

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme

d'Ingénieur en Sciences de la Mer

Option : Biotechnologie marine

Thème :

**Identification génétique et caractérisation biochimique de  
macroalgues d'intérêt du littoral algérien**

Présenté par :

**GUIDOUM Ibtissem**

Soutenu le 08/07/2025, devant le jury composé de :

|                      |            |         |              |
|----------------------|------------|---------|--------------|
| Mme AISSOU AKROUR C. | MCA        | ENSSMAL | Présidente   |
| Mme AMAR I.          | MAA        | ENSSMAL | Examinatrice |
| M GUEDDOU Abdellatif | MRB        | CRSP    | Invité       |
| Mme BOUKHAROUBA A.   | MCA        | ENSSMAL | Promotrice   |
| M GRIMES S.          | Professeur | ENSSMAL | Co-promoteur |

**Année universitaire: 2024- 2025**



## REMERCIEMENTS

Ce travail de fin d'études n'aurait pu être mené à bien sans l'appui, les conseils et le soutien précieux de nombreuses personnes que je tiens à remercier chaleureusement.

Je remercie tout d'abord Madame **Aïssou Akrou** C., Présidente du jury, et Madame **Amar I.**, examinatrice, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour l'intérêt qu'elles lui ont accordé.

Je remercie du fond du cœur ma promotrice, Mme **Boukharouba Aya**, non seulement pour son encadrement scientifique rigoureux, mais aussi pour sa patience, sa disponibilité et son soutien, tant académique que moral. Elle a été une alliée et une force tranquille durant toutes les étapes de ce projet.

Mes remerciements sincères vont également à M. **Grimes Samir**, co-promoteur de ce travail, un professeur pas comme les autres : humble, passionné, toujours présent pour ses étudiants, à l'écoute, et surtout capable de nous guider avec intelligence pour faire émerger le meilleur de nous-mêmes.

Je remercie vivement Pr. **Boutekrabi Lynda**, Directrice de l'ENSSMAL, pour les facilités logistiques et administratives qu'elle nous a généreusement accordées. Mes sincères remerciements à Pr. **Saadi Djamel**, Directeur de l'ESSBO, pour nous avoir permis d'effectuer notre stage au sein de son établissement, ainsi qu'à M. **Merzoug M.** et à toute l'équipe de la plateforme PLAGENOR pour leur accueil, leur suivi et leur implication active dans la réussite de nos manipulations génétiques.

Je remercie également M. **Gueddou Abdellatif** pour ses conseils précieux et son expertise qui ont été décisifs dans l'analyse bioinformatique et phylogénétique des données, ainsi que Mme **Gueroumi Houda**, ingénieure au laboratoire LBCM2, pour sa présence constante, ses directives claires et son aide précieuse tout au long des manipulations biochimiques.

Je tiens également à saluer les clubs de plongée **El Mordjane** et **Paradive**, et en particulier les moniteurs et plongeurs **Redha, Jamal** et tous ceux qui ont contribué à la réussite de la phase d'échantillonnage.

Un merci tout spécial à la doctorante **Nawel Moussaoui** pour son aide généreuse et bienveillante.

Je n'omettrai pas de remercier la personne qui n'a jamais cessé d'y croire, même dans les moments de doute : **moi-même**. Pour ma patience et ma persévérance. Pour les jours d'effort, de nuits blanches et de silence. Ce travail est le fruit d'un cheminement intense, personnel et profond, et je suis fière d'être allée jusqu'au bout.

## DEDICACE

*À la mémoire de ma grand-mère maternelle,*

*Elle qui m'aimait d'un amour simple et sincère, et savait le montrer.*

*Celle qui m'a appris mon tout premier verset, celle qui valorisait la science et l'apprentissage  
Elle a bercé mon enfance, et mes souvenirs de petite fille ne respirent qu'à travers elle.*

*Elle aurait été fière de moi, j'en suis certaine. Ce travail lui est dédié, avec toute ma tendresse.*

*À la mémoire de Tonton Mohamed,*

*Qui n'a jamais été seulement l'oncle de ma mère, mais aussi le mien, avec tout l'amour et la bienveillance que cela implique.*

*Avant de partir, il m'a dit qu'il était fier de ce que je suis devenue. Ces mots résonnent encore dans mon cœur. Qu'il repose en paix, et qu'il sache que je continue d'avancer avec sa fierté en mémoire.*

*À ma mère, pilier de ma vie.*

*Femme forte, débordante de courage, de patience et de ressources.*

*Sans elle, rien de tout cela n'aurait été possible. Son amour et ses sacrifices sont la base de chacun de mes pas. Je lui dois tout.*

*À ma sœur, ma meilleure amie, ma confidente et mon moteur.*

*Toujours là, pour me soutenir et me booster.*

*À mes petits frères, Seif et Khalil,*

*J'espère qu'ils verront en moi un modèle, une grande sœur inspirante.*

*À tous les membres de ma famille :*

*Mon père, mon papi, ma grand-mère paternelle, ma tante, mes oncles, tata Zakia, tata Amina, Soumia... À mes cousins et cousines, Merci pour votre foi en moi et votre présence.*

*À mes amies du lycée : Lamia, Lina et Ania,*

*À mes amis de la fac, des clubs, et à tous ceux qui ont croisé ma route, m'ont offert leur bienveillance et qui me veulent du bien dans cette vie.*

*Et enfin...*

*À la petite Ibtissem, rêveuse, passionnée, un peu têtue mais toujours pleine d'espoir.*

*Tu as persévéré malgré les doutes, tu as construit pas à pas ce chemin. Sois fière de toi.*

