure 17: Montage de l'extracteur Soxhlet .....	53
Figure 18: Étapes expérimentales de l'extraction au Soxhlet .....	54
Figure 19: Profil spectral UV de l'extrait aqueux de spiruline (décoction, 10 g) .....	55
Figure 20: Profil spectral UV de l'extrait aqueux de spiruline (macération, 10 g) .....	58
Figure 21: Spectres d'absorbance des extraits spiruliniques selon trois méthodes d'extraction (décoction, macération, infusion) .....	61
Figure 22: Extraction eau /méthanol .....	65

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1: Morphotypes d'Arthrospira platensis et origines géographiques associées .....</b>	<b>7</b>
<b>Tableau 2: Teneurs approximatives en vitamines de la spiruline (Lecointre, 2017) .....</b>	<b>15</b>
<b>Tableau 3: Propriétés physiques et chimiques de la vitamine C (acide ascorbique) .....</b>	<b>22</b>
<b>Tableau 4: Méthodes d'extraction de la vitamine C à partir de la spiruline .....</b>	<b>26</b>
<b>Tableau 5: Matériel de laboratoire utilisé .....</b>	<b>42</b>

## *Liste des abréviations*

ADN : Acide désoxyribonucléique

ARDA: (Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis)

µm : Micromètre

CIN : Le Code international de nomenclature

ONG : Organisations non gouvernementales

OMS : organisation mondiale de la santé

pH : potentiel hydrogène

CO<sub>2</sub> : Le dioxyde de carbone

FAO : The Food and Agriculture Organization

AGPI : Acides gras polyinsaturés

AGS : Acides gras saturés

AGMI : Acides gras monoinsaturés

AGL : acide gamma-linolénique

ALA : l'Acide α-linolénique

SDA : Acide stéaridonique

EPA : Acide eicosapentaénoïque

DHA : Acide docosahexaénoïque

AA : Acide arachidonique

SOD : superoxyde dismutase

OCDE : l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques

mg : Milligramme

g : gramme

DCPIP : 2,6-dichlorophénolindophénol

µmol : Micromole

ERO : espèces réactives de l'oxygène

HE :huile essentiel

GC : Chromatographie en phase gazeuse

MS : spectrométrie de masse.

# **PARTIE I. BIBLIOGRAPHIQUE**

## **Introduction générale**

La spiruline, micro-algue marine à haute valeur nutritionnelle, suscite un intérêt croissant dans les domaines de la biotechnologie et de la valorisation des ressources naturelles. Sa richesse en protéines, vitamines, antioxydants et composés bioactifs en fait un ingrédient de choix pour les industries agroalimentaire, pharmaceutique et cosmétique. Parmi ces composés, la vitamine C et les huiles essentiels se distinguent par leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et conservatrices.

À l'échelle mondiale, la spiruline est cultivée de manière intensive, notamment en Asie, en Amérique latine et en Europe. En Algérie, sa production reste artisanale et localisée, malgré un fort potentiel écologique, notamment dans des régions comme Tamanrasset. Ce retard se manifeste particulièrement dans l'exploitation scientifique et industrielle de ses composés bioactifs.

**Problématique:** Malgré l'abondance de recherches sur la composition générale de la spiruline, les études portant sur l'extraction optimisée et l'analyse détaillée de composés spécifiques comme la vitamine C et les huiles essentiels demeurent limitées, surtout pour les souches marines. Cette lacune freine son plein potentiel biotechnologique, notamment en Algérie.

**Objectifs:** Ce travail vise à valoriser la spiruline marine à travers l'extraction et l'analyse qualitative et quantitative de la vitamine C et des huiles essentiels. Les objectifs sont : Déterminer leur teneur et leurs caractéristiques chimiques ; Explorer leurs applications industrielles ; Identifier les opportunités de développement pour l'Algérie.

**Méthodologie:** Le mémoire est structuré en deux parties : Une revue bibliographique et la présentation des méthodes de recherche utilisées ; Une partie expérimentale, incluant la méthodologie, l'analyse des résultats et la discussion sur le potentiel de valorisation des composés extraits.

## **Chapitre I. Spiruline**

### **1.Généralités et présentation de la Spiruline**

#### **a. Définition La spiruline**

La spiruline est une cyanobactérie filamenteuse, d'environ 0,3 mm de long, appelée *Arthrospira platensis*. Elle existe depuis des temps très anciens et se présente sous forme de filaments multicellulaires spiralés, non ramifiés, de couleur bleu-vert et légèrement mobiles. Comme les plantes, elle réalise la photosynthèse. Elle se développe naturellement dans des lacs salés et alcalins, situés dans des régions chaudes [1]. Bien qu'elle soit classée parmi les bactéries, la spiruline est souvent assimilée à une microalgue en raison de sa capacité à effectuer la photosynthèse. Toutefois, à la différence des végétaux, elle ne contient pas de cellulose [2]. Elle ne fixe pas l'azote atmosphérique, car elle ne possède pas d'hétérocystes, structures que l'on retrouve chez d'autres cyanobactéries comme *Anabaena* ou *Nostoc*[3].

On la classe parmi les « *algues bleu-vert* » pour plusieurs raisons [3] : Son habitat aquatique, elle réalise la photosynthèse en produisant de l'oxygène, elle produit une biomasse abondante, sa morphologie est proche de celle des algues, sa couleur provient de pigments tels que la phycocyanine (bleu) et la chlorophylle (vert).

Les cellules de la spiruline ne possèdent pas de plastes individualisés. Des études en microscopie électronique ont révélé leur organisation : une capsule, une paroi cellulaire pluristratifiée et un chromoplasme renfermant des thylakoïdes, structures responsables de la photosynthèse. On y trouve également des ribosomes, des fibrilles d'ADN et diverses inclusions[4];[5];[6];[7].

#### **b.Taxonomie de la spiruline**

La spiruline suscite une confusion terminologique notable, notamment entre les termes « *Spiruline* », « *Spirulina* », et « *Arthrospira* ». Cette ambiguïté est renforcée par la commercialisation industrielle du produit sous des appellations inexactes. Ainsi, *Arthrospira* est souvent désignée à tort comme *Spiruline* dans les circuits commerciaux, bien que cette appellation ne corresponde pas à la nomenclature scientifique correcte [8] . Dans les années 1950, trois définitions distinctes ont été proposées afin de clarifier ces termes:

**Spiruline** : nom commercial en français d'une cyanobactérie alimentaire appartenant en réalité au genre *Arthrospira*;

**Spirulina** : désignation commerciale en anglais de cette même cyanobactérie;

**Spirulina** : nom scientifique d'un genre de cyanobactéries différent, comprenant des espèces comme *Spirulina subsalsa* et *Spirulina major*, non utilisées en alimentation humaine.

Les « spirulines » sont des cyanobactéries filamenteuses à morphologie spiralée, constituées de cellules alignées en trichomes. Sur le plan scientifique, seule *Arthrospira* regroupe les espèces utilisées à des fins nutritionnelles.

L'analyse génétique par ARDA (Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis) conduite par Scheldeman et al. (1999) a permis de restreindre la classification du genre *Arthrospira* à deux espèces principales:

*Arthrospira platensis*, originaire du Tchad, dont les trichomes mesurent 250 à 350 µm de long et 10 à 12 µm de diamètre, avec des spires légèrement rétrécies aux extrémités [9];

*Arthrospira maxima*, endémique du lac Texcoco au Mexique et consommée par les Aztèques, présente des trichomes plus courts (70 à 80 µm) et plus fins (7 à 9 µm), avec des extrémités effilées [9].

Ces distinctions ont été confirmées par une étude génétique menée en 2009 par la fondation Antenna Technologies, en partenariat avec l'Université de Genève, apportant des preuves moléculaires à la classification désormais acceptée.

### **c. Classification taxonomique des cyanobactéries**

Les cyanobactéries étaient initialement classées parmi les algues en raison de leur capacité photosynthétique. Ce n'est qu'en 1962 qu'elles ont été officiellement reclassées parmi les procaryotes, au sein du domaine des bactéries (Figure 1).

Aujourd'hui, deux principaux systèmes de classification encadrent leur nomenclature :

**Le Code international de nomenclature pour les algues, les champignons et les plantes (CIN)** : selon ce code, les cyanobactéries sont désignées comme *algues bleues*, *cyanophytes*

ou *cyanophycées*. Cette classification, fondée sur des critères morphologiques, est adoptée par des bases de données comme le *Catalogue of Life* ou *ITIS*.

**Le Manuel de Bergey de Bactériologie déterminative** : cette approche repose sur des critères bactériologiques et considère les cyanobactéries, y compris la spiruline (*Arthrospira*), comme appartenant au groupe des bactéries photosynthétiques [10] ;[11] .

La classification taxonomique de la spiruline proposée par Ripley Fox [12] est la suivante:

**Règne:** Monera, **Sous-règne:** Prokaryota, **Phylum:** Cyanobacteria, **Classe:** Cyanophyceae, **Ordre:** Nostocales, **Famille:** Oscillatoriaceae, **Genre:** *Arthrospira*, **Espèce:** *Arthrospira platensis*.

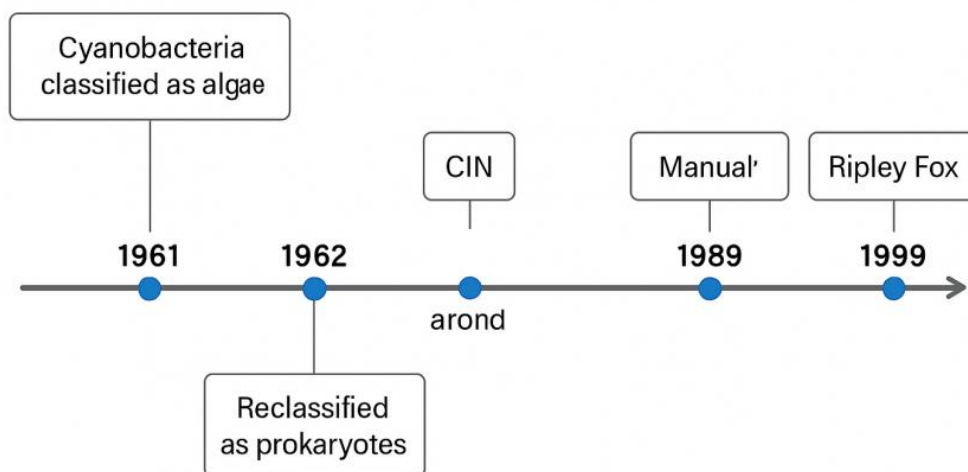


Figure 1: Frise chronologique (Mollo & Noury, 2013 modifiée)

## 2.Cycle biologique de la spiruline (*Arthrospira platensis*)

Le cycle de vie de la spiruline repose sur une reproduction asexuée par **fragmentation**, selon les travaux de [4] . Ce processus assure une multiplication rapide des filaments grâce à la formation de structures cellulaires spécialisées. Il se déroule selon les étapes suivantes:

### a .Formation des nécriidies

Lors du développement de *Arthrospira platensis*, des cellules biconcaves appelées nécriidies se forment au sein du trichome, une structure filamenteuse pluricellulaire. Ces nécriidies

jouent un rôle de "point de rupture", facilitant la fragmentation du filament en segments plus courts [13] .

### **b.Fragmentation et formation des hormogonies**

La séparation du trichome à hauteur des nécridies génère de courts filaments de 2 à 4 cellules appelés hormogonies [4];[13]. Ces fragments se dispersent et initient le développement de nouveaux individus par reproduction végétative.

### **c.Croissance et maturation des hormogonies**

Les hormogonies croissent par scissiparité, un mode de division cellulaire binaire produisant des cellules filles génétiquement identiques [14];[13]. Cette étape est marquée par l'allongement progressif des filaments, qui acquièrent progressivement leur forme hélicoïdale caractéristique.

### **d.Élongation des trichomes**

Une fois matures, les filaments poursuivent leur croissance jusqu'à atteindre leur longueur optimale. Cette élongation est essentielle pour la formation de trichomes pleinement fonctionnels [15] .

### **e.Répétition du cycle**

Arrivés à maturité, les trichomes génèrent de nouvelles nécridies, enclenchant ainsi une nouvelle phase de fragmentation. Ce mécanisme cyclique assure la pérennité de l'espèce [4] .

### **Résumé des étapes principales [15] :**

Fragmentation du trichome via la formation de nécridies et d'hormogonies; Croissance et maturation des hormogonies par division binaire; Élongation des trichomes jusqu'à leur maturité fonctionnelle (Figure 2).

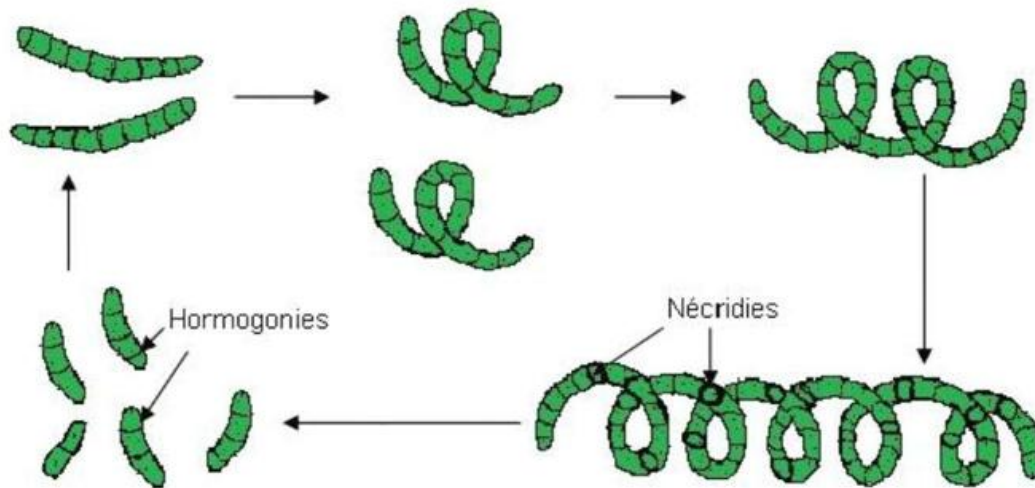


Figure 2: Cycle biologique de la spiruline (Balloni et al. 1980 in Charpy, 2008)

### f. Vitesse de reproduction et mécanismes de multiplication de la spiruline

Comme le montre la figure 4, La spiruline (*Arthrospira platensis*) se distingue par une vitesse de reproduction remarquable, particulièrement lorsqu'elle évolue dans des conditions environnementales favorables : une température supérieure à 30 °C et un milieu nutritif adapté. Selon [16] , son temps de génération peut atteindre un minimum de 7 heures. Dans ces conditions optimales, la biomasse peut croître de 25 % par jour, doublant ainsi en seulement quatre jours[17] ;[18] .

Cette croissance rapide repose exclusivement sur des mécanismes de reproduction asexuée, dont les principaux sont:

*La fragmentation*: le trichome se divise en fragments plus courts appelés *hormogonies*, facilitant la dissémination.

*La scissiparité*: les cellules se divisent par mitose binaire, donnant naissance à deux cellules filles génétiquement identiques [14] .

*Le bourgeonnement*: certaines cellules engendrent directement de nouvelles cellules à partir de leur paroi, contribuant à l'expansion du filament [15].

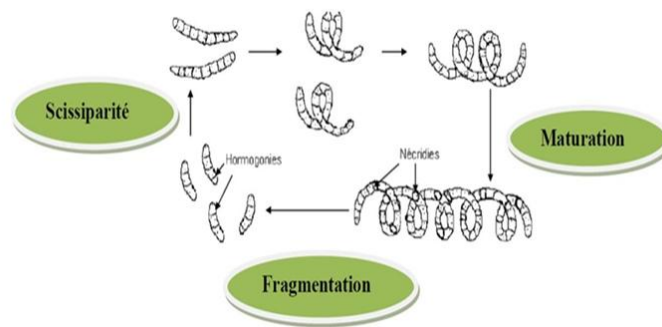


Figure 3: Cycle biologique de la spiruline modifié (Charpy et al, 2008).

### 3. Diversité morphologique, génétique, et écologique d'*Arthrospira platensis*




#### a. Morphologie cellulaire spécialisée : nécries et hormogonies

Présentation des structures spécialisées impliquées dans la reproduction asexuée de la spiruline, en particulier le rôle des nécries dans la fragmentation des trichomes et les traits morphologiques distinctifs des hormogonies. Clarification des dénominations "Spiruline", "Spirulina" et "Arthrospira", avec un accent sur leurs différences taxonomiques ainsi que leurs implications nutritionnelles et commerciales [4].

#### b. Variabilité morphologique des souches d'*Arthrospira platensis*

Présentation des trois principaux types morphologiques (spiralé, ondulé, droit) observés chez les souches naturelles (Tableau 1).

Tableau 1: Morphotypes d'*Arthrospira platensis* et origines géographiques associées

Morphotype	Illustration	Exemple de souche	Origine
Spiralé 	Trichome fortement enroulé rappelant une spirale resserrée.	Lonar	Inde
Ondulé 	Spirale large et détendue	Paracas	Pérou
Droit 	Trichome allongé, presque rectiligne	—	—

### c. Écologie et milieux spécifiques de développement d'*Arthrospira platensis*

Le genre *Arthrospira*, auquel appartient la spiruline, se distingue par sa capacité à coloniser des écosystèmes extrêmes, peu favorables à la majorité des microorganismes. Organisme ubiquiste, thermophile et halotolérant, *A. platensis* prolifère principalement dans des milieux aquatiques alcalins et hypersalins, qui lui confèrent un net avantage compétitif [19]. Parmi les caractéristiques physico-chimiques de ces milieux, on retrouve: une salinité élevée, variant de 8,5 à 270 g/L [19]; une teneur importante en carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) et bicarbonate de sodium ( $\text{NaHCO}_3$ ); une présence notable de minéraux et de sources d'azote fixées. Ces conditions extrêmes limitent la concurrence biologique, offrant à *Arthrospira platensis* une niche écologique privilégiée, propice à son développement en biomasse dominante [19].

### d. Répartition géographique et stratégies d'adaptation écologique d'*Arthrospira platensis*

*Arthrospira platensis* se développe de manière privilégiée dans les eaux chaudes des régions tropicales, notamment dans des milieux alcalins et riches en minéraux. Deux zones géographiques sont particulièrement propices à sa prolifération naturelle :

Les lacs alcalins d'Afrique, notamment dans la région du lac Tchad, où *A. platensis* est dominante; Les lacs salins de la vallée de Texcoco au Mexique, habitat historique de *Arthrospira maxima*, également référencée sous le nom *A. geitleri* [20]. Ces environnements offrent des conditions extrêmes, fortes températures, salinité élevée, richesse en bicarbonates, favorables à la croissance exclusive de cette cyanobactérie (Figure 4).