***“ La mer est un miroir où l’âme vient se voir en mouvement. ” — Victor Hugo***

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. Les trois principaux groupes taxonomiques de macroalgues.....                                                                  | 6  |
| Figure 2. Localisation des sites d'échantillonnage sur Alger.....                                                                        | 28 |
| Figure 3. Localisation des sites d'échantillonnage sur Rachgoun .....                                                                    | 28 |
| Figure 4. Echantillonnage en plongée sous-marine.....                                                                                    | 29 |
| Figure 5. Poste de travail dédié à l'identification microscopique des macroalgues. ....                                                  | 31 |
| Figure 6. Principales étapes de la lyse cellulaire pour l'extraction de l'ADN génomique à l'aide du kit AIONA. ....                      | 32 |
| Figure 7. Quantification de l'ADN extrait à l'aide du spectrophotomètre ScanDrop.....                                                    | 33 |
| Figure 8. Contrôle qualitatif de l'ADN par électrophorèse sur gel d'agarose.....                                                         | 34 |
| Figure 9. Préparation des mélanges réactionnels de la PCR et le thermocycleur utilisé pour l'amplification. ....                         | 36 |
| Figure 10. Thermocycleur PCRmax utilisé pour la PCR BigDye.....                                                                          | 37 |
| Figure 11. Purification des produits d'amplification BigDye à l'aide de billes magnétiques..                                             | 38 |
| Figure 12. Étapes principales de l'analyse bioinformatique des séquences d'ADN.....                                                      | 40 |
| Figure 13. Préparation des biomasses algales pour les analyses biochimiques .....                                                        | 41 |
| Figure 14. Extraction des lipides totaux à partir des biomasses algales.....                                                             | 42 |
| Figure 15. Dosage des protéines totales par la méthode de Kjeldahl .....                                                                 | 43 |
| Figure 16. Extraction des polysaccharides totaux par macération à l'eau chaude et précipitation à l'éthanol .....                        | 44 |
| Figure 17. Visualisation des gammes d'étalonnage et des extraits polysaccharidiques dosés (méthode Dubois). ....                         | 46 |
| Figure 18. Visualisation des tubes de la gamme d'étalonnage de l'acide gallique .....                                                    | 48 |
| Figure 19. Chromatographie sur colonne des pigments chlorophylliens des deux extraits algaux .....                                       | 51 |
| Figure 20. Visualisation des amplicons PCR 18S rRNA des espèces d'algues sur gel d'agarose 1,2%. ....                                    | 58 |
| Figure 21. Arbre phylogénétique des espèces d'algues marines séquencées (MEGA 12, 2025) .....                                            | 60 |
| Figure 22. Droite d'étalonnage du glucose.....                                                                                           | 64 |
| Figure 23. Spectre FTIR des polysaccharides de <i>Dictyota dichotoma</i> .....                                                           | 66 |
| Figure 24. Spectre FTIR des polysaccharides de <i>Sphaerococcus coronopifolius</i> .....                                                 | 66 |
| Figure 25. Courbe d'étalonnage de l'acide gallique .....                                                                                 | 67 |
| Figure 26. Variations du pourcentage d'inhibition en fonction des concentrations de l'acide ascorbique et des deux extraits algaux ..... | 69 |
| Figure 27. Activité antiradicalaire du DPPH : comparaison du pourcentage d'inhibition des trois échantillons à 1000 ppm.....             | 70 |
| Figure 28. Profil spectrale de l'extrait hydrosoluble de l'algue rouge (UVProb-1800).....                                                | 71 |
| Figure 29. Fractions pigmentaires de l'extrait chlorophylliens des deux échantillons algaux . ....                                       | 72 |
| Figure 30. Composition biochimique relative des deux algues étudiées.....                                                                | 79 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1. Caractéristiques et avantages des principaux polysaccharides des macroalgues ...                             | 18 |
| Tableau 2. Applications industrielles des macroalgues selon leurs biomolécules et leur potentiel biotechnologique ..... | 20 |
| Tableau 3. Principes et avantages des techniques alternatives d'extraction appliquées aux algues .....                  | 21 |
| Tableau 4. Facteurs influençant le rendement et la qualité des extraits algaux.....                                     | 22 |
| Tableau 5. Récapitulatif du matériel utilisé dans l'ensemble des analyses .....                                         | 26 |
| Tableau 6. Paramètres physico-chimiques de l'eau de mer lors de l'échantillonnage .....                                 | 53 |
| Tableau 7. Récapitulatif des échantillons collectés .....                                                               | 54 |
| Tableau 8. Résultats de l'identification morphologique et microscopique des macroalgues collectées sur Alger. ....      | 54 |
| Tableau 9. Résultats de l'identification morphologique des macroalgues collectées à Rachgoun. ....                      | 55 |
| Tableau 10. Quantification et pureté de l'ADN génomique des échantillons d'algues.....                                  | 57 |
| Tableau 11. Résultats de l'analyse BLAST pour les échantillons séquencés avec succès .....                              | 59 |
| Tableau 12. Teneurs en lipides totaux des macroalgues étudiées .....                                                    | 62 |
| Tableau 13. Teneurs en protéines totales par la méthode Kjeldahl .....                                                  | 62 |
| Tableau 14. Rendements d'extraction des polysaccharides .....                                                           | 63 |
| Tableau 15. Résultats du dosage des sucres totaux par la méthode de Dubois .....                                        | 64 |
| Tableau 16. Teneurs en sucres totaux.....                                                                               | 65 |
| Tableau 17. Rendements d'extraction des polyphénols .....                                                               | 67 |
| Tableau 18. Résultats du dosage des polyphénols totaux.....                                                             | 68 |
| Tableau 19. Valeurs d'absorbance (DO à 517 nm) mesurées lors du test DPPH .....                                         | 68 |
| Tableau 20. Activité antioxydante des extraits de polyphénols des deux algues.....                                      | 69 |
| Tableau 21. Récapitulatif des fractions pigmentaires de l'algue brune obtenues par chromatographie sur colonne.....     | 73 |
| Tableau 22. Interprétation des spectres UV-Vis des fractions de <i>Dictyota dichotoma</i> .....                         | 75 |
| Tableau 23. Interprétation des spectres UV-Vis des fractions de <i>Sphaerococcus coronopifolius</i> .....               | 76 |

## LISTE DES ABREVIATIONS

**AB/AR** : Algue brune/Algue rouge (codes d'échantillons)  
**ADN** : Acide désoxyribonucléique  
**AFNOR** : Association Française de Normalisation  
**AIONA** : Kit d'extraction d'ADN (plateforme PLAGENOR)  
**ARNr 18S** : ARN ribosomique 18S  
**ATR** : Attenuated Total Reflectance (Réflectance totale atténuée)  
**BIODIVAL** : Camp scientifique de biodiversité  
**BigDye™** : Kit de séquençage par terminaison de chaîne  
**BLASTn** : Basic Local Alignment Search Tool (nucléotidique)  
**Chl a** : Chlorophylle a  
**Chl c** : Chlorophylle c  
**ClustalW** : Algorithme d'alignement multiple de séquences  
**COO<sup>-</sup>** : Groupe fonctionnel carboxylate  
**C-O-C** : Liaison éther  
**C-O-S** : Liaison carbone-oxygène-soufre  
**CTAB** : Bromure de cetyltriméthylammonium  
**CuSO<sub>4</sub>** : Sulfate de cuivre  
**ddNTPs** : Didésoxynucléotides triphosphates  
**dNTPs** : Désoxynucléotides triphosphates  
**DO** : Densité optique  
**DPPH** : 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle  
**DZ** : Algérie (code pays)  
**EAG** : Équivalent Acide Gallique  
**EDTA** : Acide éthylènediaminetétraacétique  
**ENSSMAL** : École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral  
**ESSBO** : École Supérieure des Sciences Biologiques d'Oran  
**ET** : Écart-type  
**ExoSAP-IT** : Kit de purification enzymatique des produits PCR  
**FTIR** : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier  
**GC-MS** : Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse  
**GeneRuler** : Marqueur de taille moléculaire pour électrophorèse  
**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** : Acide sulfurique  
**H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>** : Acide borique  
**HPLC** : Chromatographie liquide haute performance  
**IC<sub>50</sub>** : Concentration inhibitrice 50%  
**K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** : Sulfate de potassium  
**kHz** : Kilohertz  
**LCVRM** : Laboratoire de Conservation et Valorisation des Ressources Marines  
**MAT** : Matières Azotées Totales  
**mBar** : Millibar  
**MEGA** : Molecular Evolutionary Genetics Analysis (logiciel)  
**MerMade** : Synthétiseur d'oligonucléotides  
**MgCl<sub>2</sub>** : Chlorure de magnésium  
**mg/L** : Milligrammes par litre  
**MS** : Matière Sèche  
**mS/cm** : Millisiemens par centimètre

**NaCl** : Chlorure de sodium  
**Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>** : Carbonate de sodium  
**NaOH** : Hydroxyde de sodium  
**NCBI** : National Center for Biotechnology Information  
**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** : Ion ammonium  
**P1** : Plongée de premier degré / Variable expérimentale  
**pb** : Paires de bases  
**PCR** : Polymerase Chain Reaction (Réaction en chaîne par polymérase)  
**PE** : Phycoérythrine  
**Phred** : Scores de qualité de lecture pour le séquençage  
**PK** : Protéinase K  
**PLAGENOR** : Plateforme génomique  
**ppm** : Parties par million  
**PSU** : Practical Salinity Unit (Unité pratique de salinité)  
**RMN** : Résonance magnétique nucléaire  
**rpm** : Rotations par minute  
**SCUBA** : Self-Contained Underwater Breathing Apparatus  
**Se** : Sélénium  
**S=O** : Liaison soufre-oxygène  
**SYBR Safe** : Intercalant fluorescent pour visualisation d'ADN  
**TAE** : Tris-Acétate-EDTA (tampon d'électrophorèse)  
**Taq** : Thermus aquaticus (ADN polymérase thermostable)  
**TE** : Tris-EDTA (tampon de conservation)  
**Tris-HCl** : Tris(hydroxyméthyl)aminométhane-acide chlorhydrique  
**tr/min** : Tours par minute  
**v/v** : Volume/volume (concentration)  
**WoRMS** : World Register of Marine Species

### Unités et mesures

**°C** : Degrés Celsius  
**cm** : Centimètre  
**cm<sup>-1</sup>** : Nombre d'onde (spectroscopie)  
**g** : Gramme  
**mg EAG/g MS** : Milligrammes équivalent acide gallique par gramme de matière sèche  
**mL** : Millilitre  
**mm** : Millimètre  
**nm** : Nanomètre  
**%** : Pourcentage  
**µg/mL** : Microgrammes par millilitre