Figure 4: Zones naturelles de croissance de la spiruline dans le monde (Fox, 1999 modifiée)

### **e. Mécanismes d'exclusion écologique d'*Arthrospira platensis***

La capacité d'*Arthrospira platensis* à prospérer dans des milieux extrêmes repose sur une série de mécanismes lui conférant un avantage écologique significatif, au détriment des autres formes de vie. Ces stratégies d'exclusion actives limitent la concurrence et assurent sa dominance dans des écosystèmes spécifiques[21] ;[12]. Trois principaux mécanismes sont identifiés:

*Modification de l'alcalinité du milieu:* En absorbant les ions carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), la spiruline modifie la composition chimique de l'eau et élève le pH, rendant l'environnement encore plus alcalin. Cette alcalinisation accrue crée des conditions défavorables à la survie de nombreuses espèces concurrentes, réduisant leur développement.

*Compétition pour la lumière:* Dotée de pigments photosynthétiques et d'une flottabilité naturelle, *A. platensis* forme une couche dense à la surface de l'eau, limitant considérablement la pénétration de la lumière solaire. Ce phénomène restreint l'activité photosynthétique de microalgues concurrentes comme *Chlorella*, qui dépendent d'une luminosité optimale pour croître.

*Sécrétion de substances antimicrobiennes:* En complément de son adaptation aux conditions extrêmes, la spiruline libère des composés bioactifs à effet antimicrobien, capables d'inhiber un large spectre de bactéries et autres microorganismes. Cette activité chimique renforce son monopole écologique dans son habitat.

Ainsi, *Arthrospira platensis* illustre un modèle d'organisme hautement spécialisé, tirant profit d'environnements caractérisés par une forte alcalinité, une salinité élevée et des températures tropicales. Grâce à l'association de ces stratégies chimiques, physiques et biochimiques, elle parvient à s'imposer durablement dans des milieux marginaux tels que les lacs alcalins africains (notamment le lac Tchad) ou les bassins salins de la vallée de Texcoco au Mexique.

### **f. Bref historique de la spiruline**

L'usage traditionnel de la spiruline (*Arthrospira*) remonte à plusieurs siècles : elle était consommée sous forme de galettes par les Kanembous autour du lac Tchad dès le XVe siècle (dihé), et par les Aztèques au Mexique (tecuitlatl) récoltée dans le lac Texcoco au XVIe siècle.

Sa redécouverte scientifique débute au XIX<sup>e</sup> siècle avec les premières descriptions morphologiques, et se poursuit au XX<sup>e</sup> siècle grâce à des recherches menées en Afrique et au Mexique (Yvette Créach, Jean Léonard, Hubert Durand-Chastel, Ripley Fox). Cette période voit l'essor de sa culture contrôlée et de sa reconnaissance mondiale.

Depuis les années 1980, la spiruline connaît un développement industriel et humanitaire, notamment en Chine et via des ONG comme Antenna Technologies. Elle est aujourd'hui reconnue par l'OMS comme une ressource nutritionnelle d'avenir, notamment dans la lutte contre la malnutrition.

### **i. La spiruline en Algérie: un développement émergent**

En Algérie, l'intérêt pour la spiruline est apparu relativement récemment, avec plusieurs tentatives de culture menées dans des zones climatiquement favorables, notamment dans le Sud, à El Goléa et Tamanrasset. Une initiative notable a vu le jour en 2009 dans la wilaya de Mostaganem, marquant une première intégration de cette cyanobactérie dans les projets de développement local [22]. Bien que la spiruline soit traditionnellement exploitée depuis des siècles par les Kanembous du Tchad et les Aztèques du Mexique, ce n'est qu'au XX<sup>e</sup> siècle qu'elle a été scientifiquement redécouverte, puis reconnue pour ses exceptionnelles qualités nutritionnelles. Sa richesse en protéines, vitamines et minéraux, ainsi que sa résilience dans des milieux extrêmes, en font aujourd'hui une solution prometteuse face aux enjeux de malnutrition et de sécurité alimentaire, notamment dans les régions arides et peu fertiles telles que le Sahara algérien.

### **4. Habitat de la spiruline (*Arthrospira*)**

La spiruline, appartenant au genre *Arthrospira*, se développe naturellement dans des milieux dits extrêmes, peu propices à d'autres formes de vie. Ces environnements singuliers lui confèrent un avantage écologique important en réduisant la compétition microbienne.

*Milieu fortement alcalin:* La spiruline prospère dans des eaux basiques dont le pH varie généralement entre 8,5 et 11. Cette alcalinité élevée est principalement due à la présence de carbonate de sodium (ou natron), un composé essentiel à sa croissance.

*Eaux riches en sels minéraux:* Elle se développe dans des eaux saumâtres à forte salinité, atteignant parfois 20 à 70 g/L, voire davantage dans certains lacs endoréiques, où l'évaporation accentue la concentration en sels.

*Températures élevées:* La croissance optimale est observée entre 35 et 40 °C. En dessous de 15 °C ou au-delà de 39 °C, l'activité biologique de la spiruline diminue fortement, pouvant aller jusqu'à l'arrêt de son métabolisme.

*Exposition solaire intense:* Une luminosité importante est indispensable à la photosynthèse de la spiruline. Elle est donc principalement présente dans les régions tropicales, subtropicales ou en altitude, bénéficiant d'un ensoleillement constant.

*Riche apport nutritif naturel:* Les lacs qui abritent la spiruline sont souvent riches en nutriments indispensables tels que le fer, le magnésium, le phosphore, l'azote (nitrate ou urée) et du CO<sub>2</sub> dissous, nécessaires à son développement photosynthétique.

*Barrière écologique contre les contaminations:* Son habitat alcalin et chaud, enrichi en bicarbonates, crée un environnement défavorable à la plupart des micro-organismes, ce qui limite naturellement les risques de contamination.

### **a. Conditions optimales de culture de l'*Arthrospira platensis***

Pour reproduire les performances de la spiruline en milieu naturel, il est indispensable de contrôler certains paramètres essentiels en milieu de culture [23] ; [1]:

*Température:* Zone optimale : 35 à 38 °C. Tandis que, la Zone critique : en dessous de 15 à 20 °C , croissance ralentie ; au-delà de 39 °C, stress thermique et baisse de viabilité.

En bassin ou serre, un contrôle thermique est nécessaire pour éviter les chocs liés à l'évaporation ou à une chaleur excessive.

*Lumière:* Énergie indispensable à la photosynthèse, elle doit être suffisante sans excès. Une lumière trop faible limite la production de biomasse, tandis qu'un excès provoque une photoinhibition, altérant les pigments comme la phycocyanine ou la chlorophylle. En culture contrôlée (intérieur ou serre), une gestion précise de l'éclairage est requise.

*pH du milieu de culture*: la Plage idéale : entre 8,5 et 10,5. Au cours de la photosynthèse, la spiruline libère des ions qui augmentent naturellement l'alcalinité du milieu [24] . Un *pH* supérieur à 11 peut toutefois ralentir la croissance, d'où l'importance d'un suivi régulier.

La culture efficace d'*Arthrospira platensis* repose sur la reconstitution fidèle des caractéristiques de son environnement naturel, considéré comme extrême pour de nombreuses autres formes de vie. Pour garantir une production de biomasse abondante, stable et de qualité, il est essentiel de contrôler rigoureusement plusieurs paramètres physico-chimiques du milieu de culture, notamment la température, la luminosité, le *pH*, la salinité ainsi que la composition nutritionnelle. Cette exigence de précision concerne aussi bien les systèmes de production artisanaux que les installations industrielles à grande échelle. Le respect optimal de ces conditions permet non seulement de maximiser la croissance de la spiruline, mais aussi d'optimiser sa teneur en composés bioactifs d'intérêt, tels que la vitamine C et les huiles essentiels, au cœur de ce travail.

## **5. Valeur nutritionnelle d'*Arthrospira platensis***

*Arthrospira platensis* est largement reconnue pour sa richesse nutritionnelle exceptionnelle. Sa composition biochimique hautement assimilable en fait une source remarquable de protéines complètes, de vitamines, de minéraux, d'acides gras essentiels et de composés antioxydants [25] . Cette microalgue est souvent considérée comme l'un des aliments naturels les plus complets disponibles à l'état brut.

### **a. Protéines et acides aminés**

La spiruline renferme entre 50 et 70 % de protéines sur poids sec, ce qui la positionne comme l'une des sources protéiques les plus concentrées parmi les organismes microbiens [26] ;[27]. Ces protéines sont dites « complètes », car elles incluent les huit acides aminés essentiels requis par l'organisme. Comparativement à d'autres aliments, elle contient deux fois plus de protéines que le soja (35 %); Trois fois plus que la viande ou le poisson ( $\approx 25\%$ ); et environ cinq fois plus que les céréales ( $\approx 14\%$ ) [28] . Près de 47 % des protéines de la spiruline sont constituées d'acides aminés essentiels, ce qui la rend particulièrement précieuse pour les régimes végétariens.

Même les acides aminés soufrés, comme la méthionine et la cystéine, bien que présents en quantités modestes, couvrent plus de 80 % des apports recommandés par la FAO [29] . Cela confirme son intérêt en tant que complément nutritionnel équilibré [30] .

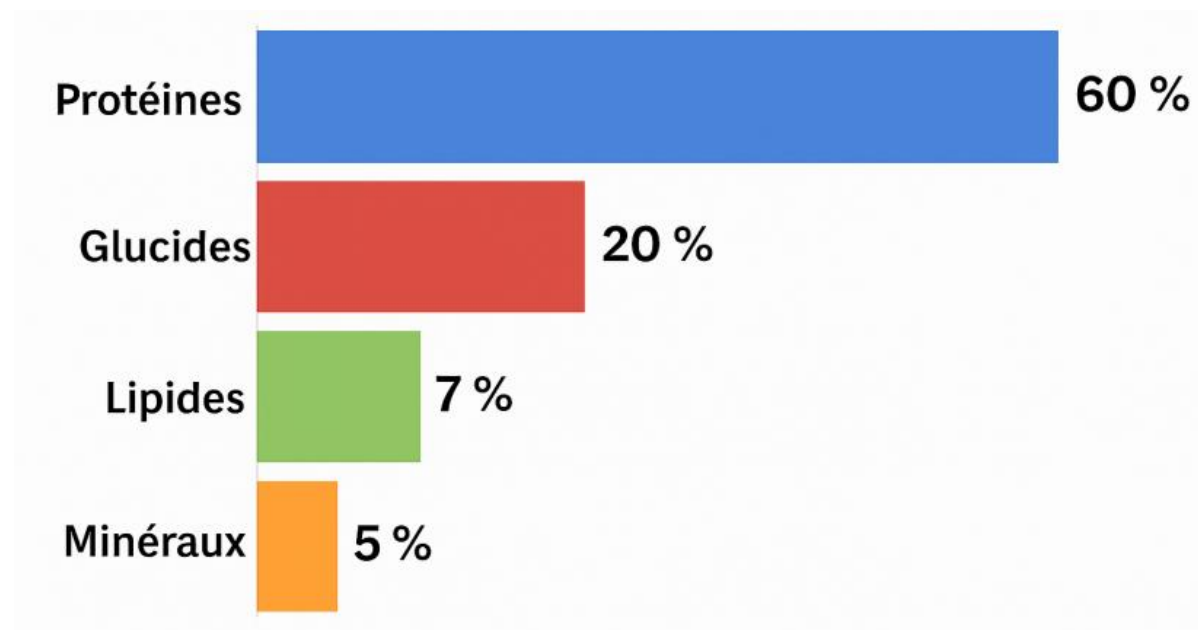


Figure 5: Composition chimique de la spiruline (Lecoindre, 2017 modifiée)

### **b. Lipides et acides gras essentiels**

Bien que modérément lipidique (environ 5 à 6 % du poids sec ; [31] ), la spiruline se distingue par la qualité nutritionnelle de ses acides gras, répartis de manière équilibrée entre Acides gras polyinsaturés (AGPI), Acides gras saturés (AGS), et Acides gras monoinsaturés (AGMI) ( $\approx 6$  % du total lipidique ; Bard, 2018).

Elle est particulièrement riche en acide gamma-linolénique (AGL), un oméga-6 rare dans l'alimentation courante, pouvant représenter jusqu'à 40 % de la fraction lipidique [32] .

On y trouve également d'autres acides gras bénéfiques tels que l'Acide  $\alpha$ -linoléique (ALA), Acide stéaridonique (SDA), Acide eicosapentaénoïque (EPA), Acide docosahexaénoïque (DHA), Acide arachidonique (AA) [33]. Cette composition lipidique variée offre des propriétés cardio-protectrices et favorise les fonctions cellulaires et métaboliques.

### **c. Glucides**

Les glucides représentent 15 à 25 % du poids sec de la spiruline [34] , majoritairement sous forme de polymères complexes, tels que les glucosannes aminés (~1,9 %) ; Les rhamnosannes aminés, plus abondants (~9,7 %) [29] .

Elle contient également de faibles quantités de glycogène (~0,5 %), ainsi que des traces de sucres simples (glucose, fructose, saccharose) et de polyols (glycérol, mannitol, sorbitol). Parmi les glucides d'intérêt nutritionnel, le méso-inositol phosphate se distingue.

Il constitue une précieuse source de phosphore organique et d'inositol, avec des concentrations estimées entre 350 et 850 mg/kg de matière sèche [27] .

#### **d. Profil nutritionnel et bioactif d'*Arthrospira platensis***

##### ***Vitamines***

*Arthrospira platensis* constitue une source notable de vitamines hydrosolubles et liposolubles, contribuant à de nombreuses fonctions physiologiques. Elle contient principalement des vitamines du groupe B (B1, B2, B3, B5, B6, B8, B9, B12); des vitamines liposolubles telles que la provitamine A ( $\beta$ -carotène) et la vitamine E; de la biotine (vitamine H), et de rares traces de vitamine C [35] . La spiruline est souvent citée pour sa teneur élevée en vitamine B12, jusqu'à quatre fois supérieure à celle du foie de veau. Toutefois, sa biodisponibilité chez l'homme ne dépasse pas 17 %, limitant son impact nutritionnel réel [36].

Le  $\beta$ -carotène, pigment caroténoïde majeur, représente jusqu'à 80 % des caroténoïdes totaux. Environ 4,5 mg de  $\beta$ -carotène apportés par 3 à 6 g de spiruline couvriraient les besoins journaliers en vitamine A [32] .

La vitamine E, comparable à celle retrouvée dans le germe de blé, possède des propriétés antioxydantes notables, notamment dans la stabilisation des acides gras polyinsaturés.

Bien que la vitamine C soit parfois mentionnée, elle est généralement absente ou présente à l'état de traces [28] ;[36] .

Tableau 2: Teneurs approximatives en vitamines de la spiruline (Lecointre, 2017)

Vitamines	Teneur (mg/100g)	Vitamine (liposoluble)	Teneur (mg/100g)
<b>B1 (Thiamine)</b>	34–50	Provitamine A ( $\beta$ -carotène)	700–1700
<b>B2 (Riboflavine)</b>	30–46	Cryptoxanthine	~100
<b>B3 (Niacine)</b>	130	Vitamine E ( $\alpha$ -tocophérol)	~120
<b>B5 (Acide pantothénique)</b>	4,6–25		
<b>B6 (Pyridoxine)</b>	5–8		
<b>B8 (Biotine)</b>	0,05		
<b>B9 (Folate)</b>	0,5		
<b>B12 (Cobalamine)</b>	0,10–0,34		
<b>C (Acide ascorbique)</b>	Traces		

### *Pigments bioactifs*

Outre son intérêt nutritionnel, la spiruline est remarquable pour sa richesse pigmentaire, qui contribue à ses propriétés biologiques tels que la Chlorophylle-*a*: pigment vert central de la photosynthèse, aux effets détoxifiants démontrés (notamment contre les métaux lourds); et la Phycocyanine: pigment bleu spécifique de la spiruline, représentant jusqu'à 15 % du poids sec.

Elle est reconnue pour ses propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires [37]; Caroténoïdes : comme le  $\beta$ -carotène, la zéaxanthine et la canthaxanthine [33] ;[38], aux propriétés photoprotectrices et antioxydantes.

### *Minéraux et oligo-éléments*

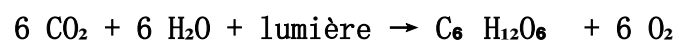
La spiruline représente également une source concentrée de micronutriments essentiels, ce qui la rend utile dans les contextes de malnutrition [32] tels que le *Fer*: 550 à 6000 mg/kg, idéal pour la prévention de l'anémie [29]; *Calcium* et phosphore : dans des proportions proches de celles du lait, mais sans les effets décalcifiants; *Magnésium*, *potassium*, et parfois *zinc*, jouant un rôle dans la régulation enzymatique et électrolytique.

### ***Enzymes et activités biologiques***

La spiruline contient plus de 2000 enzymes, dont la superoxyde dismutase (SOD), essentielle pour neutraliser les radicaux libres et ralentir le vieillissement cellulaire [39] . Elle participe aussi à la synthèse des protéines; la croissance des lactobacilles, bénéfiques pour la flore intestinale et la digestion.

### ***Capacité photosynthétique***

La spiruline, en tant que cyanobactérie photoautotrophe, capte l'énergie lumineuse pour produire de la matière organique selon l'équation :



Ce processus, structuré en deux phases (photochimique et chimique), intervient dans la production d'oxygène; La régulation du climat; et la base des chaînes alimentaires aquatiques [40] ; [41].

## **6. Potentiel biotechnologique de l'*Arthrospira platensis***

### **a. Définition générale de la biotechnologie**

Selon l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), la biotechnologie désigne l'ensemble des applications scientifiques et technologiques qui utilisent des organismes vivants — ou leurs composants et produits — dans le but de modifier des matières vivantes ou inertes afin de générer des connaissances, des biens ou des services [OCDE].

### **b. Typologie des biotechnologies**

Les biotechnologies modernes sont classées en plusieurs domaines d'application, identifiés par des codes couleurs symboliques (Figure 6):

*Biotechnologie verte:* concerne le secteur agricole. Elle s'appuie sur le génie génétique pour améliorer la productivité, la résistance aux maladies, et l'efficacité des cultures.

*Biotechnologie rouge:* orientée vers la santé humaine, elle inclut la production de médicaments (antibiotiques, vaccins), les thérapies géniques et les outils de diagnostic moléculaire.

*Biotechnologie bleue:* axée sur l'exploitation des ressources marines (algues, cyanobactéries), elle permet la production de substances bioactives ou la bioremédiation des milieux aquatiques.

*Biotechnologie jaune:* dédiée à la protection de l'environnement, elle valorise les déchets organiques et applique des procédés biologiques de dépollution des sols et de l'eau.

*Biotechnologie blanche:* utilisée dans l'industrie, elle vise à remplacer les procédés chimiques traditionnels par des procédés biologiques durables, s'appuyant notamment sur la biomasse.

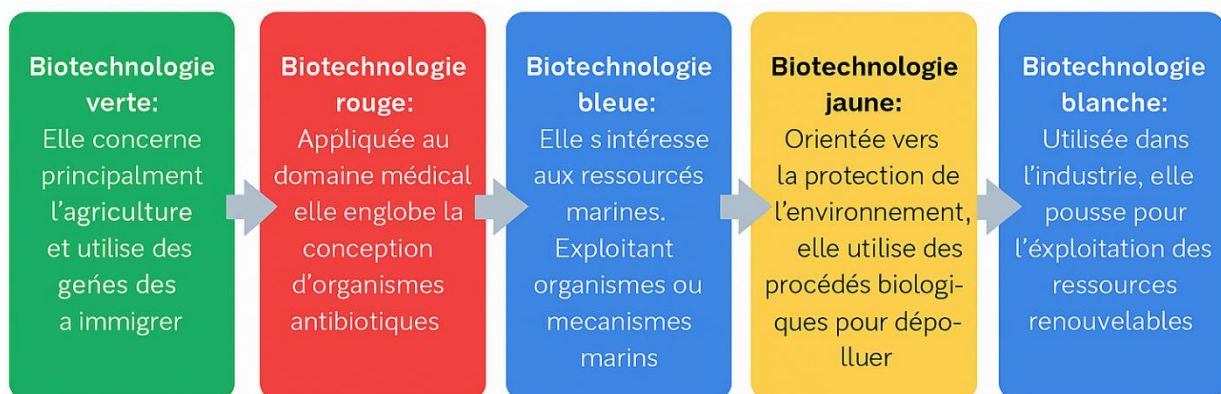


Figure 6: Panorama des biotechnologies modernes et de leurs applications

### c. Intérêt biotechnologique de la spiruline

*Arthrospira platensis* constitue une ressource stratégique en biotechnologie, notamment pour les secteurs de l'agroalimentaire, de la santé publique, de la bioénergie et de l'environnement.

Sa valeur nutritionnelle élevée, associée à une capacité de culture intensive, en fait une candidate idéale pour des usages variés à fort impact.

*Alimentation et nutrition:* Dotée d'une concentration protéique exceptionnelle (50–70 %), enrichie en vitamines, minéraux et antioxydants, la spiruline est exploitée dans la lutte contre la malnutrition, en particulier dans les zones vulnérables [31].

*Production à grande échelle:* La maîtrise des paramètres de culture (température, lumière, pH, nutriments) est indispensable pour garantir une biomasse de qualité. Des technologies innovantes comme les photobioréacteurs permettent d'optimiser la productivité dans un cadre durable.

*Applications industrielles:* Les extraits de spiruline (phycocyanine, pigments, peptides bioactifs) trouvent leur place dans plusieurs secteurs: Colorants naturels pour l'agroalimentaire et les cosmétiques; Biocarburants à partir de la biomasse; Molécules fonctionnelles pour l'industrie pharmaceutique.

*Bioremédiation et environnement:* Grâce à sa capacité à absorber certains métaux lourds et nutriments, la spiruline peut être utilisée dans la dépollution des eaux usées, en agissant comme un biofiltre naturel respectueux de l'écosystème.

En somme, la spiruline s'affirme comme un outil biotechnologique polyvalent, porteur de solutions durables pour l'alimentation, la santé, l'industrie et l'environnement. L'optimisation de ses systèmes de production et l'intégration de technologies émergentes sont des clés majeures pour son développement à l'échelle industrielle.

## **7. Aspects biotechnologiques et valorisation de *Arthrospira platensis***

### **a. Intérêt biotechnologique global de la spiruline**

*Arthrospira platensis*, plus connue sous le nom de spiruline, est un microorganisme de référence dans le champ de la biotechnologie, en raison de sa richesse nutritionnelle et de ses propriétés fonctionnelles variées. Elle constitue une ressource stratégique, particulièrement dans les régions affectées par la malnutrition ou le manque de sécurité alimentaire [31].

## **b. Domaines d'application biotechnologique**

*Alimentation et nutrition:* Grâce à sa teneur élevée en protéines (50 à 70 % du poids sec), vitamines, minéraux, acides gras essentiels et pigments antioxydants, la spiruline est largement utilisée comme complément alimentaire pour soutenir la santé globale et prévenir les carences nutritionnelles.

*Production à grande échelle:* La valorisation optimale de la spiruline nécessite le développement de systèmes de culture contrôlés. L'utilisation de technologies comme les photobioréacteurs permet d'assurer une production efficace, respectueuse des paramètres clés (température, pH, luminosité).

*Secteurs industriels:* La spiruline est exploitée pour la production de: Colorants naturels (notamment la phycocyanine); Biocarburants à partir de la biomasse; Molécules bioactives à potentiel pharmaceutique ou cosmétique.

*Environnement et bioremédiation:* Ses capacités d'absorption de nutriments et de métaux lourds font de la spiruline un agent efficace pour la dépollution des eaux usées, en tant que biofiltre naturel.

## **c. Formes commerciales et galéniques**

La spiruline est disponible sous différentes formes galéniques, selon les usages visés:

*Spiruline fraîche:* non transformée, à forte valeur biologique, mais à conservation courte (48 h).

*Extrait liquide (phycocyanine):* pigment bleu concentré, antioxydant, sans allégation santé validée (ANSES/EFSA).

*Spiruline en paillettes:* séchée à basse température, forme artisanale à forte densité nutritionnelle.

*Poudre:* issue du broyage ou de procédés industriels ; utilisée dans boissons, soupes, ou préparations cosmétiques.

*Comprimés/gélules:* pratiques, mais parfois altérés par les additifs ou la compression à chaud ; privilégier les produits naturels, sans excipients.

*Pétales:* forme esthétique et peu répandue, utilisée dans les plats froids pour préserver ses nutriments.

#### **d. Intérêts sectoriels et innovations**

*Cosmétique:* Les acides aminés, oligoéléments, et antioxydants présents dans la spiruline en font un ingrédient prisé en cosmétologie: Anti-âge : sérums, crèmes régénérantes; Soins capillaires: shampoings fortifiants, masques revitalisants; Enveloppements corporels : intégrés aux soins bien-être et centres de thalassothérapie [42]; [43] .

*Pharmaceutique:* Les effets immunomodulateurs, antiviraux, anti-inflammatoires et antitumoraux de la spiruline sont activement étudiés. Bien qu'elle ne soit pas encore un principe actif, son potentiel thérapeutique en fait un candidat pour le développement de compléments fonctionnels.

#### **e. Développement en Algérie et valorisation alimentaire locale**

En Algérie, bien que la culture de la spiruline reste encore artisanale, elle présente un fort potentiel de développement agroalimentaire local.

*Produits fonctionnels enrichis en spiruline:* Céréaliers (pain, couscous, gâteaux, tagliatelles), Produits laitiers (yaourts, crèmes), Produits sucrés (miel, sucre aromatisé), Soupes, boissons, condiments. Enfin, Compléments alimentaires qui sont disponible sous forme de comprimés, gélules ou poudre, la spiruline est utilisée pour renforcer la vitalité et prévenir les déficits nutritionnels, notamment dans les régimes végétariens ou les situations de stress oxydatif.

*Cadre réglementaire:* Selon le décret français 2006-352, un complément alimentaire ne peut faire l'objet d'allégations thérapeutiques. La spiruline entre dans cette catégorie en tant que source concentrée de nutriments et agent physiologiquement actif, sans effet curatif revendiqué [9].

## **Chapitre II. Vitamine C (acide ascorbique) et huiles essentiels**

### **1. Vitamine C**

#### **1.1. Définition approfondie de la vitamine C**

La vitamine C (Figure 7 et tableau 3), ou acide ascorbique, est un composé organique hydrosoluble de formule chimique  $C_6H_8O_6$ . Structurellement apparentée au glucose, elle appartient à la famille des acides lactones et se présente sous la forme d'une poudre blanche cristalline, soluble dans l'eau mais sensible à la lumière, à la chaleur et à l'oxygène [35].

Chez l'être humain, cette vitamine joue un rôle physiologique fondamental, mais elle ne peut être synthétisée de manière endogène en raison de l'absence de l'enzyme L-gulonolactone oxydase, ce qui est également le cas chez d'autres primates, certains rongeurs ou espèces de chauves-souris [40]. Par conséquent, un apport alimentaire régulier est indispensable pour satisfaire les besoins métaboliques.

Considérée comme une molécule antioxydante majeure, la vitamine C intervient dans de nombreux processus physiologiques essentiels:

La synthèse du collagène, de la carnitine et de neurotransmetteurs (dopamine, noradrénaline) [41]; la régénération d'autres antioxydants tels que la vitamine E; l'amélioration de l'absorption du fer non hémique au niveau intestinal; le renforcement des défenses immunitaires; et la protection cellulaire contre le stress oxydatif [36].

Les apports nutritionnels recommandés sont généralement situés entre 75 et 110 mg/jour pour un adulte, mais peuvent être augmentés en cas de stress, tabagisme, grossesse ou pathologies chroniques [28].

Bien que la spiruline soit renommée pour sa densité nutritionnelle, elle contient peu ou pas de vitamine C, en raison de sa thermolabilité : cette dernière se dégrade facilement lors du séchage ou du traitement industriel [29]. C'est pourquoi certaines approches biotechnologiques visent à enrichir ou préserver cette molécule dans des matrices fonctionnelles comme la spiruline, notamment pour les applications nutraceutiques ou pharmaceutiques [9].

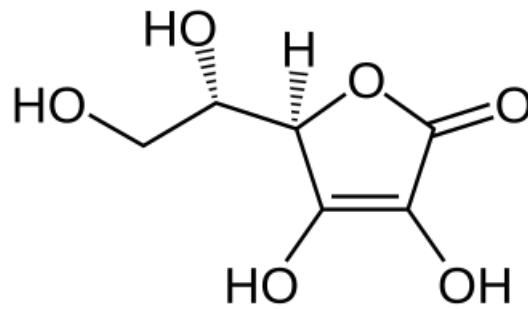


Figure 7: Structure chimique de la vitamine C (Acide ascorbique)  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Vitamine\\_C](https://fr.wikipedia.org/wiki/Vitamine_C) (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>)

Tableau 3: Propriétés physiques et chimiques de la vitamine C (acide ascorbique)

Propriété	Valeur	Référence
Formule chimique	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>6</sub>	Anvar & Nowruzi, 2021
Masse molaire	176,12 g/mol	Clark <u>et al.</u> , 2018
Densité	1,65 g/cm <sup>3</sup> à 20 °C	Pierlovisi, 2008
Solubilité dans l'eau	0,33 g/mL	Falquet & Hurni, 2006
pKa	4,70 (à 10 °C)	<u>Charpy et al.</u> , 2008
Point de fusion	190–192 °C (avec décomposition)	Sguera, 2008
Sensibilité	Lumière, chaleur, oxygène, pH alcalin	Pierlovisi, 2008 ; Falquet & Hurni, 2006

## 1.2. Effets biologiques, thérapeutiques et analytiques de la vitamine C (acide ascorbique)

La vitamine C, ou acide L-ascorbique, intervient dans un large éventail de fonctions biologiques. Elle exerce une influence bénéfique tant sur la prévention de nombreuses pathologies que sur le maintien de l'homéostasie cellulaire.

*Santé cardiovasculaire:* elle contribue à inhiber l'oxydation des lipoprotéines de basse densité (LDL) et à réduire la biosynthèse endogène de cholestérol, jusqu'à 95 % selon certaines études expérimentales, limitant ainsi le risque de maladies coronariennes.

*Renforcement immunitaire:* elle stimule la prolifération des lymphocytes T et B, augmente l'activité des phagocytes et participe à la synthèse d'anticorps. Elle agit également comme modulateur de la réponse inflammatoire.

*Applications cliniques par voie intraveineuse:* administrée à hautes doses, elle a été testée pour le traitement adjuvant de maladies virales comme la rougeole, la poliomyélite, l'hépatite B et C, l'herpès, la varicelle, la maladie de Lyme ou encore la mononucléose.

*Détoxification et neutralisation des toxines:* elle est capable de neutraliser les effets de toxines puissantes, comme démontré par l'expérience du Dr Bastien sur l'amanite phalloïde, à condition qu'elle soit administrée à forte dose et par voie parentérale.

*Élimination des substances toxiques:* elle participe à la détoxification des métaux lourds (mercure, plomb, cadmium) et dégrade certains pesticides ou polluants organiques persistants.

*Prévention oncologique et action sélective:* à très fortes concentrations, elle démontre un pouvoir cytotoxique ciblé contre certaines cellules tumorales, tout en épargnant les cellules saines, notamment dans le cas du cancer de la vessie.

*Soutien aux patients immunodéprimés:* des études rapportent un rôle bénéfique chez les patients atteints du VIH/SIDA, en soutenant la réponse immunitaire et en réduisant les infections opportunistes.

*Santé osseuse:* elle favorise la fixation du calcium sur les os et intervient dans le métabolisme du collagène, contribuant ainsi à prévenir la décalcification et l'ostéoporose.

*Lutte contre le vieillissement cellulaire:* grâce à ses propriétés antioxydantes, elle neutralise les radicaux libres, retardant le vieillissement prématuré.

*Protection vasculaire:* elle participe à l'entretien de l'élasticité et de l'intégrité des parois capillaires.

*Réponse au stress:* elle soutient la synthèse des hormones surrénales (adrénaline, cortisol), essentielles à la gestion du stress physiologique.

*Effet anti-anémique:* elle facilite l'absorption intestinale du fer non héminique et stimule la production d'hémoglobine.

*Antihistaminique naturel:* elle peut moduler les réactions allergiques en réduisant la libération d'histamine.

*Fonctions neurocognitives:* elle améliore la transmission neuronale, la concentration, la mémoire et les fonctions exécutives.

*Énergie et vitalité:* en participant au métabolisme énergétique, elle réduit la fatigue chronique et améliore la performance physique.

*Sommeil et digestion:* contrairement aux idées reçues, la vitamine C facilite l'endormissement et régule le transit intestinal sans effet excitant [44] ; [45] ; [46] .

### **1.3. Méthodes d'analyse de l'acide L-ascorbique (méthodes chimiques)**

L'identification et la quantification de la forme biologiquement active de la vitamine C, l'acide L-ascorbique, reposent sur deux grandes catégories de méthodes analytiques.

#### *Techniques chimiques basées sur le pouvoir réducteur*

L'acide L-ascorbique, sous sa forme réduite, est un composé hautement réducteur, capable de céder facilement des électrons à divers agents oxydants. Cette propriété redox en fait une cible privilégiée pour les méthodes d'oxydoréduction, largement utilisées en analyse chimique.

Le réactif de référence dans ce contexte est le 2,6-dichlorophénolindophénol (DCPIP), un indicateur coloré de type redox.

Ce dernier possède une teinte bleue intense à l'état oxydé, mais devient incolore ou légèrement rose en milieu acide lorsqu'il est réduit par la vitamine C. Cette réaction rapide et visible permet une analyse simple et efficace.

Cette méthode autorise plusieurs approches complémentaires:

Titration directe visuelle (colorimétrie) : il s'agit d'un dosage classique basé sur le changement de couleur observable à l'œil nu. La disparition de la coloration bleue indique le point d'équivalence.

Quantification spectrophotométrique : en mesurant l'absorbance à 520 nm, on peut suivre précisément la réduction du DCPIP par l'acide ascorbique. Cette méthode est sensible et reproductible, idéale pour les matrices complexes comme les extraits végétaux ou alimentaires.

Utilisation d'autres réactifs oxydants : bien que le DCPIP soit préféré, d'autres agents comme l'iode (en milieu iodimétrique), le bleu de méthylène, le phosphomolybdate ou le chlorure ferrique peuvent également être employés, surtout pour des analyses alternatives ou comparatives en enseignement.

Ces techniques présentent l'avantage d'être peu coûteuses, rapides à mettre en œuvre, et adaptables aussi bien à une analyse qualitative qu'à une quantification semi-automatique à l'aide d'un spectrophotomètre.

### ***Méthodes spectrales***

Outre les méthodes chimiques classiques, la vitamine C peut être analysée par des techniques physiques plus avancées, qui exploitent ses propriétés spectrales ou électrochimiques intrinsèques.

*Spectroscopie UV-Visible*: l'acide L-ascorbique présente un pic d'absorption caractéristique à 265 nm en milieu neutre, correspondant à sa structure conjuguée. Cette méthode permet une détection très sensible, rapide et sans réactif externe, particulièrement adaptée pour les milieux aqueux purifiés.

*Techniques électrochimiques*: l'acide ascorbique peut être oxydé de manière irréversible sur des électrodes à potentiel contrôlé, ce qui permet de mesurer les courants d'oxydation anodique. Ces signaux électriques sont proportionnels à la concentration de vitamine C. Grâce à l'emploi de microélectrodes ou de capteurs modifiés, ces méthodes permettent des analyses:

*Sélectives*, Ultra-sensibles (jusqu'à quelques  $\mu\text{mol/L}$ ), Rapides (quelques secondes), Et applicables in situ, même dans des échantillons biologiques ou alimentaires peu préparés.

#### 1.4. Extraction de la vitamine C à partir de la spiruline

Bien que naturellement pauvre en acide ascorbique, la spiruline peut néanmoins en contenir des traces. Pour l'isoler sans détériorer cette molécule sensible, des méthodes douces sont privilégiées (Tableau 4):

Tableau 4: Méthodes d'extraction de la vitamine C à partir de la spiruline

Méthode	Principe	Références
Décoction	10 g de poudre bouillie dans 100 mL d'eau distillée pendant 20 min, puis filtrée	Denou et al., 2016
Infusion	10 g ajoutés à de l'eau bouillante pendant 15 min, puis filtrés	Denou et al., 2016
Macération	10 g immergés à température ambiante durant 24 h, sans chauffage	Denou et al., 2016

Toutes les extractions sont répliquées trois fois pour améliorer le rendement. Le résidu est généralement séché à l'étuve ou conservé sous forme liquide, et le rendement global est calculé à partir de la masse sèche obtenue [47].

#### 1.5. Rôles métaboliques et fonctions biochimiques majeures de l'acide ascorbique

La vitamine C, ou acide ascorbique, est bien plus qu'un simple micronutriment : elle constitue une molécule clé du métabolisme cellulaire, intervenant dans des processus vitaux à travers deux grandes classes de réactions biochimiques.

Ces mécanismes sous-tendent de nombreuses fonctions structurales, enzymatiques et antioxydantes essentielles à l'homéostasie humaine.

##### a. Réactions d'hydroxylation enzymatique

L'acide ascorbique joue un rôle de cofacteur indispensable dans plusieurs réactions d'hydroxylation enzymatique, notamment dans (Figure 8):

La biosynthèse du collagène, principal composant structural des tissus conjonctifs. La vitamine C permet l'hydroxylation des résidus de proline et de lysine, processus critique pour

la stabilisation de la triple hélice de collagène [48] ; La production de catécholamines, telles que la dopamine et la noradrénaline, via l'hydroxylation de la dopamine en noradrénaline dans la médullosurrénale; La synthèse de la carnitine, molécule indispensable au transport mitochondrial des acides gras à longue chaîne, assurant leur oxydation pour la production d'énergie cellulaire.

Ces réactions catalytiques ne peuvent avoir lieu efficacement sans la présence de vitamine C sous sa forme réduite, ce qui souligne son rôle fondamental dans la fonction musculaire, la cicatrisation et la neurotransmission.