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS

DÉDICACE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABRÉVIATIONS

TABLE DES MATIÈRES

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION .....                                                        | 1  |
| REVUE BIBLIOGRAPHIQUE .....                                               | 4  |
| I. Introduction aux macroalgues: diversité et écologie .....              | 5  |
| 1 Définition et caractéristiques générales des macroalgues.....           | 5  |
| 2 Composition pigmentaire et classification des macroalgues.....          | 5  |
| 3 Distribution géographique .....                                         | 6  |
| 3.1 A l'échelle mondiale .....                                            | 6  |
| 3.2 En Méditerranée .....                                                 | 6  |
| 3.3 Sur le littoral Algérien.....                                         | 6  |
| 4 Rôle écologique .....                                                   | 7  |
| 5 Espèces étudiées .....                                                  | 7  |
| II. Identification des Macroalgues : Approche combinée .....              | 14 |
| 1 Techniques classiques et clés d'identification .....                    | 14 |
| 1.1 Identification morphologique et microscopique .....                   | 14 |
| 1.2 Limites des méthodes classiques.....                                  | 14 |
| 2 Identification génétique.....                                           | 15 |
| 2.1 Techniques de biologie moléculaire : Barcoding ADN .....              | 15 |
| 2.2 Analyse bioinformatique et cartographie génétique .....               | 16 |
| 2.3 Approche combinée : La taxonomie intégrative.....                     | 16 |
| 2.4 Importance des bases de données génétiques pour la valorisation ..... | 16 |
| III. Intérêt biotechnologique des macroalgues .....                       | 17 |
| 1 Diversité chimique et biologique .....                                  | 17 |

|            |                                                                           |           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2</b>   | <b>Principales Biomolécules d'Intérêt : Structures et Bienfaits .....</b> | <b>17</b> |
| 2.1        | Polysaccharides.....                                                      | 17        |
| 2.2        | Pigments .....                                                            | 18        |
| 2.3        | Polyphénols.....                                                          | 19        |
| 2.4        | Autres composés d'intérêt.....                                            | 19        |
| <b>3</b>   | <b>Composés bioactifs et applications industrielles.....</b>              | <b>19</b> |
| <b>4</b>   | <b>Procédés d'extraction des biomolécules .....</b>                       | <b>20</b> |
| 4.1        | Méthodes conventionnelles .....                                           | 20        |
| 4.2        | Méthodes innovantes et éco-responsables .....                             | 21        |
| 4.3        | Facteurs influant sur l'efficacité de l'extraction.....                   | 22        |
| <b>5</b>   | <b>Perspectives d'innovation .....</b>                                    | <b>22</b> |
| <b>6</b>   | <b>Freins et Enjeux : écologiques, économiques et juridiques .....</b>    | <b>22</b> |
| 6.1        | Enjeux écologiques et réglementaires .....                                | 22        |
| 6.2        | Enjeux économiques et structuration de la filière .....                   | 23        |
| 6.3        | Enjeux juridiques et cadre réglementaire .....                            | 24        |
| 6.4        | Autres freins.....                                                        | 24        |
|            | <b>MATERIEL ET METHODES .....</b>                                         | <b>25</b> |
| <b>I.</b>  | <b>MATÉRIEL .....</b>                                                     | <b>26</b> |
| <b>II.</b> | <b>MÉTHODES .....</b>                                                     | <b>27</b> |
| <b>1</b>   | <b>Travail sur terrain .....</b>                                          | <b>27</b> |
| 1.1        | Pré-échantillonnage.....                                                  | 27        |
| 1.1.1      | Critères de sélection des espèces .....                                   | 27        |
| 1.1.2      | Sélection des sites d'échantillonnage .....                               | 27        |
| 1.2        | Échantillonnage .....                                                     | 27        |
| 1.2.1      | Zones d'étude .....                                                       | 27        |
| 1.2.2      | Collecte.....                                                             | 29        |
| <b>2</b>   | <b>Travail au laboratoire (LCVRM) .....</b>                               | <b>29</b> |

|            |                                                                        |           |
|------------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.1</b> | <b>Prétraitement et conditionnement des échantillons .....</b>         | <b>29</b> |
| 2.1.1      | Échantillons collectés à Alger .....                                   | 29        |
| 2.1.2      | Échantillons collectés à Rachgoun .....                                | 30        |
| <b>2.2</b> | <b>Etude de la flore algale : identification taxonomique.....</b>      | <b>30</b> |
| 2.2.1      | Observation macroscopique .....                                        | 30        |
| 2.2.2      | Observation microscopique .....                                        | 30        |
| <b>3</b>   | <b>Identification génétique (ESSBO) .....</b>                          | <b>31</b> |
| 3.1.       | Optimisation de l'extraction de l'ADN génomique.....                   | 31        |
| 3.2.       | Contrôle qualité de l'ADN .....                                        | 33        |
| 3.3.       | Amplification par PCR du gène ARNr 18S .....                           | 34        |
| 3.4.       | Séquençage Sanger .....                                                | 36        |
| 3.5.       | Analyse bioinformatique des séquences.....                             | 39        |
| <b>4.</b>  | <b>Caractérisation biochimique (ENSSMAL) .....</b>                     | <b>40</b> |
| 4.1.       | Préparation du matériel biologique pour les analyses biochimiques..... | 40        |
| 4.2.       | Etude de la composition biochimique des biomasses.....                 | 41        |
|            | <b>RESULTATS ET DISCUSSIONS.....</b>                                   | <b>52</b> |
| <b>1</b>   | <b>Échantillonnage et caractérisation du milieu.....</b>               | <b>53</b> |
| 1.1.       | Conditions physico-chimiques des sites d'échantillonnage.....          | 53        |
| 1.2.       | Collecte et diversité des échantillons.....                            | 53        |
| <b>2.</b>  | <b>Identification taxonomique.....</b>                                 | <b>54</b> |
| 2.1.       | Identification macroscopique et microscopique .....                    | 54        |
| <b>3.</b>  | <b>Identification génétique.....</b>                                   | <b>56</b> |
| 3.1.       | Extraction et contrôle qualité de l'ADN génomique .....                | 56        |
| 3.2.       | Amplification par PCR du gène ARNr 18S.....                            | 58        |
| 3.3.       | Séquençage et analyse bioinformatique.....                             | 59        |
| <b>4.</b>  | <b>Caractérisation biochimique .....</b>                               | <b>62</b> |
| 4.1.       | Composition en lipides totaux .....                                    | 62        |

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.2. Composition en protéines totales .....</b>                                 | <b>62</b> |
| <b>4.3. Composition en polysaccharides totaux .....</b>                            | <b>63</b> |
| 4.3.1. Rendements d'extraction.....                                                | 63        |
| 4.3.2. Dosage colorimétrique des sucres totaux .....                               | 64        |
| 4.3.3. Analyse par spectroscopie FTIR des extraits polysaccharidiques.....         | 65        |
| <b>4.4. Composition en polyphénols totaux .....</b>                                | <b>67</b> |
| 4.4.1. Rendements d'extraction.....                                                | 67        |
| 4.4.2. Dosage colorimétrique par Folin-Ciocalteu .....                             | 67        |
| 4.4.3. Évaluation de l'activité antioxydante (Test DPPH) .....                     | 68        |
| <b>4.5. Analyse des pigments extraits des macroalgues.....</b>                     | <b>70</b> |
| 4.5.1. Identification des phycobiliprotéines de l'algue rouge.....                 | 70        |
| 4.5.2. Fractionnement des pigments chlorophylliens des algues étudiées .....       | 71        |
| 4.5.3. Analyse spectrophotométrique UV-Vis.....                                    | 74        |
| <b>4.6. Synthèse de la caractérisation biochimique .....</b>                       | <b>77</b> |
| <b>5 Discussion générale.....</b>                                                  | <b>79</b> |
| <b>5.1. Identification Génétique : Succès et Limites.....</b>                      | <b>79</b> |
| <b>5.2. Caractérisation Biochimique : Profils Complémentaires et Limites .....</b> | <b>79</b> |
| <b>5.3. Analyse Critique : Freins et Obstacles .....</b>                           | <b>80</b> |
| <b>CONCLUSION .....</b>                                                            | <b>81</b> |
| <b>REFERENCES .....</b>                                                            | <b>84</b> |

# INTRODUCTION

---

Le littoral algérien, s'étendant sur 2148 kilomètres (INCT, 2023), représente un écosystème d'une richesse écologique et d'un potentiel économique considérable. Cette interface terre-mer abrite une biodiversité marine remarquable, encore insuffisamment explorée et valorisée. Au sein de cette biodiversité, les macroalgues marines occupent une place prépondérante (Plan Bleu, 2020).