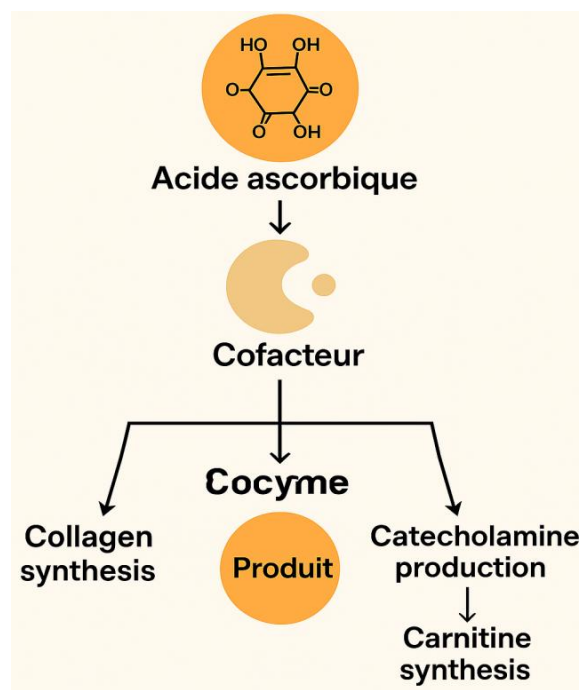


Figure 8: Activité biochimique de l'acide ascorbique en tant que cofacteur métabolique (Design réalisé par Dr. KIES F.).

## b. Réactions d'oxydoréduction et activité antioxydante

La seconde fonction majeure de l'acide ascorbique réside dans sa capacité antioxydante, qui découle de son potentiel réducteur élevé. Cette propriété confère à la vitamine C plusieurs rôles physiologiques importants (Figure 9):

La réduction du fer ferrique ( $Fe^{3+}$ ) en fer ferreux ( $Fe^{2+}$ ), favorisant ainsi l'absorption intestinale du fer non hémérique et prévenant l'anémie ferriprive; La neutralisation des espèces réactives de l'oxygène (ERO), telles que les radicaux libres, ce qui protège les membranes cellulaires et l'ADN des dommages oxydatifs [45]; La régénération de la vitamine

E ( $\alpha$ -tocophérol), un autre antioxydant liposoluble, dont l'action est prolongée par la recyclabilité de la vitamine C dans les milieux biologiques ; [46].

Ainsi, la vitamine C constitue un pivot du système antioxydant endogène, agissant à la fois comme piègeur de radicaux libres et comme régulateur de l'équilibre redox intracellulaire, ce qui en fait une molécule d'intérêt dans la prévention des pathologies dégénératives et inflammatoires.

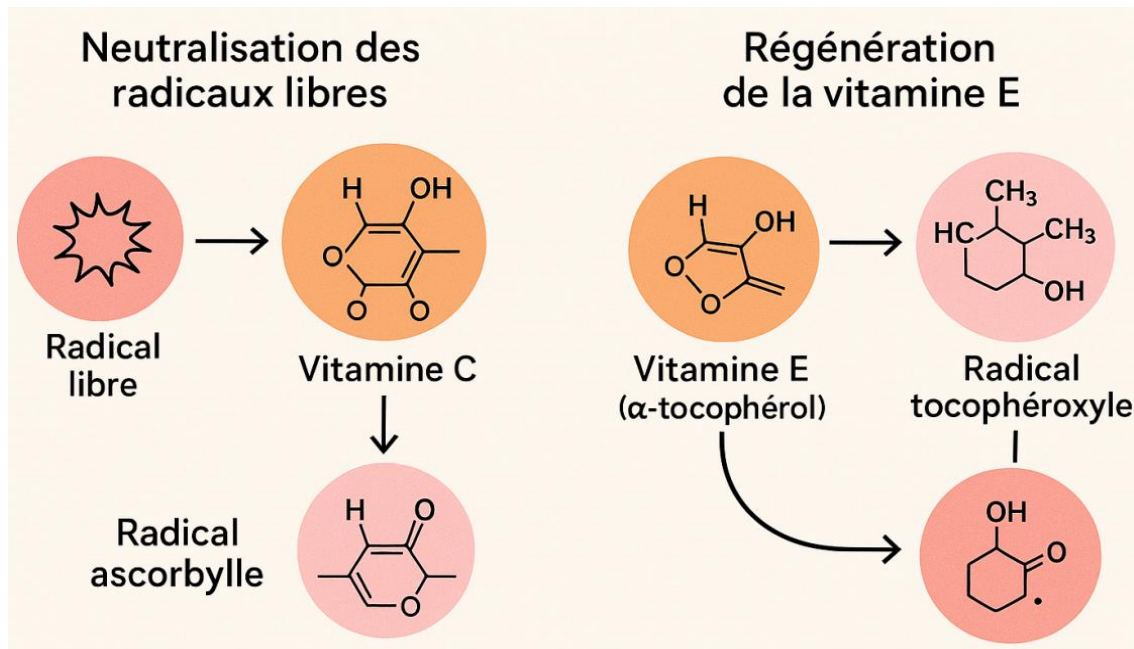


Figure 9: Mécanismes redox de la vitamine C : neutralisation des radicaux libres et régénération de la vitamine E (Design réalisé par Dr. KIES F.)

## 2. Huiles essentiels

### 2.1. Définition des huiles essentielles

Les huiles essentielles sont des mélanges complexes, naturellement présents dans les plantes aromatiques, et caractérisés par leur volatilité, leur solubilité dans les corps gras et leur forte odeur. Ces extraits se concentrent dans des structures végétales spécifiques telles que les glandes sécrétrices, les poches ou les trichomes, localisées au niveau des feuilles, des fleurs, des tiges, des écorces ou des racines. Leur rôle naturel dans la plante serait lié à des fonctions de défense (répulsif contre les ravageurs, antibactérien naturel) et de signalisation (attraction des pollinisateurs).

Sur le plan technologique, leur extraction repose sur diverses méthodes traditionnelles et modernes. La distillation à la vapeur d'eau constitue le procédé le plus répandu, permettant une séparation douce des composés volatils sans altération majeure de leur structure chimique [49]. D'autres méthodes comme l'enfleurage (par fixation sur corps gras à froid), l'expression mécanique (pour les zestes d'agrumes) ou encore l'extraction par solvants organiques permettent de récupérer certains composants thermosensibles ou fixés dans des matrices végétales plus denses.

Selon Bruneton (1999), les huiles essentielles — également désignées sous les noms d'essences végétales ou d'huiles volatiles — sont des produits hautement dynamiques sur le plan chimique. Leur composition peut varier selon plusieurs facteurs: espèce végétale, terroir, moment de récolte, méthode d'extraction et conditions de stockage. Elles renferment des dizaines, voire des centaines de molécules actives, regroupées principalement en monoterpènes, sesquiterpènes, esters, alcools, aldéhydes ou encore phénols, qui leur confèrent des propriétés bioactives multiples.

En accord avec la norme AFNOR NF T75-006, les huiles essentielles sont définies comme étant des produits volatils, obtenus par distillation à la vapeur ou par des procédés mécaniques appropriés à partir de matières premières végétales. Les huiles issues des zestes d'agrumes, par exemple, sont obtenues par pression à froid, puis séparées de l'eau de végétation par des méthodes physiques classiques [50]. Cette définition rigoureuse permet une standardisation et une reconnaissance internationale du statut des huiles essentielles, tant dans le domaine pharmaceutique que cosmétique et agroalimentaire.

## **2.2. Fonctions physiologiques et écologiques des huiles essentielles dans les plantes**

Le rôle biologique des huiles essentielles (HE) dans les plantes est encore sujet à débat et à recherches approfondies. Bien que leur fonction exacte n'ait pas été entièrement élucidée, il est largement admis qu'elles participent à divers mécanismes de régulation et de défense naturelle.

Ces substances aromatiques, synthétisées dans des structures spécialisées telles que les glandes sécrétrices, les trichomes ou les canaux oléifères, remplissent des fonctions écologiques multiples. L'un des rôles majeurs attribués aux HE est la protection contre les

agressions biotiques : elles agissent comme des répulsifs envers les insectes phytophages, les herbivores et certains pathogènes, contribuant ainsi à limiter les pertes de biomasse végétale.

Par ailleurs, certaines HE possèdent des effets attractifs qui favorisent la pollinisation. Elles interviennent comme des signaux olfactifs pour les insectes pollinisateurs, assurant ainsi la reproduction de l'espèce végétale concernée. Ce rôle de messagerie chimique participe à la stratégie adaptative de nombreuses plantes à fleurs.

Les HE ont aussi une fonction antimicrobienne et antifongique. Leur activité antiseptique aide à protéger les racines et le système aérien contre l'installation de micro-organismes pathogènes. Elles peuvent ainsi moduler la composition du microbiote du sol, ce qui influence indirectement la santé et la croissance de la plante [51].

Enfin, certaines études suggèrent que les HE participeraient à la régulation des interactions interspécifiques, notamment via des effets allélopathiques. Ces derniers permettent à la plante de libérer des composés volatils dans son environnement immédiat pour inhiber la germination ou le développement de plantes concurrentes.

### **2.3. Modes d'utilisation des huiles essentielles**

Les huiles essentielles (HE), de par leur richesse en composés bioactifs volatils, peuvent être administrées selon différentes voies, chacune répondant à un objectif thérapeutique ou préventif précis. Leur polyvalence pharmacologique et leur forte biodisponibilité justifient une diversité de modes d'utilisation.

#### **a. Voie respiratoire**

Ce mode d'administration exploite la volatilité naturelle des HE. Il inclut plusieurs techniques :

*Diffusion aérienne:* par nébulisation à l'aide de diffuseurs, les HE sont dispersées dans l'atmosphère ambiante. Cette méthode est largement utilisée en aromathérapie pour purifier l'air, créer une ambiance apaisante ou combattre les affections respiratoires bénignes [52].

*Inhalation sèche:* quelques gouttes d'HE sont appliquées sur un mouchoir ou un tissu, permettant une inhalation directe et discrète, notamment en milieu urbain ou professionnel.

*Inhalation humide*: elle consiste à verser 5 à 6 gouttes d'HE dans un mélange alcoolisé, puis à ajouter de l'eau chaude pour produire des vapeurs à inhaler sous une serviette. Cette méthode favorise la décongestion des voies respiratoires supérieures.

### **b. Aérosolthérapie**

Réservée au cadre médical, l'administration par aérosol permet de cibler précisément les voies respiratoires inférieures (bronches, sinus) à l'aide de dispositifs spécialisés. Ce mode est employé pour traiter des affections sévères comme la bronchite chronique ou la sinusite aiguë.

### **c. Voie orale**

Utilisée principalement pour les affections internes (digestives, urinaires, respiratoires), cette voie nécessite impérativement une dilution préalable dans un excipient compatible, tel que le miel ou une huile végétale.

L'administration sublinguale est recommandée pour une absorption rapide, par exemple en cas de maux de gorge [53] ;[52].

### **d. Voie cutanée**

Les HE peuvent être absorbées par la peau après dilution dans une huile porteuse (amande douce, jojoba, etc.).

Cette voie est utilisée en friction ou massage pour soulager les douleurs musculaires ou articulaires, en compresses pour les inflammations localisées, et en bains aromatiques pour la détente, le sommeil ou les affections dermatologiques légères.

### **e. Voie rectale**

Souvent choisie en pédiatrie ou pour les patients souffrant de troubles digestifs, cette voie d'administration permet une absorption rapide sans passage gastrique, généralement sous forme de suppositoires formulés à base d'HE diluées.

### **f. Gargarisme et bain de bouche**

Indiqué pour les affections bucco-pharyngées (gingivite, angine), ce mode consiste à diluer quelques gouttes d'HE dans un dispersant, puis à effectuer un bain de bouche sans ingestion [53]. Il favorise la désinfection locale tout en apaisant les muqueuses.

## **2.4. Domaines d'application des huiles essentielles**

Les huiles essentielles, en raison de leur composition biochimique riche en molécules volatiles actives, possèdent une polyvalence d'usage remarquable. Elles sont largement exploitées dans plusieurs secteurs industriels :

### **a. Industrie agroalimentaire**

Dans le domaine agroalimentaire, les huiles essentielles sont valorisées à la fois comme agents aromatiques naturels et comme conservateurs antimicrobiens. Grâce à leur richesse en composés terpéniques et phénoliques, elles apportent des arômes distinctifs aux préparations culinaires tout en prolongeant la durée de conservation des denrées.

Par exemple, l'ajout d'huile essentielle de thym, de laurier ou de romarin dans les graisses animales (smen) permet d'en préserver les propriétés organoleptiques tout en évitant le rancissement [54].

Leur action antiseptique naturelle en fait également des alternatives potentielles aux additifs chimiques de synthèse dans les aliments transformés.

### **b. Industrie de la parfumerie et des cosmétiques**

Les huiles essentielles sont des matières premières emblématiques de la parfumerie fine et des soins corporels. Elles représentent jusqu'à 60 % des composants actifs dans certaines formulations [55]. Exploitées pour leur fragrance, mais aussi pour leurs propriétés tonifiantes, antiseptiques, cicatrisantes ou relaxantes, elles entrent dans la composition de parfums et eaux de toilette (ex. : lavande, jasmin, citronnelle), produits capillaires (shampoings, lotions antipelliculaires), dentifrices et bains de bouche, crèmes et baumes pour la peau. Les huiles essentielles sont également appréciées pour leur capacité à pénétrer la barrière cutanée grâce à leurs composants lipophiles (notamment les monoterpènes), favorisant ainsi une action en profondeur dans les tissus épidermiques.

### **c. Industrie pharmaceutique**

En pharmacologie, les huiles essentielles occupent une place centrale en aromathérapie, discipline utilisant les essences végétales à des fins préventives ou curatives. Elles sont incorporées dans divers produits de santé naturels tels que les tisanes médicinales (ex.: verveine, menthe, thym), les sirops expectorants ou antiseptiques, les gélules ou suppositoires pour usage interne ou rectal, les solutions de gargarisme ou sprays bucco-pharyngés.

Grâce à leur lipophilie, elles traversent aisément les membranes biologiques, assurant une biodisponibilité efficace par voie cutanée, respiratoire ou digestive [56]. Plusieurs études mettent en avant leur activité antimicrobienne, antifongique ou encore anti-inflammatoire, justifiant leur intégration croissante dans les médecines alternatives ou complémentaires.

## **2.5. Techniques d'extraction des huiles lipidiques d'algues**

Dans le cadre de cette étude, l'extraction des fractions lipidiques de la spiruline (*Arthrospira platensis*) a été réalisée à l'aide de la méthode de Soxhlet, une technique de référence dans le domaine de l'extraction solide-liquide.

Cette méthode est couramment utilisée pour extraire les lipides des matrices végétales ou algales sèches, grâce à son efficacité à isoler les composés hydrophobes présents en faible concentration.

### **a. Principe de la méthode Soxhlet**

Le système Soxhlet repose sur une circulation cyclique du solvant, permettant une extraction continue et progressive des composés lipophiles. Il se compose de trois éléments principaux:

*Un ballon chauffant*: contient le solvant choisi pour l'extraction (ici, le n-hexane); *Un corps d'extraction*: accueille l'échantillon d'algue sèche enfermé dans une cartouche filtrante (papier cellulose ou manchon); *Un condenseur à reflux*: situé au sommet de l'appareil, il condense les vapeurs du solvant en gouttelettes qui retombent sur l'échantillon.

Le principe de fonctionnement de l'extracteur de Soxhlet repose sur un cycle d'évaporation et de condensation du solvant, permettant une extraction continue des composés lipidiques. Le solvant, chauffé à reflux dans un ballon, s'évapore puis se condense au contact d'un réfrigérant placé au sommet de l'appareil. Les condensats ainsi formés retombent goutte à goutte sur l'échantillon contenu dans une cartouche filtrante. En traversant la matière solide, le solvant dissout progressivement les lipides. Le mélange solvant-extrait s'accumule dans la

chambre d'extraction jusqu'à atteindre un volume critique, provoquant le déclenchement automatique du siphon qui ramène le liquide dans le ballon initial.

Ce processus se répète de manière cyclique, garantissant une extraction exhaustive et homogène des composés d'intérêt, sans nécessiter d'intervention manuelle.

### **b. Avantages de la méthode Soxhlet**

La méthode Soxhlet présente plusieurs avantages notables qui justifient son utilisation dans l'extraction des lipides issus de biomasses algales. Elle offre un rendement élevé, notamment grâce au renouvellement continu du solvant en contact avec l'échantillon solide, favorisant la solubilisation complète des composés lipophiles. De plus, elle repose sur un protocole standardisé, largement documenté, ce qui permet une reproductibilité fiable des résultats, même sur des matrices complexes comme les algues séchées.

Par ailleurs, cette technique est mise en œuvre avec un équipement couramment disponible dans les laboratoires de biotechnologie, ce qui en facilite l'adoption sans nécessiter de technologies coûteuses. Enfin, elle constitue une méthode précise pour l'évaluation quantitative des rendements lipidiques, essentielle dans les travaux de valorisation biotechnologique.

### **c. Inconvénients et limitations**

Malgré son efficacité, la méthode Soxhlet présente certaines limites techniques et pratiques qu'il convient de considérer dans le choix des protocoles expérimentaux. En premier lieu, l'extraction repose sur un chauffage prolongé du solvant, ce qui peut entraîner une dégradation thermique partielle de composés sensibles, notamment certains pigments, esters volatils ou antioxydants thermolabiles, compromettant ainsi la qualité de l'extrait. Par ailleurs, cette technique est relativement chronophage, chaque cycle complet pouvant durer plusieurs heures en fonction de la nature de l'échantillon et du volume de solvant requis.

Sa faible adaptabilité aux solvants mixtes ou instables chimiquement constitue également un frein, car elle nécessite des conditions de sécurité strictes pour éviter les pertes de composés ou les réactions indésirables. Enfin, l'extraction au Soxhlet implique une consommation énergétique non négligeable, liée au maintien d'une température constante tout au long du processus, ce qui peut représenter un facteur limitant dans les installations soucieuses d'efficacité énergétique.

#### d. Matériel et réactifs utilisés

Pour l'extraction des lipides contenus dans la spiruline, les équipements suivants ont été mobilisés (Voir Figure 10):

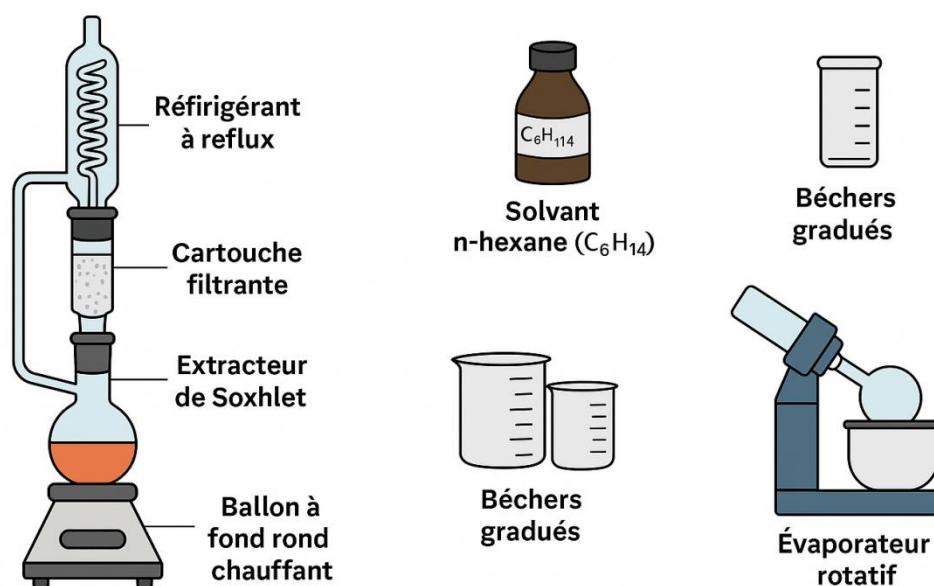


Figure 10: Dispositif et matériel utilisé pour l'extraction des lipides Soxhlet (Figure réalisée par l'encadrante Dr. KIES F à partir d'un protocole standardisé adapté à l'étude).

### 2.6. Rendement d'extraction des lipides et des composés volatils chez la spiruline

#### a. Potentiel lipidique de la spiruline

La spiruline (*Arthrospira platensis*), classée parmi les cyanobactéries filamenteuses, est principalement connue pour sa richesse exceptionnelle en protéines (60 à 70 % de sa matière sèche), en vitamines (B12, E, provitamine A) et en minéraux essentiels. Toutefois, au-delà de ces macronutriments, elle renferme également une fraction lipidique spécifique, bien que relativement modeste en quantité (généralement comprise entre 5 et 10 % de la matière sèche).

Cette fraction lipidique est principalement constituée d'acides gras polyinsaturés (notamment acide linoléique et acide  $\gamma$ -linoléique), de phospholipides membranaires, jouant un rôle crucial dans la fluidité cellulaire, de composés liposolubles bioactifs tels que les caroténoïdes (bêta-carotène, xanthophylles), et, dans certains cas, de composés aromatiques volatils, conférant à la biomasse des propriétés sensorielles et biologiques proches de celles des huiles essentielles végétales.

Bien que la spiruline ne soit pas traditionnellement considérée comme une source majeure d'huiles essentielles, certains extraits lipidiques obtenus par distillation ou extraction à froid révèlent la présence de composés volatils à activité biologique tels que des esters, des alcools et des aldéhydes, qui pourraient enrichir la valeur fonctionnelle de ses extraits.

La composition et la teneur en lipides de la spiruline dépendent de divers paramètres génétiques (variété ou souche utilisée), environnementaux (lumière, température, salinité du milieu de culture), mais aussi technologiques, notamment la méthode de séchage, le mode d'extraction et les solvants employés.

Ce potentiel lipidique, bien que modeste en termes quantitatifs par rapport à d'autres microalgues comme *Chlorella* ou *Nannochloropsis*, confère à la spiruline une valeur stratégique dans des domaines d'application émergents tels que la nutrition fonctionnelle (apports en acides gras essentiels), la cosmétique bioactive (formulations hydratantes et antioxydantes), et la pharmaceutique naturelle, notamment à travers l'intégration d'extraits lipidiques dans des compléments alimentaires ou des préparations aromathérapeutiques.

### **b. Méthodes d'extraction appliquées**

Parmi les différentes approches développées pour l'extraction des composés lipidiques à partir de microalgues telles que la spiruline (*Arthrospira platensis*), la méthode de Soxhlet constitue l'une des plus utilisées en laboratoire pour son efficacité, sa simplicité et sa reproductibilité. Cette technique repose sur un cycle thermodynamique fermé d'évaporation et de condensation du solvant, permettant une percolation continue à travers la biomasse. Le solvant organique utilisé, le n-hexane, est reconnu pour sa capacité à dissoudre efficacement les lipides en raison de sa polarité très faible, ce qui en fait un choix privilégié pour les matrices riches en composés hydrophobes.

Le procédé de Soxhlet permet ainsi une extraction quasi-complète des fractions lipidiques contenues dans la biomasse sèche de spiruline, notamment les acides gras, les esters et certains pigments liposolubles comme les caroténoïdes. Toutefois, la durée relativement longue du processus et l'exposition à une chaleur modérée mais constante peuvent altérer certains composés thermosensibles.

Face à ces limites, des techniques émergentes offrent des alternatives prometteuses. L'extraction assistée par ultrasons (UAE) en est un exemple notable. Elle consiste à soumettre

le mélange solvant/biomasse à une onde ultrasonore de haute fréquence, générant un phénomène de cavitation qui fragmente les parois cellulaires et améliore la libération des lipides intracellulaires. Cette approche permet non seulement de réduire significativement le temps de traitement, mais également d'augmenter le rendement d'extraction, tout en opérant à des températures plus douces, ce qui préserve l'intégrité des composés bioactifs.

Ainsi, la combinaison de ces méthodes ou leur adaptation selon les objectifs analytiques peut offrir un compromis entre exhaustivité de l'extraction, préservation des composés sensibles et efficacité énergétique. Ce choix méthodologique dépendra notamment du type de lipides recherchés, de la nature de la matrice algale et des contraintes du dispositif expérimental [57].

### **c. Rendements obtenus**

Dans le cadre de cette étude, des extractions lipidiques ont été effectuées à partir de deux échantillons de spiruline (*Arthrospira platensis*) récoltés localement dans les régions de Ouargla et de Tamanrasset, situées au sud de l'Algérie.

Ces zones sont caractérisées par des conditions climatiques arides, à fort ensoleillement, pouvant influencer la composition biochimique des cyanobactéries cultivées.

Les résultats obtenus ont révélé des rendements d'extraction lipidiques bruts de 8,14 % pour l'échantillon de Ouargla et de 6,78 % pour celui de Tamanrasset, calculés sur la base de la masse sèche initiale. Ces rendements, bien que modestes par rapport à ceux observés pour d'autres microalgues telles que *Spirogyra* sp. ou *Chlorella vulgaris* — dont les teneurs lipidiques peuvent atteindre 15 à 20 % selon certaines sources — sont néanmoins cohérents avec la nature intrinsèque de la spiruline, connue pour être plus riche en protéines qu'en lipides [58].

Plusieurs éléments peuvent expliquer cette variabilité interrégionale:

Les différences écologiques entre les deux sites (température moyenne, pH, salinité de l'eau) influencent la synthèse des acides gras dans la biomasse, La durée et la phase de croissance au moment de la récolte peuvent avoir un effet déterminant sur la teneur lipidique, notamment en période de stress environnemental, Les conditions post-culture, telles que le séchage et le stockage, jouent également un rôle dans la stabilité et la récupération des lipides, et Enfin,

l'efficacité de la méthode Soxhlet et la pureté du solvant utilisé (ici le n-hexane) sont des paramètres critiques dans la reproductibilité du rendement [57].

Il est important de noter que, bien que quantitativement inférieure, la qualité fonctionnelle des lipides extraits de la spiruline — en particulier leur profil en acides gras polyinsaturés et en pigments liposolubles — justifie leur valorisation dans les domaines nutraceutique, cosmétique et thérapeutique. Ces résultats encouragent la poursuite de recherches ciblées sur l'optimisation des rendements, notamment par le biais de techniques d'extraction verte ou d'amélioration des souches locales adaptées aux contraintes climatiques sahariennes [57].

#### **d. Facteurs influençant le rendement lipidique chez la spiruline**

Le rendement d'extraction des lipides à partir de la spiruline est un paramètre multifactoriel, conditionné à la fois par des facteurs biologiques, environnementaux et technologiques[57].

La variabilité observée dans les teneurs lipidiques peut être attribuée aux éléments suivants:

*Souche et origine géographique de la spiruline:* La composition biochimique de la spiruline, notamment sa teneur en acides gras, dépend étroitement de la souche utilisée. Des différences interspécifiques et même intraspécifiques existent entre les souches cultivées selon leur origine géographique.

Ces variations sont liées à l'adaptation génétique des souches aux conditions locales telles que la salinité, le rayonnement solaire ou la température ambiante. Ainsi, une souche provenant d'un bassin saharien à forte salinité peut produire un profil lipidique différent de celui d'une souche cultivée en climat tempéré [57].

*Conditions de culture:* Des facteurs tels que la température, l'intensité lumineuse, la salinité, le pH du milieu et la concentration en nutriments influencent fortement le métabolisme lipidique de la spiruline. Par exemple, un stress salin ou lumineux peut stimuler l'accumulation de certains acides gras polyinsaturés à visée protectrice.

Des études ont montré que la limitation en azote ou en phosphore dans le milieu de culture pouvait rediriger le métabolisme cellulaire vers la synthèse de lipides de réserve.

*Méthode d'extraction:* Le choix de la technique d'extraction influence directement le rendement obtenu. La méthode Soxhlet, bien qu'efficace, peut être surpassée par des techniques plus modernes telles que l'extraction assistée par ultrasons (UAE). Cette dernière favorise la rupture des membranes cellulaires par cavitation, libérant ainsi une plus grande quantité de lipides. Selon I.M. Rizwanul Fattah [57], l'utilisation combinée des ultrasons avec un solvant apolaire comme le n-hexane permet d'atteindre des rendements allant jusqu'à 9,4 %, soit une augmentation significative par rapport aux méthodes classiques.

*Moment de la récolte (stade de croissance):* Le stade physiologique de la spiruline au moment de la récolte conditionne sa composition en acides gras.

En phase exponentielle de croissance, la biomasse est majoritairement orientée vers la synthèse de protéines et de chlorophylle. En revanche, en phase stationnaire ou de sénescence, la cellule tend à accumuler des composés de réserve comme les lipides. Choisir une période de récolte optimale est donc essentiel pour maximiser le rendement lipidique et la qualité des extraits obtenus.

#### **e. Analyse et valorisation des extraits lipidiques**

Une fois les lipides extraits de la biomasse de spiruline, ils font l'objet d'une analyse approfondie permettant de caractériser leur composition chimique et d'évaluer leur potentiel d'application. La méthode de référence utilisée est la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS), qui offre une grande sensibilité et une excellente résolution pour l'identification des acides gras, esters, alcools et autres composés liposolubles présents dans l'extrait. Cette technique repose sur la séparation des molécules selon leur volatilité et leur masse, ce qui permet de dresser un profil détaillé des constituants lipidiques.

Ces extraits présentent une valeur ajoutée notable grâce à leur richesse en acides gras polyinsaturés (AGPI), en pigments liposolubles et en antioxydants naturels, leur conférant ainsi une polyvalence d'usage dans divers secteurs industriels. En nutrition, ils sont intégrés dans des formulations diététiques ou des compléments alimentaires pour leurs bénéfices cardiovasculaires et anti-inflammatoires.

En cosmétique, leurs propriétés antioxydantes, filmogènes et régénératrices en font des actifs prisés dans les soins hydratants, anti-âge ou apaisants. Enfin, en pharmaceutique, ces extraits

sont valorisés dans les approches naturelles, notamment en aromathérapie et phytothérapie, où leur efficacité biologique est exploitée pour développer des formulations bioactives à usage thérapeutique ou préventif. Ainsi, les lipides extraits de la spiruline ne se limitent pas à leur valeur énergétique, mais constituent de véritables ressources fonctionnelles à fort potentiel biotechnologique.

#### **f. Conclusion de la section**

Bien que les rendements lipidiques obtenus à partir de *Spirulina platensis* soient relativement modestes en comparaison avec ceux d'autres microalgues à haute teneur en graisses, la qualité biochimique remarquable de ses extraits en fait une ressource prometteuse pour de nombreuses applications industrielles à forte valeur ajoutée.

En effet, la richesse de la spiruline en acides gras essentiels, pigments antioxydants et composés volatils bioactifs confère à ses extraits lipidiques des propriétés fonctionnelles pertinentes dans les domaines de la nutrition humaine, de la cosmétologie naturelle et de la pharmacopée alternative.

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence une variabilité significative du rendement lipidique en fonction de l'origine géographique des souches, comme observé entre les échantillons de Ouargla et de Tamanrasset, soulignant le rôle crucial de l'adaptation environnementale. De plus, des facteurs tels que les conditions physico-chimiques du milieu de culture (lumière, température, salinité, nutriments), le moment de la récolte, ainsi que la méthode d'extraction employée influencent fortement la quantité et la qualité des lipides récupérés.

Ainsi, pour optimiser la valorisation biotechnologique de la spiruline dans un cadre industriel durable, il est essentiel d'adopter une approche intégrée, combinant la sélection de souches locales adaptées aux conditions climatiques extrêmes, la maîtrise des paramètres de culture afin de stimuler la biosynthèse lipidique, et l'amélioration des procédés d'extraction, en privilégiant des techniques innovantes et respectueuses des composés sensibles.

Cette stratégie de valorisation raisonnée ouvre la voie à une exploitation éco-innovante de la spiruline algérienne, en cohérence avec les objectifs de transition bioéconomique et de développement territorial durable.

## PARTIE II. PARTIE EXPÉRIMENTALE

### Chapitre III. Matériel et Méthodes

#### 1. Matériel biologique : Spiruline (*Arthrospira platensis*)

Le matériel biologique utilisé dans cette étude est constitué de spiruline, une cyanobactérie filamenteuse de couleur bleu-vert appartenant au genre *Arthrospira*. Elle est reconnue pour sa richesse exceptionnelle en protéines complètes (composées de tous les acides aminés essentiels), mais aussi pour sa teneur élevée en vitamines liposolubles (A, D, E, K) et hydrosolubles (*complexes B*), en pigments antioxydants (*phycocyanine*, *chlorophylle*, *bêta-carotène*) ainsi qu'en oligo-éléments et sels minéraux (fer, calcium, magnésium, zinc).

L'échantillon de spiruline utilisé dans cette expérimentation provient de la ferme aquacole biologique Al Kiram, située dans la région de Loutayah, dans la wilaya de Biskra (Sud-Est algérien). Cette ferme, à vocation agro-aquacole intégrée, repose sur un modèle de production durable combinant agriculture et aquaculture circulaire. Elle est considérée comme la plus grande unité de production de spiruline biologique en Afrique du Nord, avec une capacité annuelle projetée de 10 tonnes de biomasse sèche, destinée à des usages alimentaires, cosmétologiques, nutraceutiques et scientifiques (Figure 11).



Figure 11: Échantillon de la spiruline AL kiram (photo prise par Adda Nawel)

La spiruline y est cultivée dans des bassins à ciel ouvert, selon un protocole sans engrais chimiques ni pesticides, en respect des standards de certification biologique (*Bio*).






Les conditions environnementales de la région (ensoleillement intense, températures élevées, faible humidité) sont particulièrement favorables à une production photosynthétique efficace, influençant positivement la composition biochimique de la spiruline, notamment sa teneur en pigments et en lipides d'intérêt (Figure 12).



Figure 12: Carte de localisation de la ferme aquacole Al Kiram (Loutayah, Biskra, Algérie)

Le matériel utilisé au laboratoire :

Tableau 5: Matériel de laboratoire utilisé

Agitateur magnétique	Homogénéiser les mélanges 
Balance analytique	Peser précisément les échantillons et réactifs 
Centrifugeuse	Séparer les phases solide/liquide après extraction 
Spectrophotomètre UV-visble	
Verrerie (bêchers, erlenmeyers, éprouvettes, entonnnoirs, pipettes)	Manipuler, stocker et mesurer les solutions 

## 1.1. Méthodes d'extractions

### a. Préparation des extraits aqueux de spiruline

Dans un premier temps, une solution a été préparée en dissolvant 10 g de spiruline dans 200 mL d'eau distillée. Toutefois, cet extrait s'est révélé trop concentré, rendant les analyses spectrophotométriques peu fiables.

Pour pallier cet inconvénient, une deuxième préparation a été effectuée avec 1 g de spiruline dans 200 mL d'eau distillée. Cette dilution a permis d'obtenir un extrait plus clair, mieux adapté aux analyses ultérieures, et a donc été retenue pour le reste des expériences (Figure 13).

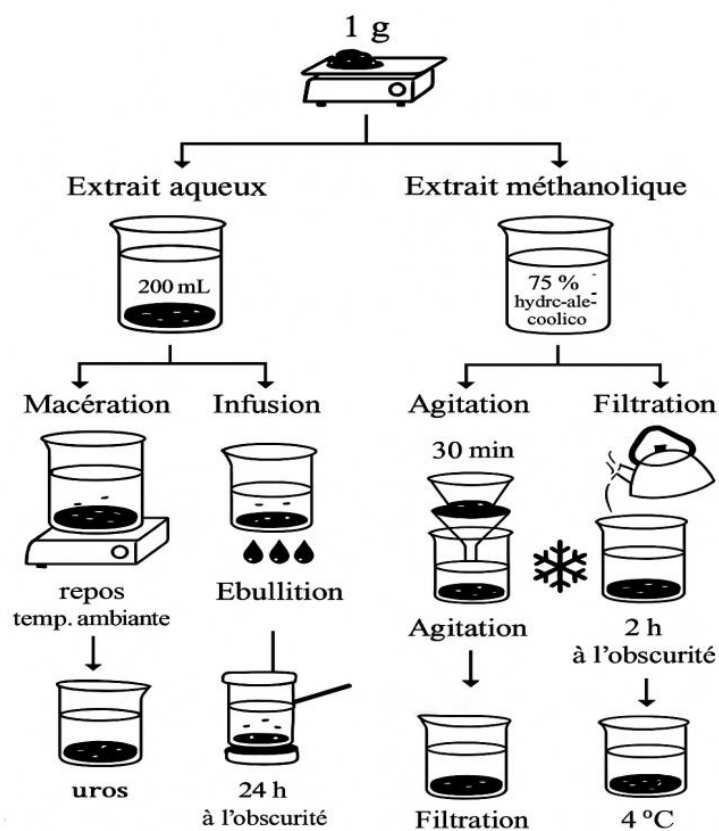


Figure 13: Illustration du Protocole d'extraction de composés hydrosolubles et méthanolosolubles à partir de 1g de spiruline (Designed by Kies, F)

### b. Méthodes d'extraction aqueuse utilisées

Trois techniques d'extraction ont été envisagées en vue d'optimiser la récupération des composés hydrosolubles de la spiruline, notamment la vitamine C:

*Macération:* La macération consiste à immerger une biomasse de spiruline dans 200 mL d'eau distillée à température ambiante. Ce procédé doux permet l'extraction des composés hydrosolubles (protéines, vitamines, minéraux) sans altération thermique. Le mélange est agité à l'aide d'un agitateur magnétique pendant une durée déterminée, puis centrifugé pour séparer l'extrait liquide du résidu solide.

*Infusion:* L'infusion constitue une méthode douce d'extraction, particulièrement adaptée à la préservation des molécules thermosensibles, telles que les vitamines. Dans ce protocole, une quantité préalablement pesée de biomasse spirulinique est mise en contact avec un mélange chaud d'eau distillée et de méthanol, sans toutefois atteindre le point d'ébullition.

Le mélange est ensuite laissé en repos pendant deux heures, sans agitation thermique prolongée, afin de permettre une libération progressive des composés solubles. Cette méthode, respectueuse de l'intégrité structurale des substances fragiles, aboutit à un extrait qui est ensuite filtré soigneusement, après regroupement des fractions, pour éliminer les résidus solides et obtenir une solution limpide prête à l'analyse.