Ces organismes photosynthétiques pluricellulaires, véritables ingénieurs des écosystèmes côtiers, constituent une source renouvelable de biomasse et de molécules bioactives. Leur diversité morphologique, leur capacité d'adaptation à des environnements variés et leur composition biochimique unique leur confèrent des structures originales et des activités biologiques d'intérêt (Holdt et Kraan, 2011; Lomartire et al., 2021). Elles suscitent un intérêt croissant à l'échelle mondiale pour leurs applications biotechnologiques dans des secteurs variés tels que la pharmacie, la nutraceutique, la cosmétique ou encore l'agriculture.

Le littoral algérien, bien que reconnu pour sa richesse biologique, demeure largement sous-étudié en ce qui concerne sa flore algale. La Méditerranée occidentale abriterait environ 800 espèces de macroalgues, avec 468 taxons et stades différents d'algues appartenant aux groupes systématiques des *Rhodophyceae*, *Phaeophyceae* et *Chlorophyceae* mentionnées dans l'inventaire des algues marines benthiques d'Algérie réalisé par Perret-Boudouresque et Seridi (1989) (Grimes et al., 2004). Cette diversité, bien que significative, reste fragmentaire, et malgré cette diversité présumée, les connaissances sur la composition spécifique et le potentiel biochimique des espèces locales demeurent insuffisantes (Bensouna et Belhadj, 2024). Cette méconnaissance empêche non seulement une protection environnementale ciblée, mais aussi une valorisation économique de ressources marines précieuses, à l'heure où la bioéconomie bleue est en plein essor mondialement.

Pour explorer pleinement les bienfaits et cibler les biomolécules actives de ces algues, une identification précise et un recensement exhaustif sont des étapes préalables indispensables. Or, l'identification taxonomique traditionnelle, bien qu'indispensable, montre ses limites face à la plasticité phénotypique et à l'existence d'espèces cryptiques (indiscernables morphologiquement mais génétiquement distinctes) (Saunders et Kucera, 2010). Un obstacle majeur réside également dans l'absence quasi-totale de bases de données génétiques de référence pour les espèces marines locales, alors que les approches de biologie moléculaire, notamment les techniques de séquençage génétique, offrent des outils puissants pour une identification précise et la construction de référentiels robustes (Le Gall et al., 2022). En Algérie, où la biodiversité est riche mais encore largement inexplorée (Grimes et al., 2018), établir des bases de données génétiques et cartographier ces espèces est primordial, d'une part pour leur protection, et d'autre part pour leur exploitation durable.

Face à ce constat, ce travail de fin d'études s'inscrit dans une démarche visant à combler une partie de ces lacunes, et répondre à une question scientifique pertinente : Comment caractériser génétiquement et identifier les espèces de macroalgues locales afin d'explorer leur potentiel bioactif dans une démarche de valorisation durable et de biotechnologie bleue ?

La présente étude vient alors contribuer à l'identification génétique des macroalgues du littoral algérien, afin d'initier la constitution d'une première base de données génétiques locale, et explorer le potentiel biochimique de certaines de ces espèces par l'extraction et la caractérisation de biomolécules d'intérêt, notamment en évaluant leur activité antioxydante.

Pour atteindre ces objectifs, une approche combinée a été adoptée. Après un échantillonnage sur deux sites (Alger, Rachgoun), une identification morphologique a été réalisée. Parallèlement, des étapes d'identification génétique ont été entreprises, incluant l'optimisation de protocoles d'extraction d'ADN, d'amplification par PCR et de séquençage de plusieurs espèces de macrophytes. Cette démarche s'est appuyée sur le séquençage du gène de l'ARN

## INTRODUCTION

---

ribosomique 18S (ARNr 18S), un marqueur moléculaire choisi en raison de sa nature universelle chez les eucaryotes, de sa présence en multiples copies dans le génome, et de l'alternance de régions conservées (permettant l'utilisation d'amorces universelles) et de régions variables (permettant la discrimination entre espèces) (Lin et al., 2012). Les séquences obtenues ont été soumises à des analyses bioinformatiques (BLASTn et phylogénie) pour confirmer l'identité taxonomique des espèces échantillonnées. Sur le plan biochimique, deux espèces, *Dictyota dichotoma* et *Sphaerococcus coronopifolius*, ont été sélectionnées. Leur composition globale a été évaluée, et des extractions sélectives de polysaccharides, pigments et polyphénols ont été effectuées avec l'évaluation de l'activité antioxydante et le pouvoir réducteur de certains extraits.

En contribuant à une meilleure connaissance de la biodiversité algale algérienne et de son potentiel, ce travail espère ouvrir la voie à de futures recherches et à des initiatives de valorisation durable de ces précieuses ressources marines.

# REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

---

## **I. Introduction aux macroalgues: diversité et écologie**

### **1 Définition et caractéristiques générales des macroalgues**

Les macroalgues, communément appelées algues marines ou "*seaweeds*" en anglais, forment des groupes vastes et extrêmement diversifiés (polyphylétiques) d'organismes aquatiques, eucaryotes, multicellulaires, photosynthétiques, répartis en trois groupes principaux, les algues vertes (Chlorophytes), les algues brunes (Ochrophytes) et les algues rouges (Rhodophytes). Contrairement aux microalgues qui sont unicellulaires et microscopiques, les macroalgues sont visibles à l'œil nu et présentent une organisation structurale plus complexe présentant une grande diversité de morphologies et de formes de croissance, comprenant des espèces mesurant quelques millimètres à environ 30 mètres (Cabioc'h et al., 2006; Bourgougnon et al., 2021).

Elles colonisent principalement les zones côtières rocheuses et meubles des mers et océans du globe, depuis la zone intertidale jusqu'aux limites de la zone photique, mais certaines espèces peuvent également se développer en eaux douces ou saumâtres (Bensouna, 2024).

La majorité des macroalgues sont fixées sur des substrats durs (rocheux par exemple) à travers des crampons qui sont souvent recouverts de sécrétions riches en polysaccharides et certaines poussent libres sans s'attacher ou sont épiphytes (Zehlila, 2017). Contrairement aux plantes terrestres, elles ne possèdent pas de racines, de tiges ou de feuilles véritables, mais présentent des structures analogues telles que le thalle, le stipe et les frondes, qui peuvent se trouver sous différentes formes, filaments, cordons ou lanières (Faller, 2011).

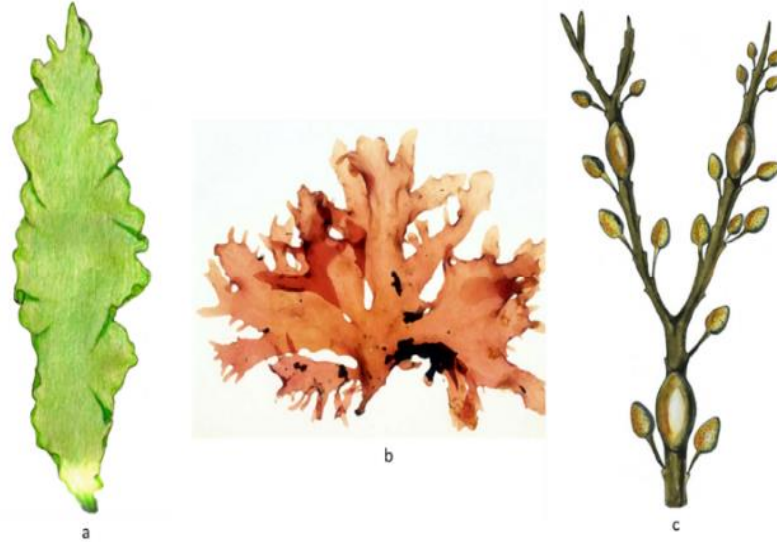
La reproduction des algues peut être asexuée, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de fécondation, ou sexuée, caractérisée par l'intervention de la fusion des gamètes. En général, un seul individu est capable de se reproduire à la fois de manière asexuée et sexuée (Pereira, 2021).