*Décoction:* Dans le cadre de nos expériences, nous avons utilisé la méthode d'ébullition prolongée de la spiruline dans l'eau. Toutefois, cette approche s'est révélée peu adaptée en raison de la dégradation significative des composés thermosensibles, notamment la vitamine C, certaines enzymes, ainsi que la phycocyanine, pigment caractéristique de la spiruline

### **c. Préparation dun extrait méthanolique à partir de la spiruline**

Dans cette phase du protocole expérimental, un solvant méthanolique a été privilégié pour optimiser l'extraction des composés bioactifs contenus dans la biomasse spirulinique. En particulier, l'association de méthanol et d'eau distillée, dans une proportion volumique de 5/8 pour le méthanol, s'est avérée judicieuse pour extraire efficacement des substances polaires telles que les vitamines, les pigments, et certains polyphénols .

#### *Modes opératoires*

La préparation de la solution extractive s'est faite par mélange d'eau et de méthanol, ce dernier représentant environ 62,5 % du volume total du solvant.

Un échantillon pesé de biomasse de spiruline a été introduit dans ce solvant, à raison de moins de 1% du volume total du milieu d'extraction. Le mélange obtenu a été soumis à une agitation modérée pendant une période relativement courte, afin de favoriser l'extraction initiale.

*Deux modalités d'extraction ont ensuite été testées:*

Une macération à température ambiante, protégée de la lumière, pendant une journée complète, Et, à titre comparatif, une infusion douce d'une durée équivalente à environ 8% d'une journée, afin d'évaluer l'effet d'un temps réduit sur la stabilité des composés. À l'issue de l'extraction, le mélange a été soumis à un double processus de clarification:

- ✓ Première séparation par force centrifuge pour éliminer la phase solide.
- ✓ Filtration gravitationnelle sur papier pour obtenir un extrait limpide.

L'extrait brut obtenu a été conditionné dans des contenants opaques et stabilisé à basse température (juste au-dessus du point de congélation de l'eau) afin de préserver son intégrité chimique jusqu'à son analyse.

## **2. Analyse de la vitamine C**

### **2.1 Méthode de dosage de l'acide ascorbique**

Les vitamines hydrosolubles, telles que l'acide ascorbique (vitamine C), peuvent être quantifiées à l'aide de plusieurs techniques analytiques basées sur des principes physico-chimiques ou biochimiques.

Dans ce travail, l'accent a été mis sur une méthode colorimétrique reposant sur l'absorption spectrale de la molécule d'intérêt, conformément aux recommandations de la littérature [60].

#### **a. Quantification par spectrophotométrie UV-Visible**

La spectrophotométrie UV-visible a été retenue pour sa précision et sa sensibilité dans la détection de l'acide ascorbique, notamment à des concentrations faibles, comme celles présentes dans les extraits spiruliniques.

L'appareil utilisé est un spectrophotomètre OPTIZEN POP 2, modèle 2.2.2.10 (Figure 14).



Figure 14: Spectrophotomètre UV-visible utilisé dans l'analyse (source : laboratoire interne)

## 2.2 Dosage spectrophotométrique:

### a. Préparation des solutions étalons

Une série de solutions étalons d'acide ascorbique a été obtenue par dilutions séquentielles à partir d'une solution mère de concentration connue. Le protocole suivi comprend (Figure 15):

- ✓ Introduction de 9 mL d'eau distillée dans une série de tubes à essai.
- ✓ Addition de 1 mL de solution mère dans le premier tube → solution S1 (dilution 1/10).
- ✓ Transfert de 1 mL de S1 dans un second tube contenant à nouveau 9 mL d'eau distillée → solution S2 (dilution 1/100), et ainsi de suite.

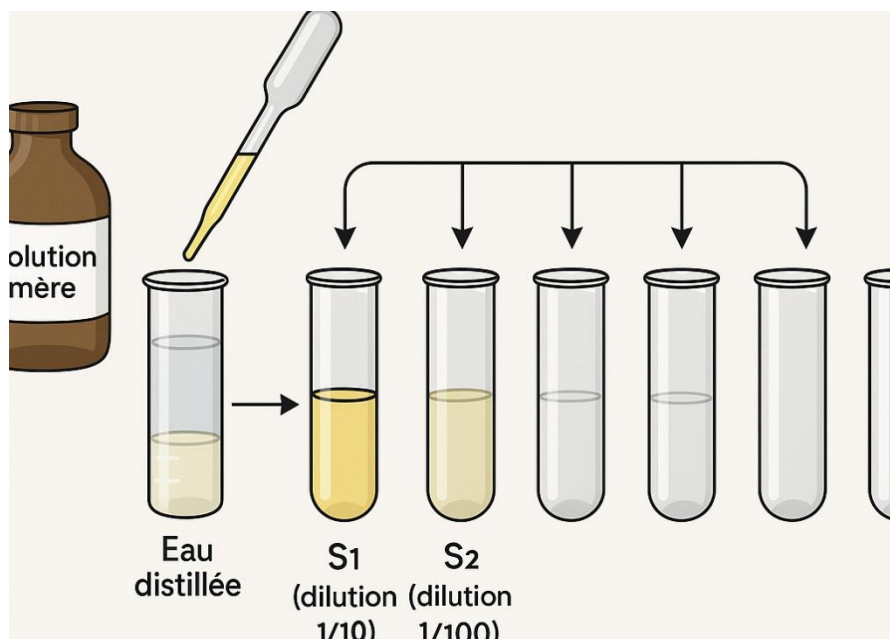


Figure 15: Une série de solutions étalons d'acide ascorbique

## **b. Mesures spectrophotométriques**

- ✓ Les mesures d'absorbance ont été conduites conformément aux étapes suivantes:
- ✓ Étalonnage du spectrophotomètre avec de l'eau distillée comme blanc.
- ✓ Acquisition des spectres d'absorption de chaque solution étalon entre 200 et 300 nm.
- ✓ Identification de la longueur d'onde d'absorption maximale ( $\lambda_{\max}$ ).
- ✓ Mesure de l'absorbance à  $\lambda_{\max}$  pour toutes les solutions de la gamme.

## **c. Construction de la courbe d'étalonnage**

Les données d'absorbance ont été corrélées aux concentrations connues des étalons. Une régression linéaire a permis de générer la courbe d'étalonnage, conformément à la *loi de Beer-Lambert* :  $A = \epsilon l \cdot C$

où A est l'absorbance,  $\epsilon$  le coefficient d'extinction molaire, l la longueur de la cuve (en cm), et C la concentration.

## **d. Dosage des extraits de spiruline**

- ✓ Les extraits spiruliniques ont été analysés dans des conditions expérimentales strictement identiques, selon le protocole suivant :
- ✓ Lecture de l'absorbance à la longueur d'onde maximale ( $\lambda_{\max}$ ) caractéristique de l'acide ascorbique
- ✓ Détermination des concentrations en acide ascorbique par interpolation sur la courbe d'étalonnage

## **e. Vérification de la linéarité**

La relation entre les concentrations en acide ascorbique et les valeurs d'absorbance a montré une linéarité conforme à la *loi de Beer-Lambert*. La droite d'étalonnage obtenue a présenté un coefficient de corrélation  $R^2$  supérieur à 0,99, validant la précision du modèle pour le dosage.

## **f. Précision du dosage des échantillons**

L'interpolation sur la courbe d'étalonnage a permis de calculer avec exactitude les concentrations en acide ascorbique dans les extraits. L'écart entre les mesures répétées est resté faible, attestant d'une excellente reproductibilité du protocole utilisé.

### **g. Évaluation de la sensibilité de la méthode**

La méthode a démontré une sensibilité suffisante pour détecter de faibles teneurs en vitamine C. Les limites de détection (LOD) et de quantification (LOQ), estimées selon les normes de validation analytique, confirment son efficacité dans le cadre de dosages de routine.

### **h. Les avantages de la methods:**

Reposant sur l'absorption UV spécifique de l'acide ascorbique (265–270 nm), cette méthode offre plusieurs avantages :

- ✓ Simplicité de mise en œuvre, sans nécessité d'équipements sophistiqués
- ✓ Rapidité d'exécution, compatible avec des cadences analytiques élevées
- ✓ Fiabilité et robustesse, démontrées par la reproductibilité des résultats
- ✓ Adaptabilité, pouvant s'étendre à d'autres extraits végétaux hydrosolubles

### **i. Dosage iodométrique de l'acide ascorbique**

#### ***Principe de la méthode***

Le dosage iodométrique repose sur le pouvoir réducteur de l'acide ascorbique, capable de réduire le diiode ( $I_2$ ) en ions iodure ( $I^-$ ) selon une réaction stœchiométrique de type oxydoréduction, avec un rapport molaire de 1:1. L'équation simplifiée est la suivante :



L'empois d'amidon (1 %) est utilisé en tant qu'indicateur visuel : en présence d'iode libre, il forme un complexe bleu foncé, marquant l'atteinte du point équivalent lors du titrage.

#### ***Préparation des solutions***

##### **a) Préparation de la solution iodée**

La solution de diiode ( $I_2$ ) a été préparée selon un protocole rigoureux afin d'assurer une concentration stable et reproductible :

*Quantité de matière* : 5,00 g de diiode solide ont été pesés avec précision à l'aide d'une balance analytique.

*Solubilisation* : Le diiode a été introduit dans une fiole contenant 50 mL d'eau distillée. L'agitation a été maintenue en continu à température ambiante afin de favoriser la dissolution complète.

*Filtration* : Une fois le diiode dissous, la solution a été filtrée sur papier filtre afin d'éliminer les éventuelles particules résiduelles ou impuretés insolubles.

*Standardisation* : La solution a ensuite été standardisée à une concentration exacte de 0,01 mol/L (0,01 M), en conformité avec les exigences du titrage iodométrique. Cette étape permet d'assurer la justesse des dosages effectués sur les extraits.

### ***b) Préparation de l'empois d'amidon (indicateur visuel)***

L'empois d'amidon utilisé comme indicateur colorimétrique a été préparé selon les étapes suivantes :

*Concentration cible* : Une solution à 1 % a été visée (1 g d'amidon soluble dans 100 mL d'eau).

*Dissolution thermique* : L'amidon a d'abord été dispersé dans une petite quantité d'eau froide pour éviter la formation de grumeaux, puis versé lentement dans de l'eau portée à ébullition.

*Agitation continue* : L'ensemble a été maintenu sous agitation pendant 2 à 3 minutes pour assurer une gélification homogène et la complète solubilisation.

*Refroidissement* : La solution a été laissée à température ambiante jusqu'à refroidissement complet, afin d'éviter toute altération lors de son ajout dans les échantillons titrés.

Cette solution indicatrice permet la formation d'un complexe bleu foncé intense au contact de l'iode libre, marquant visuellement le point d'équivalence de la réaction.

### **j. Protocole expérimental**

Les extraits de spiruline, obtenus par macération, ont été titrés selon le protocole suivant :

*Volume prélevé* : 2 mL d'extrait introduits dans un tube à essai

*Indicateur* : ajout de 3 gouttes d'empois d'amidon à 1 %

*Titration* : ajout progressif de la solution iodée (0,01 M) jusqu'à apparition d'une teinte bleu-violet stable

*Témoin* : un échantillon blanc contenant uniquement l'empois d'amidon a été utilisé à des fins de contrôle

Chaque échantillon a été titré en triplicat pour évaluer la reproductibilité.

### **k. Calculs et traitement des résultats**

Les concentrations d'acide ascorbique ont été calculées à partir des volumes de solution iodée consommés, en tenant compte :

- ✓ De la masse molaire de l'acide ascorbique (176,12 g/mol)
- ✓ De la concentration exacte de la solution titrante
- ✓ De la relation stœchiométrique 1:1

### **l. Analyse critique de la méthode**

L'évaluation du protocole de dosage de la vitamine C par titrage iodométrique a mis en évidence plusieurs qualités analytiques, mais également quelques limites à considérer dans le contexte de matrices complexes comme la spiruline :

***Simplicité et accessibilité de la méthode:*** La méthode se distingue par sa facilité de mise en œuvre. Elle ne nécessite ni instrumentation sophistiquée ni réactifs coûteux, ce qui la rend parfaitement adaptée aux laboratoires d'enseignement ou aux structures analytiques disposant d'équipements de base.

Les opérations de titrage peuvent être réalisées avec une verrerie conventionnelle et des solutions standardisées.

***Fiabilité visuelle du point équivalent:*** L'utilisation de l'empois d'amidon comme indicateur colorimétrique apporte un avantage considérable. L'apparition d'une coloration bleu foncé persistante au point d'équivalence constitue un repère clair, permettant de stopper le titrage avec une bonne précision visuelle, même sans instrumentation optique.

***Sensibilité satisfaisante:*** La réaction d'oxydoréduction entre l'acide ascorbique et le diiode est suffisamment sensible pour détecter et quantifier de faibles concentrations en acide ascorbique, ce qui convient à des extraits naturels faiblement dosés. Le protocole peut ainsi être employé pour le suivi qualitatif ou semi-quantitatif de formulations nutritionnelles.

**Limites liées aux interférences:** Cependant, la spécificité de la méthode peut être affectée par la présence de composés réducteurs non ciblés (tels que certains polyphénols ou pigments spiruliniques oxydables) qui réagissent également avec le diiode, faussant ainsi la quantification réelle de la vitamine C.

Ce biais potentiel doit être pris en compte, en particulier dans les extraits végétaux riches en antioxydants.

**Reproductibilité et robustesse expérimentale:** La reproductibilité a été validée par des mesures répétées (triplicat) qui ont montré une faible variabilité inter-échantillon. Cette stabilité des résultats confirme la robustesse du protocole en conditions de laboratoire, malgré la complexité chimique de la spiruline.

### **m. Préparation de la solution iodée**

Pour la préparation de la solution titrante, 5 g de diiode ( $I_2$ ) ont été dissous dans 50 mL d'eau distillée, sous agitation continue jusqu'à dissolution complète.

La solution obtenue a ensuite été filtrée afin d'éliminer toute impureté particulaire. Cette solution a été utilisée après standardisation à 0,01 M, conformément aux exigences du protocole de dosage iodométrique.

### **n. Observations colorimétriques lors du titrage**

Le titrage a été appliqué à deux types d'extraits spiruliniques (Figure 16):

- ✓ Extrait par macération
- ✓ Extrait par décoction
- ✓ Extrait par infusion

Au cours du titrage, l'extrait issu de la macération, ainsi que celui obtenu par infusion, ont développé une coloration violette au point d'équivalence, après formation du complexe iode-amidon.

En revanche, l'extrait de décoction a donné une coloration bleu-vert foncé, légèrement atypique. Cette différence visuelle peut résulter de la présence de pigments thermostables dégradés, tels que la phycocyanine oxydée, ou d'éventuelles interactions secondaires entre les produits de dégradation thermique et l'iode.

Ces variations chromatiques peuvent constituer un indicateur qualitatif des composés résiduels présents dans les extraits, en particulier ceux affectés par la température (vitamines thermolabiles, pigments, enzymes...).

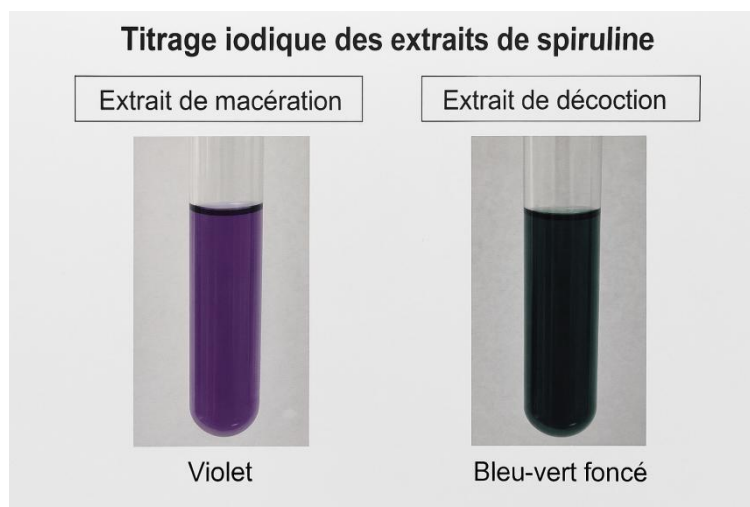


Figure 16: Comparaison des extraits spiruliniques par titrage iodométrique

La figure 16 montre les colorations révélées lors du dosage iodométrique des extraits spiruliniques obtenus par macération, infusion, et décoction, à partir de deux quantités de biomasse (1 g et 10 g). L'apparition d'une teinte violette (macération/infusion) indique une réaction typique avec l'iode, tandis que la nuance bleu-vert plus foncée de l'extrait de décoction suggère la présence de pigments ou de métabolites thermodégradés.

### 3. Extraction des huiles essentiels

#### 3.1. Extraction des huiles essentiels de la spiruline par Soxhlet avec n-hexane

##### a. Principe de la méthode

L'extraction des composés lipophiles de la spiruline a été réalisée à l'aide de la méthode de Soxhlet, technique d'extraction solide-liquide largement utilisée pour l'isolement de lipides à partir de matrices biologiques [59], cette méthode repose sur un cycle continu de distillation et de reflux du solvant permettant une extraction exhaustive des composés hydrophobes.

Dans ce procédé, la spiruline réduite en poudre est placée dans une cartouche cellulosique, elle-même insérée dans le compartiment d'extraction du dispositif Soxhlet. Le solvant — ici le n-hexane — est chauffé jusqu'à ébullition dans le ballon inférieur.

Les vapeurs montent vers le condenseur où elles se liquéfient puis ruissellent sur l'échantillon, entraînant les lipides vers le ballon par siphonage successif (Figure 17).



Figure 17: Montage de l'extracteur Soxhlet

utilisé pour l'extraction des huiles essentielles de spiruline Photographie réalisée au laboratoire montrant le dispositif complet : ballon chauffant, extracteur Soxhlet, condenseur à reflux, cartouche d'échantillon et système de récupération du solvant.

## **b. Protocole expérimental**

### *Préparation de l'échantillon*

- ✓ 10 g de spiruline en poudre ont été pesés avec précision à l'aide d'une balance analytique.
- ✓ L'échantillon a ensuite été introduit dans une cartouche filtrante en cellulose, correctement fermée aux extrémités.

### *Préparation du montage Soxhlet*

- ✓ Un ballon rond vide a été préalablement pesé pour permettre la quantification gravimétrique post-extraction.

- ✓ 250 mL de n-hexane ont été versés dans le ballon, qui a ensuite été raccordé à l'extracteur Soxhlet.

#### *Cycle d'extraction*

- ✓ Le système a été mis en place sur un chauffe-ballon et maintenu à une température contrôlée (environ 45–50 °C) à l'aide d'un bain-marie.
- ✓ Le reflux du solvant s'est poursuivi pendant plusieurs heures (~4–6 h), jusqu'à saturation du solvant en composés lipidiques.

#### *Évaporation du solvant et récupération des lipides*

- ✓ À l'issue de l'extraction, le contenu du ballon a été transféré dans un rotavapor pour évaporation complète de l'hexane.
- ✓ Le résidu lipidique récupéré a été pesé pour estimer le rendement d'extraction en % par rapport à la masse sèche initiale.

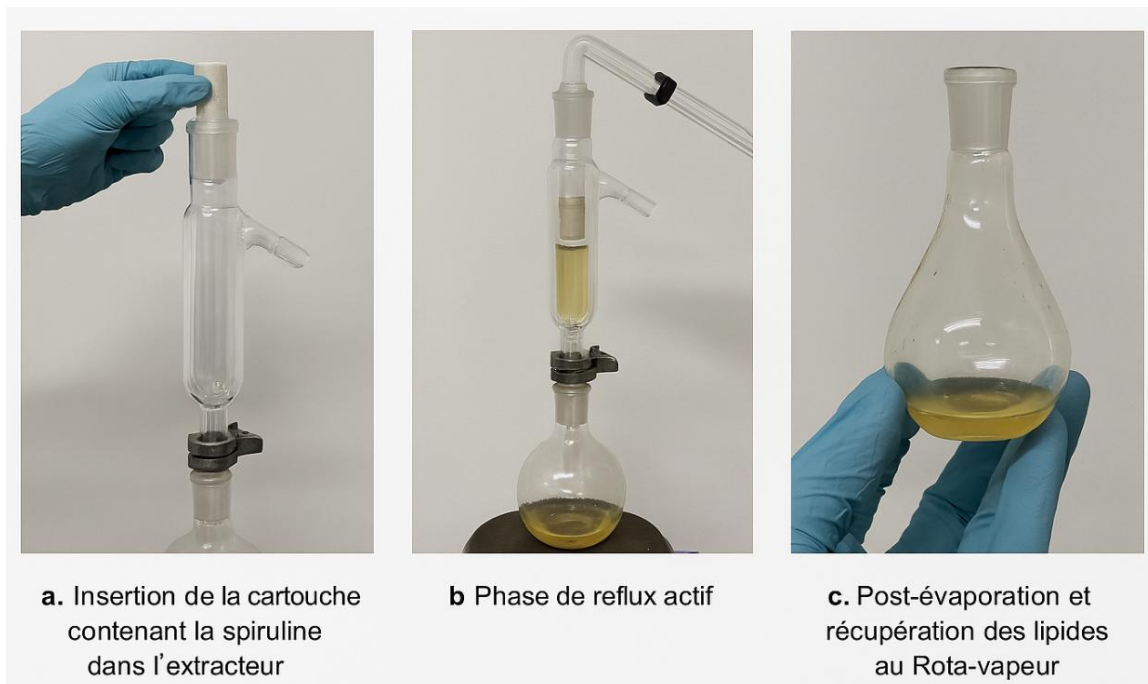


Figure 18: Étapes expérimentales de l'extraction au Soxhlet

## Chapitre IV. Résultats et discussions

### 1. Décoction de 10 g de spiruline

Dans cette expérimentation, l'extrait aqueux issu de la décoction de 10 g de spiruline a été analysé par spectrophotométrie UV, et les absorbances mesurées ont été comparées à celles du blanc (eau distillée) à différentes longueurs d'onde, comme présenté dans la figure 19 ci-dessous :

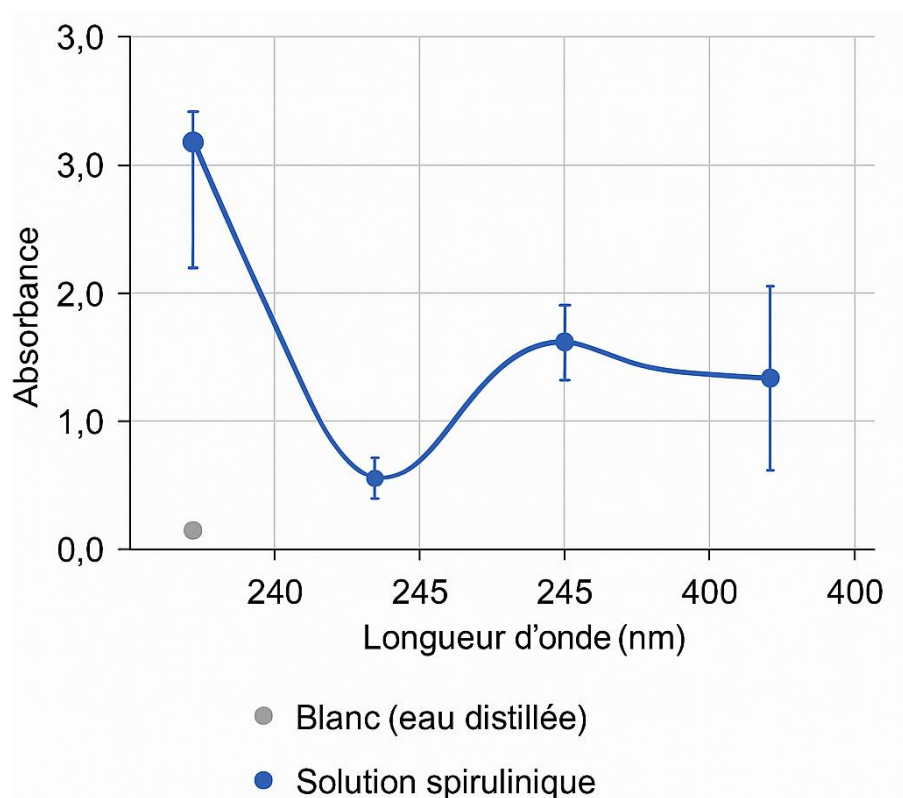


Figure 19: Profil spectral UV de l'extrait aqueux de spiruline (décoction, 10 g)

#### 1.1. Analyse critique des longueurs d'onde sélectionnées

##### a) À 245 nm – Absorbance théorique de l'acide ascorbique en milieu acide

Selon la littérature, l'acide ascorbique présente un maximum d'absorbance autour de 245 nm lorsqu'il est dissous dans un milieu légèrement acide (par exemple HCl 0,01 N).

Cette longueur d'onde constitue donc un repère spectral clé pour confirmer sa présence. Cependant, dans les conditions de cette expérience:

- ✓ Le blanc (eau distillée) présente une absorbance anormalement élevée, ce qui suggère une contamination résiduelle, un mauvais rinçage de la cuve, ou une correction de base insuffisante.
- ✓ La solution testée atteint la saturation de l'appareil, ce qui rend toute tentative de quantification inexploitable à cette longueur d'onde.

Bien que 245 nm soit théoriquement la meilleure signature de la vitamine C, les conditions expérimentales (blanc biaisé + saturation) ne permettent ici aucune interprétation fiable. Cette donnée, pourtant déterminante, devient donc inopérante dans ce contexte.

#### **b) Lecture à 240 nm** – Zone d'absorption UV peu spécifique mais exploitable

À 240 nm, l'extrait de spiruline présente une absorbance modérée de 0,602, tandis que le blanc (eau distillée) affiche une valeur nulle ( $A = 0,000$ ). Cette absence d'interférence renforce la fiabilité du signal mesuré à cette longueur d'onde.

Ce pic, bien qu'exploitable pour une lecture semi-quantitative, demeure peu spécifique : il se situe dans une zone fréquentée par divers composés antioxydants ou phénoliques — dont l'acide ascorbique, mais aussi des métabolites de structure voisine.

En l'absence de mesure complémentaire à 265 nm (pic d'absorption de la vitamine C en milieu neutre), cette donnée reste compatible mais non concluante quant à la présence réelle d'acide ascorbique dans l'échantillon.

#### **c) À 190 nm et 400 nm** – Absorbances saturées

Aux longueurs d'onde extrêmes de 190 nm et 400 nm, la solution spirulinique présente une absorbance maximale de 3,000, atteignant ainsi la limite de détection de l'appareil.

À 190 nm, cette saturation est typique des matrices riches en composés organiques fortement absorbants, tels que les acides aminés, peptides, protéines solubles ou pigments hydrosolubles. Bien que cette zone puisse révéler une forte densité moléculaire, elle est également connue pour être peu spécifique, en raison du bruit de fond élevé et de multiples interférences dans les extraits complexes d'origine biologique.

À 400 nm, l'acide ascorbique n'absorbe normalement pas dans cette région du spectre visible.

La saturation observée suggère donc la présence probable de pigments thermodégradés (ex. : phycocyanine oxydée, chlorophylle dénaturée) ou d'un artefact technique, tel que des bulles, dépôts ou un mauvais alignement optique.

Dans les deux cas, les signaux obtenus sont saturés, non spécifiques et inexploités pour la recherche de vitamine C, ce qui limite leur utilité analytique dans ce contexte.

## **1.2. Interprétation et comparaison avec la littérature**

Selon plusieurs sources scientifiques, le maximum d'absorption de l'acide ascorbique se situe autour de 245 nm en milieu acide et 265 nm en milieu neutre.

Dans cette expérience, l'absence de mesure à 265 nm et la saturation du signal à 245 nm (accentuée par un blanc élevé) limitent la capacité à confirmer la présence d'acide ascorbique à partir de cet extrait.

Par ailleurs, l'emploi d'une forte concentration initiale (10 g dans 200 mL) semble avoir conduit à une saturation optique de l'échantillon, suggérant qu'une dilution supplémentaire serait nécessaire pour des mesures quantitatives fiables.

Seule la lecture à 240 nm semble exploitable pour déduire la présence potentielle de composés UV-actifs, dont pourrait faire partie la vitamine C.

L'extrait est trop concentré, ce qui entraîne une saturation fréquente des lectures (à 190, 245, 400 nm).

Une dilution supplémentaire de l'échantillon (par exemple 1:5 ou 1:10) et un élargissement de la gamme spectrale vers 265 nm (pic en milieu neutre) sont fortement recommandés pour confirmer la présence de l'acide ascorbique dans cet extrait.

L'usage combiné avec une autre méthode de validation (iodométrie, HPLC...) serait utile pour une confirmation croisée.

## **2. Macération de 10 g de spiruline**

### ***Analyse critique du spectre UV – Macération de 10 g de spiruline***

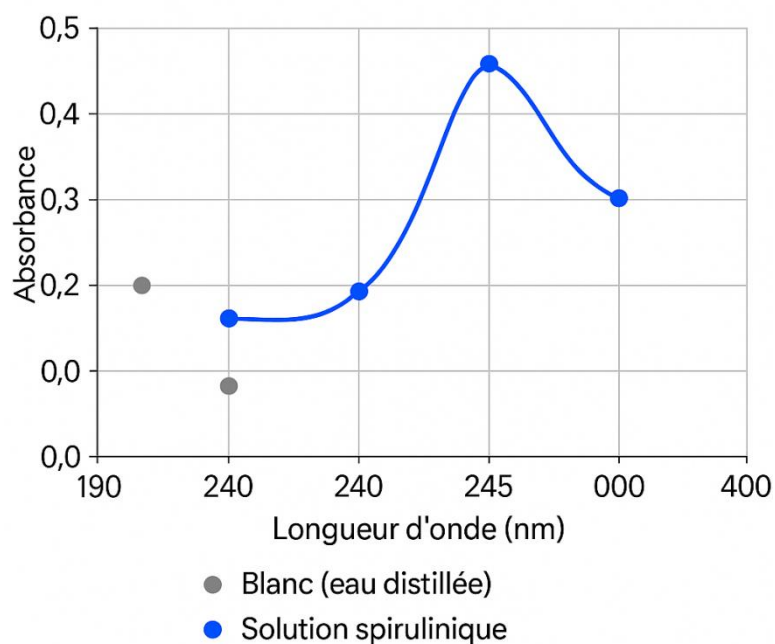


Figure 20: Profil spectral UV de l'extrait aqueux de spiruline (macération, 10 g)

**a) À 245 nm** — Indice fort de la présence de vitamine C

Cette longueur d'onde correspond au maximum d'absorption théorique de l'acide ascorbique en milieu acide.

L'absorbance de la solution est marquée (0,424), avec un blanc très faible (0,026).

L'absence de saturation et le contraste net avec le blanc suggèrent ici une détection fiable et exploitable de l'acide ascorbique.

Contrairement à l'extrait par décoction, ce signal n'est ni biaisé ni saturé, renforçant sa pertinence.

La lecture à 245 nm pour l'extrait de macération constitue une preuve probable de la présence de vitamine C, dans des conditions de lecture valides.

**b) À 240 nm** — Interprétation délicate à cause du blanc élevé

Le blanc absorbe davantage (0,189) que la solution (0,127), suggérant une surestimation du fond optique ou une possible contamination du blanc.

Cette inversion complique l'interprétation et annule la fiabilité de cette mesure, malgré l'intérêt potentiel de cette zone dans l'UV court.

Cette lecture est entachée d'interférence, et ne permet pas d'inférer la présence ou l'absence de vitamine C.

**c) À 190 nm** — Zone à interférences multiples

Bien que l'absorbance de la solution (0,222) soit supérieure au blanc (0,075), ce pic est situé dans une zone spectrale fortement encombrée : peptides, acides aminés, pigments résiduels...

La faible différence et l'absence de spécificité limitent l'interprétation.

Cette lecture est peu informative et ne permet pas de conclusion fiable concernant l'acide ascorbique.

**d) À 400 nm** — Signal anormal, dû à d'autres composés

Le blanc est nul, mais la solution présente une absorbance notable (0,405).

L'acide ascorbique n'ayant aucune absorption à cette longueur d'onde, le signal est probablement attribuable à :

- ✓ des pigments oxydés (phycocyanine dégradée),
- ✓ ou des composés secondaires extraits à froid.

Cette valeur témoigne de la présence de chromophores visibles, mais non liés à la vitamine C.

**Bilan global pour la macération (10 g)**

La méthode de macération permet d'obtenir un signal net à 245 nm, sans saturation ni interférence du blanc, ce qui n'était pas le cas pour la décoction. Cela suggère que ce mode d'extraction préserve mieux l'acide ascorbique, sans dénaturer les composés sensibles à la chaleur.

**3. Décoction, macération, et infusion de 1 g de spiruline**

**a) Analyse à 190 nm**

À cette longueur d'onde, les composés fortement absorbants, tels que l'acide ascorbique, peuvent être détectés. La décoction a présenté une absorbance de 0,130, indiquant une extraction relativement efficace, bien que le traitement thermique puisse altérer partiellement les composés sensibles. La macération a donné un résultat légèrement inférieur (0,100), tout en préservant mieux l'intégrité des molécules grâce à l'absence de chaleur. L'infusion, quant à elle, a été la moins performante, avec une valeur d'absorbance de 0,016, traduisant une efficacité d'extraction très limitée à cette longueur d'onde.

#### **b) Analyse à 240 nm**

Cette région spectrale est caractéristique de l'acide ascorbique et de certains acides phénoliques. La décoction s'est montrée la plus efficace, avec une absorbance de 0,130, confirmant sa capacité à solubiliser ces composés malgré les risques de dégradation thermique. La macération, plus douce, a généré une absorbance de 0,067, indiquant une extraction modérée. L'infusion a révélé une faible performance (0,023), soulignant une limitation notable pour cette catégorie de composés.

#### **c) Analyse à 245 nm**

À 245 nm, l'absorbance peut refléter la présence de certains flavonoïdes oxydés. La décoction a offert le plus fort signal (0,207), ce qui pourrait indiquer soit une bonne extraction, soit la formation de sous-produits liés à la chaleur. L'infusion a surpris avec un résultat relativement élevé (0,156), rivalisant avec la décoction. La macération est restée en retrait à 0,072, conservant néanmoins l'intégrité des extraits.

#### **d) Analyse à 265 nm**

Cette longueur d'onde est souvent associée à divers composés organiques extraits des matrices végétales. La macération s'est nettement distinguée, atteignant une absorbance de 0,229 — la plus élevée parmi les trois méthodes. Cela suggère une grande efficacité d'extraction sans altération chimique. La décoction et l'infusion ont montré des valeurs bien plus faibles (0,053 et 0,011 respectivement), révélant une perte ou une extraction inefficace.

#### **e) Analyse à 400 nm**

Dans cette zone, on s'attend à détecter des pigments naturels comme la phycocyanine. Cependant, aucune des méthodes n'a permis d'obtenir un signal, toutes affichant une absorbance de 0,000. Cela peut indiquer soit une concentration trop faible dans les extraits, soit une dégradation des pigments, notamment dans le cas de la décoction.

#### f) Analyse à 500 nm

Les longueurs d'onde autour de 500 nm sont utiles pour mesurer les pigments hydrosolubles colorés. La macération a largement surpassé les autres méthodes, avec une absorbance impressionnante de 0,834, traduisant une extraction optimale des composés colorés comme la phycocyanine. L'infusion a montré une efficacité modérée (0,233), tandis que la décoction n'a donné aucun signal, soulignant une destruction quasi totale des pigments sensibles à la chaleur.

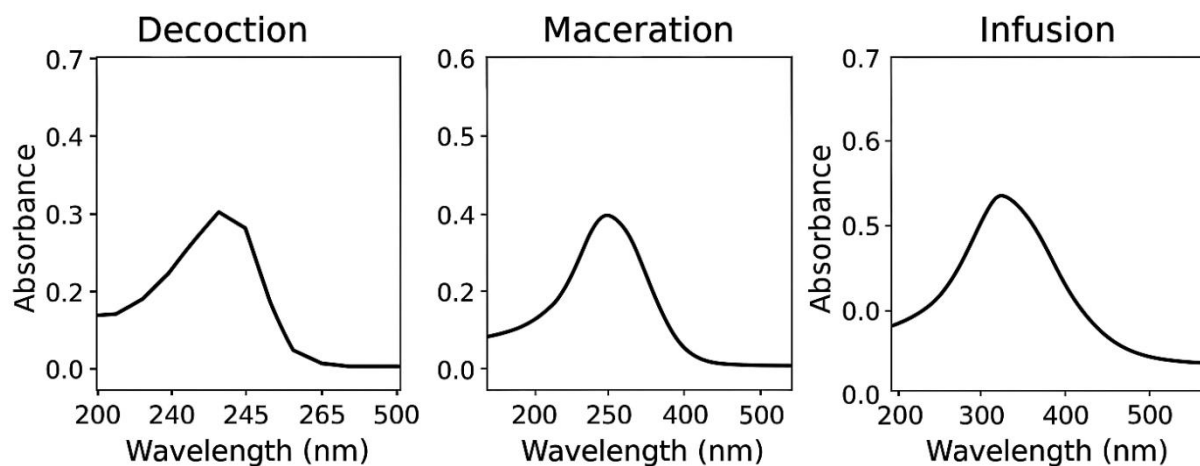


Figure 21: Spectres d'absorbance des extraits spiruliniques selon trois méthodes d'extraction (décoction, macération, infusion)

## 4. Extraction eau /méthanol

### 4.1. Contexte méthodologique

Objectif de cette extraction douce (macération et infusion) pour préserver l'intégrité des molécules bioactives. Solvant : eau/méthanol — favorise la solubilisation de composés polaires et légèrement apolaires. Deux types d'échantillons analysés : brut (B) et solution mère "SM" (Figure 21).