### **2 Composition pigmentaire et classification des macroalgues**

Les macroalgues sont des organismes aquatiques photosynthétiques appartenant au domaine des Eucaryotes et aux règnes des *Plantae* (algues vertes et rouges) et des *Chromista* (algues brunes). Bien que les systèmes de classification varient considérablement au fil du temps et selon les auteurs, il est généralement admis que les macroalgues sont réparties en trois grands groupes phylogénétiques basés sur leur pigmentation, la composition de leurs parois cellulaires et leurs réserves énergétiques (Pereira, 2021) :

- Algues vertes : incluses dans l'embranchement des *Chlorophyta* ; leur pigmentation est identique à celle des plantes (chlorophylles a et b et caroténoïdes) ; elles stockent l'amidon dans leurs chloroplastes et possèdent des parois riches en cellulose (Boudouresque et al., 2006).
- Algues brunes : incluses dans l'embranchement des *Ochrophyta*, classe des Phéophycées; leurs pigments sont les chlorophylles a et c et les caroténoïdes, avec une prédominance de fucoxanthine, responsable de la couleur brunâtre. C'est un groupe qui présente des caractères cytologiques, biochimiques différents des autres groupes avec une absence d'amidon intraplastidial et ayant des réserves cytoplasmiques et vacuolaires de natures diverses (Boudouresque et al., 2006).

- Algues rouges : appartiennent à l'embranchement des *Rhodophyta* ; ils ont comme pigments photosynthétiques la chlorophylle a, les phycobilines (R-phycoeyanine et R-phycoérythrine) et les caroténoïdes (b-carotène, lutéine et zéaxanthine) ; et ont des parois riches en carraghénanes et agar. Sur l'aspect morphologique et même biochimique, elles représentent le groupe le plus diversifié (Payri et al., 2000).



**Figure 1.** Les trois principaux groupes taxonomiques de macroalgues : (a) algues vertes (*Chlorophyta*) ; (b) algues rouges (*Rhodophyta*) ; (c) algues brunes (*Ochrophyta*). (Pereira, 2009)

### 3 Distribution géographique

#### 3.1 A l'échelle mondiale

Les macroalgues sont présentes dans toutes les mers et océans du globe, depuis les zones polaires jusqu'aux tropiques, et de la zone de balancement des marées (zone intertidale ou estran) jusqu'aux limites de la pénétration de la lumière en profondeur (zone infralittorale). Mais leur diversité et leur biomasse varient considérablement en fonction des facteurs environnementaux tels que la température de l'eau, la salinité, la disponibilité des nutriments, l'hydrodynamisme, la nature du substrat et l'intensité lumineuse. (Bensouna et Belhadj, 2024).

Contrairement à une idée répandue associant la richesse biologique marine aux zones tropicales, la plus grande diversité spécifique des macroalgues se trouve plutôt dans les régions tempérées et froides (MNHN, 2025). Les côtes rocheuses des zones tempérées, comme celles de l'Atlantique Nord-Est ou du Pacifique Nord, abritent une flore algale particulièrement abondante et diversifiée (Cabioc'h et al., 2006).

#### 3.2 En Méditerranée

En ce qui concerne la mer Méditerranée, elle abrite une flore algale riche incluant des espèces indigènes, endémiques et exotiques (introduites). Ce bassin semi-fermé présente une forte diversité biogéographique en raison de la variabilité des conditions écologiques d'est en ouest (Thibaut et al., 2023).

#### 3.3 Sur le littoral Algérien

Le littoral Algérien, s'étendant sur plus de 2148 km (INCT, 2023), possède une richesse algale encore sous-exploitée scientifiquement (Grimes et al., 2018). Les zones rocheuses favorisent la

présence de nombreuses espèces de macroalgues fixées. Les premières campagnes d'inventaire montrent une prédominance d'espèces brunes (*Dictyotales*, *Fucales*) et rouges (*Gigartinales*), souvent à fort potentiel biotechnologique (Benyahia et al., 2019; Mansouri et al., 2021).

Par ailleurs, une évaluation de la qualité écologique des communautés de macroalgues le long de la côte algérienne a révélé une diversité notable, bien que des pressions environnementales puissent affecter ces communautés (Anteur et al., 2024).

#### 4 Rôle écologique

Sur le plan écologique, les macroalgues jouent un rôle fondamental dans les écosystèmes côtiers. En tant que producteurs primaires benthiques, elles fixent le dioxyde de carbone par photosynthèse, produisant de la biomasse et de l'oxygène. Elles constituent la base de nombreux réseaux trophiques littoraux, servant de nourriture directe à une multitude d'herbivores (oursins, gastéropodes, certains poissons) et de détritivores après leur décomposition (Bensouna, 2024; MNHN, 2025).

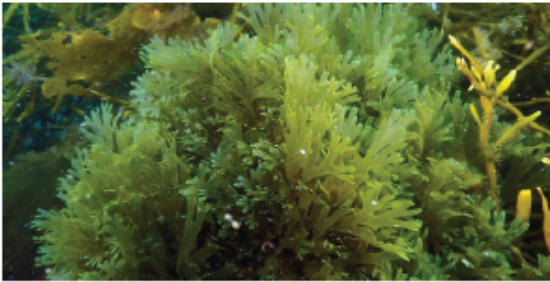
De plus, les peuplements denses de macroalgues, notamment les forêts de kelp et les champs de fucales, forment des habitats complexes tridimensionnels qui offrent abri, nourriture et zones de reproduction à de nombreuses espèces animales (poissons, crustacés, mollusques, etc.), agissant comme de véritables ingénieurs d'écosystèmes et favorisant une biodiversité élevée (Teagle et al., 2017). Elles participent également à la stabilisation des sédiments et à la protection du littoral contre l'érosion par atténuation de la force des vagues.

Enfin, elles jouent un rôle dans les cycles biogéochimiques, notamment le cycle du carbone et sont reconnues comme des bioindicateurs sensibles aux changements environnementaux (Krause-Jensen et Duarte, 2016).

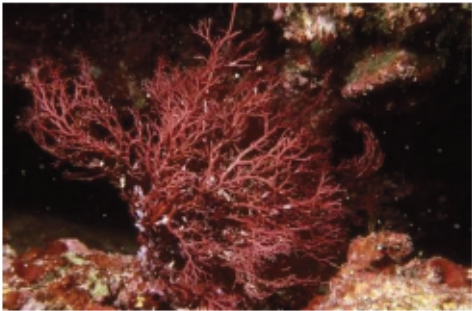
#### 5 Espèces étudiées

Ce travail s'intéresse à un ensemble de macroalgues du littoral algérien, ciblées pour leur potentiel biotechnologique, leur représentativité écologique et leur accessibilité sur le terrain. Ces espèces, appartenant aux trois grands groupes de macroalgues (*Phaeophyceae*, *Rhodophyceae* et *Chlorophyceae*), ont été ciblées pour leur potentiel biotechnologique documenté. Les fiches techniques suivantes résument les principales caractéristiques de ces espèces, en lien avec leur intérêt pour une valorisation durable.

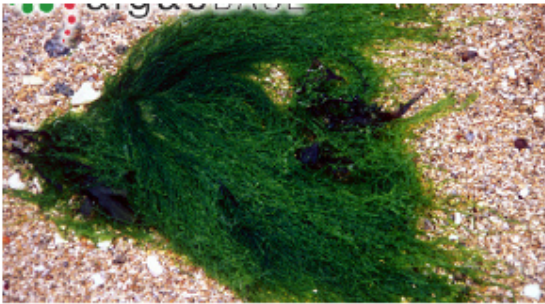
***Dictyota dichotoma* (Hudson) J.V.Lamouroux, 1809**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Aphia ID : 145367</b></p>  <p>(INPN, 2025)</p>                                                                                                                                                                                                                      | <p><b>Taxonomie</b></p> <p><b>Règne :</b> Chromista<br/> <b>Embranchement :</b> Ochrophyta<br/> <b>Classe :</b> Phacophyceae<br/> <b>Ordre :</b> Dictyotales<br/> <b>Famille :</b> Dictyotaceae<br/> <b>Genre :</b> <i>Dictyota</i><br/> <b>Espèce :</b> <i>Dictyota dichotoma</i></p> <p>(Guiry et Guiry, 2025)</p>                                                                                                                                                                                            |
| <p><b>Distribution mondiale</b></p>  <p>(INPN, 2025)</p> <p><b>Distribution locale</b></p> <p>Mostaganem, Jijel, Tlemcen, Annaba, Alger, Oran, Ain Témouchent, Tipaza, Bejaia (BANBIOM, 2025).</p>                                                                       | <p><b>Biologie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Algue brune de petite taille, formant des thalles aplatis et flexibles.</li> <li>• Organisme dioïque, reproduction au printemps et en été.</li> <li>• Présente des reflets bleuâtres en période de multiplication végétative.</li> <li>• Fixée au substrat par un petit disque basal (crampon).</li> <li>• Cycle de vie isomorphe : gamétophytes et sporophytes de morphologie similaire.</li> </ul> <p>(Guiry et Guiry, 2025; DORIS, 2025)</p> |
| <p><b>Utilisation en biotechnologie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Source potentielle de fucoïdanes et polyphénols aux propriétés antitumorales, antivirales et antioxydantes.</li> <li>• Intérêt pour les applications pharmaceutiques, cosmétiques et en biomatériaux.</li> </ul> <p>(Lahaye et Robic, 2007; Andrade et al., 2022)</p> | <p><b>Ecologie</b></p> <p><b>Habitats :</b> Zones intertidales et subtidales, souvent épiphyte sur autres algues et herbiers.</p> <p><b>Profondeur :</b> Flaques de marée jusqu'à 30 m.</p> <p><b>Substrat :</b> Rochers, souvent en position exposée.</p> <p>(DORIS, 2025; INPN, 2025)</p>                                                                                                                                                                                                                     |
| <p><b>Statut UICN :</b> Non évalué</p> <p><b>Statut en Méditerranée :</b> Espèce native et commune</p> <p>(AlgaeBase, 2024; INPN, 2025)</p>                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