### 4.3. Analyses des pics

### **a. Région UV profonde (190 nm) – Indicateur de dégradation ou de précurseurs de vitamine C**

À 190 nm, les deux méthodes révèlent une absorption associée à des composés riches en azote, tels que les peptides ou les acides aminés. La macération présente des valeurs élevées (0,265 pour l'extrait brut et 0,282 pour la solution mère), indiquant une extraction efficace de ces composés. En revanche, l'infusion montre une absorption bien plus faible (0,050 et 0,025), témoignant d'une extraction moins performante à cette longueur d'onde.

L'absorption dans cette zone profonde de l'UV peut révéler la présence de composés azotés mais aussi d'intermédiaires de dégradation de la vitamine C. La macération montre des valeurs élevées (0,265 pour l'échantillon brut, 0,282 pour la solution mère), traduisant une extraction efficace ou une libération potentielle de dérivés liés à la vitamine C. L'infusion, en revanche, conserve des niveaux très faibles (0,050 et 0,025), ce qui suggère une préservation réduite ou une moindre efficacité d'extraction à cette longueur d'onde.

### **b. Composés aromatiques et phénoliques (240 nm): Molécules aromatiques et composés volatils liés aux huiles essentielles**

Cette bande d'absorption est liée à des composés aromatiques et à certains acides phénoliques. Les extraits bruts montrent des valeurs similaires (0,251 en macération, 0,131 en infusion), mais les solutions mères divergent : infusion (0,236) > macération (0,029), ce qui peut suggérer une migration plus efficace des composés aromatiques dans la solution mère d'infusion.

À cette longueur d'onde, on peut détecter des molécules légèrement volatiles et aromatiques susceptibles d'être associées aux huiles essentielles (ex. : composants terpéniques oxydés ou phénoliques). Les données montrent que la solution mère d'infusion (0,236) est plus riche que celle de la macération (0,029), ce qui suggère une meilleure migration des composés volatils dans l'infusion, sans agitation mécanique.

### **c. Zone d'absorption des composés antioxydants (245 nm): Signature typique de la vitamine C (acide ascorbique)**

Cette longueur d'onde est directement associée à l'absorption de la vitamine C. La solution mère issue de la macération (0,351) enregistre la valeur la plus élevée, confirmant son

efficacité pour extraire ou préserver l'acide ascorbique dans le mélange eau/méthanol. L'infusion, bien que performante (0,184), reste en retrait, ce qui indique une extraction antioxydante moins poussée.

Les composés tels que la vitamine C ou des polyphénols simples peuvent absorber à 245 nm. Ici, la solution mère de macération (0,351) présente une forte concentration, nettement supérieure à celle de l'infusion (0,184), ce qui confirme une excellente diffusion des antioxydants dans le solvant mixte eau/méthanol lors de la macération.

#### **d. Flavonoïdes, bases azotées (265 nm): Pic à 265 nm – Extraction de composés antioxydants complexes et polyphénols**

Cette zone englobe divers antioxydants tels que les flavonoïdes, souvent associés à l'activité synergique des huiles essentielles. La macération reste dominante, avec des valeurs maximales de 0,437 (brut) et 0,282 (solution mère). Cela indique une co-extraction favorable de composés protecteurs à effet conservateur sur la vitamine C.

Cette zone est typique des flavonoïdes et des bases azotées. Encore une fois, la macération est plus performante (0,437 pour le brut, 0,282 pour la SM), en comparaison avec l'infusion (0,159 et 0,128). Cela témoigne d'une extraction plus efficace des métabolites secondaires hydrosolubles par macération.

#### **e. Pigments oxydés et composants traces (400 nm): Traces de pigments oxydés ou composants huileux résiduels**

La légère absorbance détectée (surtout dans la macération, 0,342) pourrait signaler la présence de fractions pigmentées ou d'éléments huileux coextraits avec la phase méthanolée. Cela reste à confirmer par analyse complémentaire (ex. : chromatographie), mais suggère une co-solubilisation des composants lipophiles secondaires.

Une légère absorbance est détectée, principalement dans les solutions mères (0,342 pour la macération et 0,213 pour l'infusion), ce qui indique une faible solubilisation de pigments ou de métabolites colorés dans les deux cas. L'absence d'absorbance dans les bruts ( $\approx 0$ ) souligne que le phénomène est limité aux composés filtrés.

#### **f. Pigments hydrosolubles résiduels (500 nm): Pigments hydrosolubles, peu représentatifs ici**

Bien que peu pertinent pour la vitamine C ou les huiles essentielles, ce pic très faible montre que l'extraction pigmentaire est minimale, ce qui est cohérent avec votre objectif de préserver les composés actifs sans libérer les pigments.

À cette longueur d'onde, les valeurs sont très faibles, comme attendu pour une extraction douce. Une légère absorbance en solution mère de macération (0,080) révèle la présence marginale de phycobilines ou pigments associés. Infusion reste bien plus faible (0,012), confirmant une extraction pigmentaire négligeable.

#### **g. Conclusion générale sur l'extraction eau/méthanol**

La macération est plus performante que l'infusion pour extraire une large gamme de composés bioactifs.

Les solutions mères concentrent la majorité des substances d'intérêt, avec des différences notables selon la méthode.

L'infusion, bien que plus douce, permet une certaine extraction phénolique, mais reste moins efficace globalement.

#### **h. Synthèse ciblée sur la vitamine C et les huiles essentielles**

La macération dans le mélange eau/méthanol est clairement plus adaptée pour l'extraction de la vitamine C, avec un pic net à 245 nm.

L'infusion semble plus favorable à la récupération de composés aromatiques légers liés aux huiles essentielles, en particulier à 240 nm.

La complémentarité des deux méthodes pourrait être exploitée selon la cible prioritaire (antioxydants vs composés volatils).

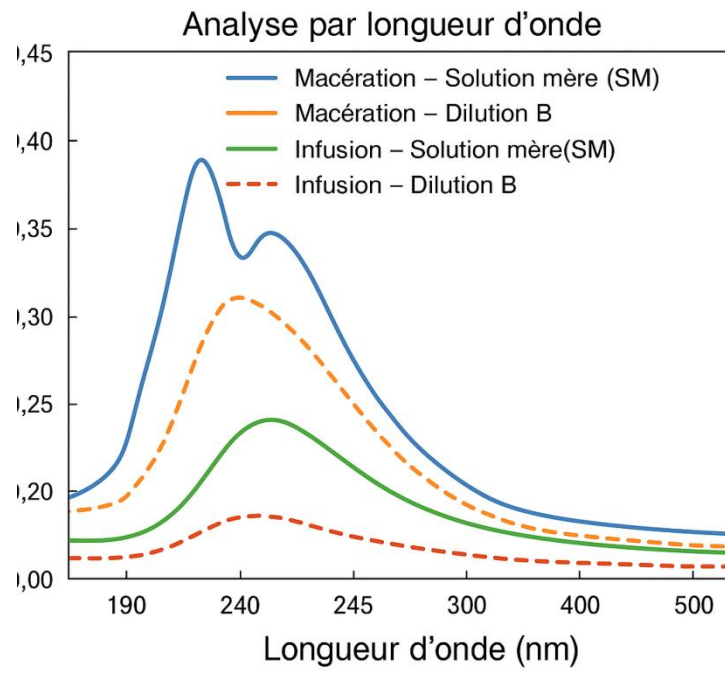


Figure 22: Extraction eau /méthanol

## **Conclusion générale**

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de valorisation biotechnologique durable des ressources naturelles algériennes, en mettant en évidence le potentiel de la spiruline marine (*Arthrospira platensis*) comme source de composés bioactifs à haute valeur ajoutée. L'étude repose sur une double approche : une revue bibliographique approfondie et une expérimentation ciblée sur l'extraction de la vitamine C et des huiles essentielles.

La première partie a permis de cerner les caractéristiques biologiques, écologiques et nutritionnelles de la spiruline, tout en soulignant son intérêt industriel mondial et le retard de sa valorisation en Algérie. Ce cadre théorique a justifié la nécessité de développer des procédés d'extraction adaptés aux souches locales.

La seconde partie a porté sur l'extraction comparative de la vitamine C (par macération, infusion et décoction) et des huiles essentielles (par Soxhlet). Les résultats ont montré que la macération aqueuse est la méthode la plus efficace pour préserver la vitamine C, tandis que l'extraction méthanolique a révélé une richesse en acides gras insaturés et composés volatils à potentiel antioxydant.

Sur le plan méthodologique, ce travail a permis d'adapter des protocoles d'extraction à la spiruline algérienne, de valoriser une souche locale (ferme Al Kiram, Biskra), et de produire des représentations visuelles scientifiques facilitant la vulgarisation des résultats.

Enfin, cette recherche ouvre des perspectives concrètes pour le développement local : formulation de compléments alimentaires, réduction de la dépendance aux extraits importés, et intégration de techniques avancées (comme la GC-MS) pour l'identification fine des composés. Elle constitue ainsi une base solide pour des projets interdisciplinaires alliant biotechnologie, nutrition et développement durable.

## Références bibliographiques

1. Jordan, J. P. (1999). *Cultivez votre spiruline : manuel de culture artisanale*. Antenna Technologies.
2. Giraldine-Andréani, C. (2005). Spiruline, système sanguin, système immunitaire et cancer. *Phytothérapie*, 3, 158–161.
3. Cruchot, H. (2008). *La spiruline : bilan et perspectives* [Thèse de doctorat en pharmacie, Université de France-Comité].
4. Ciferri, O. (1983). Spirulina, the edible microorganism. *Microbiological Reviews*, 47(4), 551–578.
5. Fox, R. D. (1996). *Spirulina, production & potential*. Aix-en-Provence : Édisud.
6. Belay, A. (1997). Mass culture of Spirulina outdoors: the Earthrise Farms experience. In A. Vonshak (Ed.), *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, Cell-Biology and Biotechnology* (pp. 131–158). Taylor & Francis.
7. Tomaselli, L. (2002). Morphology, ultrastructure and taxonomy of *Arthrospira (Spirulina)*. In A. Vonshak (Ed.), *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, Cell-Biology and Biotechnology* (pp. 1–17). Taylor & Francis.
8. Scheldeman, P., Baurain, D., Bouhy, R., Scott, M., Mühling, M., Whitton, B. A., & Wilmotte, A. (1999). *Arthrospira* ('Spirulina') strains from four continents are resolved into only two clusters. *FEMS Microbiology Letters*, 172(2), 213–222.
9. Sguera, S. (2008). *Spirulina platensis et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques* [Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré].
10. Castenholz, R. W., & Waterbury, J. B. (1989). Oxygenic photosynthetic bacteria. In J. T. Staley, M. P. Bryant, N. Pfennig, & J. G. Holt (Eds.), *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (Vol. 3, pp. 1710–1806). Williams & Wilkins.
11. Whitton, B. A. (1992). Diversity, ecology, and taxonomy of the cyanobacteria. In N. H. Mann & N. G. Carr (Eds.), *Photosynthetic Prokaryotes* (pp. 1–51). Plenum Press.
12. Fox, R. D. (1999). *Spiruline : technique, pratique et promesse*. Aix-en-Provence : Édisud.
13. Théodore, Z. G. H. C. (2017). *Optimisation de la culture de la spiruline en milieu contrôlé : éclairage et estimation de la biomasse* [Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier].
14. König, G. (2007). Les algues : première lignée végétale. *Futura Sciences*. <https://www.futura-sciences.com>

15. Ali, S. K., & Saleh, A. M. (2012). Spirulina – An overview. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 4(3), 9–15.
16. Zarrouk, C. (1966). *Contribution à l'étude d'une cyanophycée : influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de Spirulina maxima* [Thèse de doctorat, Université de Paris].
17. Manet, A. (2016). *La spiruline : indications thérapeutiques, risques sanitaires et conseils à l'officine* [Thèse de doctorat en pharmacie, Université Grenoble Alpes].
18. Jourdan, J. (2006). *Manuel de culture artisanale de spiruline* (Éd. révisée 2013).
19. Iltis, A. (1968). Tolérance de salinité de *Spirulina platensis* dans les mares natronées du Kanem (Tchad). *Cahiers ORSTOM, série Hydrobiologie*, 2, 119–125.
20. Jarisoa, T. (2005). *Adaptation de spiruline du sud de Madagascar à la culture en eau de mer* [Thèse de doctorat, Université de Toliara].
21. Doumenge, F., Durand-Chastel, H., & Toulemont, A. (1993). *Spiruline, algue de vie / Spirulina, algae of life*. Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco, Numéro spécial 12.
22. Lupatini, A. L., Colla, L. M., Canan, C., & Colla, E. (2017). Potential application of microalga *Spirulina platensis* as a protein source. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 724–732.
23. Vonshak, A. (Ed.). (1997). *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology*. Taylor & Francis.
24. Danesi, E. D. G., Rangel-Yagui, C. O., Carvalho, J. C. M., & Sato, S. (2004). Effect of reducing the light intensity on the growth and production of chlorophyll by *Spirulina platensis*. *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 329–335.
25. Bellahcen, T. O., Bouchabchoub, A., Massoui, M., & El Yachioui, M. (2013). Culture et production de *Spirulina platensis* dans les eaux usées domestiques. *Larhyss Journal*, 14, 107–122.
26. Madkour, F. F., Kamil, A. W., & Nasr, H. S. (2012). Production and nutritive value of *Spirulina platensis* in reduced cost media. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 38, 51–57.
27. Hajati, H., & Zaghari, M. (2019). *Spirulina platensis in poultry nutrition*. Cambridge Scholars Publishing.
28. Charpy, L., Langlade, M. J., & Alliod, R. (2008). *La spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique ?* IRD, Marseille.
29. Flaquet, J., & Hurni, J. P. (2006). *Spiruline : aspects nutritionnels*. Antenna Technologies.

30. Avila-Leon, I., Matsudo, M. C., Sato, S., & de Carvalho, J. C. M. (2012). *Arthrospira platensis* biomass with high protein content cultivated in continuous process using urea as nitrogen source.
31. Sall, M. G., Dankoko, B., Badiane, M., Ehua, E., & Kuakuwi, N. (1999). La spiruline : une source alimentaire à promouvoir. *Médecine d'Afrique Noire*, 46(3), 141.
32. Hug, C., & Von der Weid, D. (2011). *La spiruline dans la lutte contre la malnutrition*. Antenna Technologies.
33. Habib, M. A., Parvin, M., Huntington, T., & Hasan, M. (2008). *Review on culture, production and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals and fish*. FAO. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0424e00.pdf>
34. Cohen, Z. (2002). The chemicals of spirulina. In A. Vonshak (Ed.), *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, Cell-Biology and Biotechnology* (pp. 252). Taylor & Francis.
35. Anvar, A. A., & Nowruzi, B. (2021). Bioactive properties of spirulina. *Microbial Bioactives*, 4(1), 134–142.
36. Pierlovisi, C. (2008). Composition chimique de la spiruline. *Colloque International sur la Spiruline*, Toliara, Madagascar.
37. Zheng, J., Inoguchi, T., Sasaki, S., Maeda, Y., McCarty, M. F., Fujii, M., ... & Takayanagi, R. (2013). Phycocyanin and phycocyanobilin from *Spirulina platensis* protect against diabetic nephropathy by inhibiting oxidative stress. *American Journal of Physiology*, 110–120.
38. Marzorati, S., Schievano, A., Idà, A., & Verotta, L. (2020). Carotenoids, chlorophylls and phycocyanin from spirulina: Supercritical CO<sub>2</sub> and water extraction methods for added value products cascade. *Green Chemistry*, 22, 187–196.
39. Mishra, T., Joshi, M., Singh, S., Jain, P., Kaur, R., Ayub, S., & Kaur, K. (2013). Spirulina: The beneficial algae. *International Journal of Applied Microbiology Science*, 2(3), 21–35.
40. Clark, M. A., Choi, J., & Douglas, M. (2018). *Biology 2e*.
41. Galiana, D., Le Rox, C., & Monchâtre, I. (2015). *La gestion du vivant et des ressources*. Educagri Éditions.
42. Banks, J. (2007). *Étude de la spiruline au Palacret : Étudier la faisabilité de la mise en place d'une filière spiruline sur le site du Palacret, dans les Côtes d'Armor*. Manuel.
43. Casal, A. (2019). L'aliment idéal et le plus complet de demain. *Spiruline France*. [www.spirulinefrance.fr](http://www.spirulinefrance.fr)
44. Fain, O. (2004). Mise au point : Carences en vitamine C. *La Revue de Médecine Interne*, 25, 872–880.

45. Carr, A., & Frei, B. (1999). Does vitamin C act as pro-oxidant under physiological conditions? *FASEB Journal*, 13(9), 1007–1024.
46. Greff, M. (2011). *Post'U FMC-HGE: Paris, du 24–27 mars 2011*. Springer.
47. Abe, E., Delyle, S. G., & Alvarez, J. C. (2010). Extraction liquide-liquide : théorie, applications, difficultés. *Annales de Toxicologie Analytique*, 22(2), 51–59.
48. CNERNA-AFSSA, & Martin, A. (2001). *Apports nutritionnels conseillés pour la population française*. Paris : Lavoisier.
49. Belaiche, P. (1979). L'aromatogramme. In *Traité de phytothérapie et d'aromathérapie* (Tome 1, p. 204). M.S.A.
50. Garnero, J. (1996). *huiles essentiels. Dossier : K345. Base documentaire : constantes physico-chimiques*.
51. Kaloustian, J., & Hadji-Minaglo, F. (2012). *La connaissance des huiles essentielles : qualilogie et aromathérapie*. Springer.
52. Dasilva, F. (2010). *Utilisation des huiles essentiels en infectiologie ORL* [Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy].
53. Muther, L. (2015). *Utilisation des huiles essentiels chez l'enfant* [Thèse de doctorat, Faculté de Pharmacie de Clermont-Ferrand].
54. Ouis, N. (2015). *Étude chimique et biologique des huiles essentiels de coriandre, de fenouil et de persil* [Thèse de doctorat, Université d'Oran].
55. Richard, H., & Loo, A. (1992). Nature, origine et propriétés des épices et des aromates bruts. In H. Richard (Ed.), *Aromates & épices* (pp. 17–69, 213–238). Tec & Doc Lavoisier.
56. Kesbi Amrane. (2001). *Étude des propriétés physico-chimiques et évaluation de l'activité biologique des huiles essentiels d'Eucalyptus globulus dans la région de Ouargla* [Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla].
57. Fattah, I. M. R., Noraini, M. Y., Mofijur, M., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Khan, T. M. Y., Ong, H. C., & Mahlia, T. M. I. (2020). Lipid extraction maximization and enzymatic synthesis of biodiesel from microalgae. *Energies*, 10, 6103.
58. Kouissi, F. (2020). *Étude théorique et pratique de la synthèse et de la production des vitamines à partir des algues* [Mémoire de master, Université Kasdi Mer
59. Schafer, K. (1998). Accelerated solvent extraction of lipids for determining the fatty acid composition of biological material. *Analytica Chimica Acta*, 358, 69–77. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(97\)00587-4](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(97)00587-4)
60. Adrian. (1956). Les méthodes de dosage des principales vitamines hydrosolubles (1). *Annales de Zootechnie*, 5(4), 295–334.