***Sphaerococcus coronopifolius* Stackhouse, 1797**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Aphia ID : 144474</b></p>  <p>(DORIS, 2025)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <p><b>Taxonomie</b></p> <p><b>Règne :</b> Plantae<br/> <b>Embranchement :</b> Rhodophyta<br/> <b>Classe :</b> Florideophyceae<br/> <b>Ordre :</b> Gigartinales<br/> <b>Famille :</b> Sphaerococcaceae<br/> <b>Genre :</b> <i>Sphaerococcus</i><br/> <b>Espèce :</b> <i>S. coronopifolius</i></p> <p>(Guiry et Guiry, 2025)</p>                                                         |
| <p><b>Distribution mondiale</b></p>  <p>(INPN, 2025)</p> <p><b>Distribution locale</b></p> <p>Jijel, Mostaganem, Annaba, Tipaza (BANBIOM, 2025).</p>                                                                                                                                                                                                                                      | <p><b>Biologie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Frondes étroites, comprimées, cartilagineuses de couleur écarlate.</li> <li>• Axes principaux brun-rougeâtre foncé, jusqu'à 200 mm de long.</li> <li>• Ramification abondante, distique, subdichotomique.</li> <li>• Phase gamétangiale développée à partir d'un crampon discoïde.</li> </ul> <p>(AlgaeBase, 2025)</p> |
| <p><b>Utilisation en biotechnologie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bromoterpènes bioactifs avec propriétés biologiques remarquables.</li> <li>• <b>Activités biologiques :</b> Propriétés anticancéreuses contre les cellules souches cancéreuses, activité cytotoxique et antimicrobienne contre <i>Staphylococcus aureus</i>.</li> <li>• Applications pharmaceutiques prometteuses en développement.</li> </ul> <p>(MDPI, 2025; ResearchGate, 2025)</p> | <p><b>Ecologie</b></p> <p><b>Habitats :</b> Rochers en zone subtidale.<br/> <b>Profondeur :</b> Jusqu'à 30 m de profondeur.<br/> <b>Comportement :</b> Espèce opportuniste, proliférations nécessitant des concentrations élevées en phosphates.<br/> <b>Répartition :</b> Atlantique et Méditerranée (îles britanniques, Portugal, France).</p> <p>(The Seaweed Site, 2025)</p>       |
| <p><b>Statut de Conservation</b></p> <p><b>Statut UICN :</b> Non évalué.<br/> <b>Statut en Méditerranée :</b> Présente, possiblement introduite dans certaines parties. (EUNIS, 2024)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

| <i>Halopteris Kützinger, 1843</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Aphia ID : 144274</b></p>  <p>(Algaebase, 2025)</p>                                                                                                                                                                                                                                                 | <p><b>Taxonomie</b></p> <p>Règne : Plantae<br/> Embranchement : Ochrophyta<br/> Classe : Phacophyceae<br/> Ordre : Sphacelariales<br/> Famille : Sphacelariaceae<br/> Genre : <i>Halopteris</i><br/> Espèce : <i>Halopteris</i> sp.</p> <p>(Guiry et Guiry, 2025)</p>                                                                                        |
| <p><b>Distribution mondiale</b></p>  <p>(INPN, 2025)</p> <p><b>Distribution locale</b><br/> Jijel, Tipaza, Ain-Temouchent, Mostaganem, Annaba, Tipaza, Alger, Oran, Bejaia (BANBIOM, 2025).</p>                                                                                                          | <p><b>Biologie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Algues brunes (Phacophyceae) ramifiées et filamenteuses.</li> <li>• Peut atteindre 15 cm de long.</li> <li>• Thalle avec axe principal et branches plumeuses alternées.</li> <li>• Morphologie distinctive caractéristique du genre.</li> </ul> <p>(DORIS, 2025)</p>                         |
| <p><b>Utilisation en biotechnologie</b></p> <p><b>Propriétés phytochimiques et propriétés pharmacologiques</b> en cours d'étude.<br/> <b>Biocarburants</b> : Potentiel significatif pour la production de bioéthanol, biogaz et biodiesel.<br/> <b>Aquaculture</b> : Recherches pour l'optimisation de la croissance en conditions contrôlées.</p> <p>(MDPI, 2025; ResearchGate, 2025)</p> | <p><b>Ecologie</b></p> <p><b>Distribution</b> : Eaux tempérées et subtropicales.<br/> <b>Habitats</b> : Zones intertidales et subtidales des rivages rocheux tempérés.<br/> <b>Associations</b> : Souvent associée à des communautés de mollusques.<br/> <b>Préférence</b> : Environnements rocheux protégés.</p> <p>(Frontiers in Marine Science, 2025)</p> |
| <p><b>Statut de Conservation</b></p> <p>Statut UICN : Non évalué      Statut en Méditerranée : Espèce native et commune (INPN, 2025)</p>                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

| <i>Ulva compressa</i> Linnaeus, 1753                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Aphia ID : 145984</b></p>  <p>(Algaebase, 2025)</p>                                                                                                                                                                                                                                      | <p><b>Taxonomie</b></p> <p>Règne : Plantae<br/> Embranchement : Chlorophyta<br/> Classe : Ulvophyceae<br/> Ordre : Ulvales<br/> Famille : Ulvaceae<br/> Genre : <i>Ulva</i><br/> Espèce : <i>Ulva compressa</i></p> <p>(Guiry et Guiry, 2025)</p>                                                                   |
| <p><b>Distribution mondiale</b></p>  <p>(INPN, 2025)</p> <p><b>Distribution locale</b><br/> Skikda, Tlemcen, Ain Témouchent, Mostaganem, Oran, Alger, Boumerdes, Tipaza, Annaba, Jijel (BANBIOM, 2025).</p>                                                                                   | <p><b>Biologie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reproduction rapide et tolérance à une large gamme de conditions environnementales.</li> <li>• Thalles proliférants en forme de lame.</li> <li>• Croissance rapide caractéristique du genre.</li> </ul> <p>(PubMed, 2025; SeaLifeBase, 2025)</p>    |
| <p><b>Utilisation en biotechnologie</b></p> <p><b>Modèle biologique :</b> Étude de la biologie fonctionnelle, assimilation du carbone, interactions bactériennes.</p> <p><b>Applications alimentaires :</b> Source alimentaire durable potentielle avec valeur nutritionnelle étudiée.</p> <p><b>Autres usages :</b> industrie cosmétique</p> <p>(MDPI, 2025; PubMed, 2025)</p> | <p><b>Ecologie</b></p> <p><b>Distribution :</b> Cosmopolite<br/> <b>Habitats :</b> Zones intertidales peu profondes sur roches volcaniques.<br/> <b>Comportement :</b> Formation d'accumulations massives, appauvrissement en oxygène, domination des écosystèmes côtiers eutrophes.</p> <p>(Tandfonline, 2025)</p> |
| <p><b>Statut de Conservation</b></p> <p>Statut UICN : Non évalué      Statut en Méditerranée : Espèce native et commune</p> <p>Préoccupation : Proliférations liées à l'eutrophisation des eaux côtières (AlgaeBase, 2025; INPN, 2025)</p>                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

*Jania J.V.Lamouroux, 1812*

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Aphia ID : 144012</b></p>  <p>(INPN, 2025)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                               | <p><b>Taxonomie</b></p> <p><b>Règne :</b> Plantae<br/> <b>Embranchement :</b> Rhodophyta<br/> <b>Classe :</b> Florideophyceae<br/> <b>Ordre :</b> Corallinales<br/> <b>Famille :</b> Corallinaceae<br/> <b>Genre :</b> <i>Jania</i></p> <p>(Guiry et Guiry, 2025)</p>                                                                                                            |
| <p><b>Distribution mondiale</b></p>  <p>(INPN, 2025)</p> <p><b>Distribution locale</b></p> <p>Cote ouest, Tipaza, Alger, Annaba, Bejaia, Tizi-ouezou, Boumerdes (BANBIOM, 2025).</p>                                                                                                                                              | <p><b>Biologie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Macroalgues rouges avec squelettes calcaires durs et ramifiés.</li> <li>• Segments calcifiés alternés de couleur rouge, rose ou brune.</li> <li>• Intergénicules cylindriques et branches dichotomiques.</li> <li>• Conceptacles marginaux et axiaux caractéristiques.</li> </ul> <p>(MedCrave Online, 2025)</p> |
| <p><b>Utilisation en biotechnologie</b></p> <p><b>Applications potentielles :</b> Protection côtière, amélioration de la qualité de l'eau.</p> <p><b>Composés bioactifs :</b> <i>J. rubens</i> contient de l'acide cicosapentaénoïque avec potentiel anticancéreux.</p> <p><b>Propriétés :</b> Activités antibactériennes documentées, composition biochimique étudiée.</p> <p>(MDPI, 2025; ResearchGate, 2025)</p> | <p><b>Ecologie</b></p> <p><b>Distribution :</b> Largement distribuées mondialement, régions tropicales, subtropicales et tempérées.</p> <p><b>Habitats :</b> Environnements récifaux abrités, herbiers marins.</p> <p><b>Attachement :</b> Crampon unique aux herbiers et autres algues.</p> <p>(DORIS, 2025)</p>                                                                |
| <p><b>Statut de Conservation</b></p> <p><b>Statut UICN :</b> Non évalué (certaines espèces : Données insuffisantes)</p> <p><b>Statut en Méditerranée :</b> Présentes et natives</p> <p>(AlgaeBase, 2025)</p>                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

| <i>Caulerpa racemosa</i> var. <i>cylindracea</i> Sonder, 1845                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Aphia ID : 494168</b></p>  <p>(INPN, 2025)</p>                                                                                                                                                                                                                                                     | <p><b>Taxonomie</b></p> <p>Règne : Plantae<br/> Embranchement : Chlorophyta<br/> Classe : Ulvophyceae<br/> Ordre : Bryopsidales<br/> Famille : Caulerpaceae<br/> Genre : Caulerpa<br/> Espèce : <i>C. racemosa</i><br/> Variété : var. <i>cylindracea</i></p> <p>(Guiry et Guiry, 2025)</p>                                  |
| <p><b>Distribution mondiale</b></p>  <p>(INPN, 2025)</p> <p><b>Distribution locale</b><br/> Mostaganem, Oran, Ain Témouchent, Tipaza, Alger, Skikda, Annaba (BANBIOM, 2025).</p>                                                                                                                        | <p><b>Biologie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Algue verte marine de la famille des Caulerpaceae.</li> <li>• Capacité de propagation rapide et formation de tapis denses.</li> <li>• Développement rhizomateux prononcé.</li> <li>• Reproduction asexuée par fragmentation.</li> </ul> <p>(DORIS, 2025)</p> |
| <p><b>Utilisation en biotechnologie</b></p> <p><b>Métabolites secondaires :</b> Composés bioactifs d'intérêt pharmaceutique en cours d'étude.</p> <p><b>Activités biologiques :</b> Propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et cytotoxiques documentées.</p> <p><b>Recherche :</b> Potentiel d'applications thérapeutiques actuellement en développement.</p> <p>(PubMed, 2025)</p> | <p><b>Ecologie</b></p> <p><b>Profondeur :</b> 0 à 70 m de profondeur.</p> <p><b>Substrat :</b> Tous types (rocheux, béton, sable, boue).</p> <p><b>Impact :</b> Espèce bio-invasive majeure, menace sérieuse pour la biodiversité méditerranéenne.</p> <p>(Nature, 2024)</p>                                                 |
| <p><b>Statut de Conservation</b></p> <p><b>Statut UICN :</b> Non évalué      <b>Statut en Méditerranée :</b> Espèce introduite et invasive</p> <p><b>Gestion :</b> Programmes de contrôle actifs, impact écologique significatif sur les écosystèmes natifs</p> <p>(Algaebase, 2025)</p>                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

## **II. Identification des Macroalgues : Approche combinée**

L'identification précise des espèces de macroalgues est une étape fondamentale pour toute étude écologique, biochimique ou biotechnologique. Traditionnellement basée sur des critères morphologiques et anatomiques, l'identification s'est enrichie ces dernières décennies grâce aux outils de la biologie moléculaire, offrant une approche combinée plus robuste et résolutive, notamment face aux espèces cryptiques ou polymorphes (Le Gall et Saunders, 2007).

### **1 Techniques classiques et clés d'identification**

#### **1.1 Identification morphologique et microscopique**

##### **- L'identification morphologique**

Elle repose sur l'observation attentive des caractéristiques externes de l'algue, visibles à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe binoculaire. Ces caractères incluent la taille générale du thalle, sa forme (filamenteuse, laminaire, encroûtante, buissonnante, etc.), sa couleur (reflétant ses pigments dominants : vert pour les Chlorophycées, brun pour les Phéophycées, rouge pour les Rhodophycées), sa texture (cartilagineuse, molle, coriace), le mode de ramification (dichotomique, pennée, irrégulière), la présence de structures particulières comme les flotteurs (vésicules aérifères), les crampons de fixation, ou encore les organes reproducteurs macroscopiques (réceptacles chez les Fuciales, par exemple) (Lauret et al., 2011).

L'observation de l'habitat (zone intertidale, infralittorale, substrat rocheux ou meuble) et de la saisonnalité peuvent également fournir des indices précieux.

Des clés d'identification dichotomiques, basées sur une série de choix successifs portant sur ces caractères morphologiques, sont couramment utilisées pour guider l'identification.

##### **- L'identification microscopique**

Celle-ci vient compléter l'approche morphologique en permettant l'observation des structures anatomiques et cellulaires fines. Elle requiert l'utilisation d'un microscope optique et souvent la réalisation de coupes histologiques fines du thalle.

Les critères observés incluent l'organisation des tissus (cortex, médulla), la forme et la taille des cellules, la présence et la disposition des chloroplastes, l'existence de structures cellulaires spécifiques (comme les synapses secondaires chez certaines algues rouges, les cryptostomates ou les sores chez les algues brunes), ou encore la morphologie détaillée des organes reproducteurs (spermatocystes, oocystes, cystocarpes, tétrasporocystes) (Le Gall et al., 2022). Ces détails microscopiques sont souvent indispensables pour distinguer des genres ou des espèces morphologiquement très proches.

#### **1.2 Limites des méthodes classiques**

Bien que essentielles, les méthodes d'identification basées sur la morphologie et l'anatomie présentent plusieurs limites. La grande plasticité phénotypique de nombreuses espèces de macroalgues, dont l'apparence peut varier considérablement en fonction des conditions environnementales (hydrodynamisme, luminosité, saisonnalité, disponibilité des nutriments), rend l'identification parfois difficile (Burel et al., 2020).

De plus, certaines espèces sont naturellement polymorphes, présentant différentes formes au cours de leur cycle de vie ou au sein d'une même population. L'existence d'espèces cryptiques, c'est-à-dire des espèces génétiquement distinctes mais morphologiquement indiscernables, constitue une autre limite majeure. L'identification des stades juvéniles ou des fragments d'algues peut également s'avérer impossible par les seules méthodes morphologiques. Enfin, la subjectivité inhérente à l'observation et l'interprétation des caractères, ainsi que la nécessité

d'une expertise taxonomique pointue, peuvent limiter la fiabilité et la reproductibilité de ces méthodes traditionnelles (Le Gall et al., 2022).

## 2 Identification génétique

L'avènement des techniques de biologie moléculaire a révolutionné l'identification des espèces, y compris celle des macroalgues. L'analyse de l'ADN offre une approche objective et puissante pour compléter et parfois corriger les identifications basées sur la morphologie, en particulier pour les cas complexes.

### 2.1 Techniques de biologie moléculaire : Barcoding ADN

L'approche la plus couramment utilisée pour l'identification génétique des macroalgues est le *barcoding ADN* (code-barres ADN). Cette technique repose sur le séquençage d'une courte région standardisée de l'ADN, appelée "code-barres", qui présente une variabilité suffisante pour distinguer les espèces proches, tout en étant suffisamment conservée pour permettre l'utilisation d'amorces universelles pour son amplification par PCR (Réaction en Chaîne par Polymérase) (Hajibabaei et al., 2007; Mishra et al., 2015).

Le processus typique de barcoding ADN comprend plusieurs étapes :

#### — Etape 1: Extraction de l'ADN

L'ADN total est extrait à partir d'un échantillon frais, séché ou conservé (silica gel, éthanol) de l'algue. Différents kits et protocoles d'extraction existent, et leur optimisation peut être nécessaire en fonction du type d'algue et de la présence d'inhibiteurs comme les polysaccharides (Rojas-Herrera et al., 2019).

#### — Etape 2: Amplification par PCR

La région "code-barres" est amplifiée sélectivement en utilisant des amorces spécifiques qui flanquent cette région. Plusieurs marqueurs sont utilisés pour les macroalgues : Pour les algues rouges (*Rhodophyta*), le gène mitochondrial codant pour la sous-unité I de la cytochrome c oxydase (COI ou *cox1*) est souvent le marqueur de choix, bien que son amplification puisse être difficile chez certaines espèces (Saunders, 2005; Le Gall et al., 2022).

Pour les algues vertes (*Chlorophyta*) et brunes (*Phaeophyceae*), le gène chloroplastique codant pour la grande sous-unité de la ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase (*rbcL*) est fréquemment utilisé (Kowalska et al., 2019). D'autres marqueurs chloroplastiques (*tufA*) ou nucléaires (ITS - Internal Transcribed Spacer) peuvent aussi être employés.

#### — Etape 3 : Séquençage

Les produits PCR purifiés sont séquencés pour déterminer l'ordre exact des nucléotides (A, T, C, G) de la région code-barres. Cette technique est couramment utilisée pour l'identification d'organismes, notamment dans le cadre du barcoding moléculaire, où un gène standardisé est séquencé puis comparé à des séquences de référence disponibles dans des bases de données internationales (Hebert et al., 2003).

La méthode de Sanger, historiquement dominante, repose sur l'amplification d'un fragment ciblé, l'incorporation de didésoxynucléotides fluorescents lors de la réaction, et la lecture des fragments par électrophorèse capillaire (Sanger et al., 1977).

Ces dernières années, le domaine a été transformé par l'émergence des technologies de séquençage de nouvelle génération (NGS), qui permettent de lire simultanément des millions de fragments d'ADN, offrant ainsi une couverture massive, rapide et économique des séquences génétiques (Mardis, 2008).

Par ailleurs, les plateformes modernes sont devenues plus compactes, automatisées et accessibles, facilitant leur utilisation dans des laboratoires de recherche en écologie, taxonomie ou génomique (Goodwin et al., 2016).

### — Etape 4 : Analyse et Identification

La séquence obtenue est comparée à des bases de données de référence publiques comme GenBank de *National Center for Biotechnology Information* (NCBI) ou *Barcode of Life Data System* (BOLD) qui contiennent des milliers de séquences de référence d'espèces identifiées. Une correspondance élevée (généralement > 98-99 % d'identité) avec une séquence de référence permet d'attribuer un nom d'espèce à l'échantillon analysé (Mishra et al., 2015).

Le barcoding ADN s'est révélé particulièrement utile pour découvrir des espèces cryptiques, identifier des stades de vie non reconnaissables morphologiquement, et clarifier les relations phylogénétiques entre espèces proches (Saunders, 2005; Kowalska et al., 2019 ).

### 2.2 Analyse bioinformatique et cartographie génétique

Au-delà de la simple identification par barcoding, l'analyse des données de séquençage ADN, ouvre la voie à des études plus approfondies. L'analyse bioinformatique est essentielle pour traiter et interpréter les grandes quantités de données générées. Elle comprend l'assemblage des séquences, l'alignement de séquences multiples, la construction d'arbres phylogénétiques (qui représentent les relations évolutives entre les espèces ou les populations), et l'analyse de la diversité génétique au sein des populations et entre elles (IDEALG, 2017).

La phylogénomique, qui utilise des données issues de génomes entiers ou de larges portions du génome, permet de reconstruire des phylogénies plus robustes et de mieux comprendre l'évolution des lignées d'algues (Le Gall et al., 2022).

### 2.3 Approche combinée : La taxonomie intégrative

Aucune méthode d'identification n'offre à elle seule une fiabilité absolue. L'identification morphologique peut être ambiguë, tandis que l'identification génétique dépend de la qualité des bases de données et du choix des marqueurs et autres facteurs liés à l'espèce. L'approche la plus fiable et la plus complète est donc l'approche combinée, aussi appelée taxonomie intégrative (Le Gall et al., 2022).

La taxonomie intégrative consiste à intégrer les informations issues de différentes sources : morphologie macroscopique, anatomie microscopique, données moléculaires (barcoding, phylogénie), mais aussi parfois données écologiques (distribution, habitat), physiologiques ou biochimiques (profils de métabolites secondaires). Cette approche est particulièrement pertinente pour les groupes taxonomiquement complexes et pour la description de nouvelles espèces. Elle nécessite une collaboration entre taxonomistes classiques, biologistes moléculaires et bioinformaticiens (Le Gall et al., 2022).

### 2.4 Importance des bases de données génétiques pour la valorisation

La constitution de bases de données génétiques robustes et accessibles pour les espèces de macroalgues locales est non seulement cruciale pour l'identification précise et la conservation, mais elle représente également un atout majeur pour la valorisation biotechnologique.

Ces bases de données, en reliant les informations génétiques (séquences, marqueurs) aux données taxonomiques, écologiques et potentiellement biochimiques, facilitent :

- **La Bioprospection ciblée** : En identifiant des espèces ou des populations génétiquement distinctes, on peut cibler plus efficacement la recherche de nouvelles molécules ou d'activités biologiques originales.

- **La traçabilité et l'authentification** : Les données génétiques permettent de garantir l'origine et l'identité des matières premières algales utilisées dans les produits finis, un gage de qualité et de sécurité important pour les industries alimentaire, nutraceutique et cosmétique.
- **La gestion durable des ressources** : L'évaluation de la diversité génétique des populations sauvages permet de définir des stratégies de récolte ou de culture qui préservent le potentiel évolutif de ces ressources et de mettre en place des programmes de sélection visant à améliorer les rendements, la résistance aux stress ou la teneur en biomolécules d'intérêt.

### III. Intérêt biotechnologique des macroalgues

#### 1 Diversité chimique et biologique

Les macroalgues marines, adaptées à un environnement souvent hostile, compétitif et soumis à des stress abiotiques importants (variations de salinité, température, lumière UV, pression hydrodynamique) ont développé au cours de l'évolution une machinerie biochimique unique, produisant une vaste gamme de métabolites secondaires aux structures et fonctions diversifiées.

Ces composés, souvent absents chez les organismes terrestres, confèrent aux algues une résilience remarquable et représentent un réservoir exceptionnel de molécules bioactives pour l'innovation biotechnologique (Cardoso et al., 2021).

#### 2 Principales Biomolécules d'Intérêt : Structures et Bienfaits

La richesse biochimique des macroalgues se traduit par la présence de plusieurs grandes familles de composés, aux propriétés biologiques prometteuses :

##### 2.1 Polysaccharides

Constituants majeurs des parois cellulaires algales (jusqu'à 40-75 % du poids sec), les polysaccharides jouent un rôle structural essentiel et contribuent à la protection contre la dessiccation et les stress mécaniques (Rioux et al., 2017). Leur structure est souvent complexe (*cf.* tableau 1), ramifiée et caractérisée par la présence fréquente de groupements sulfate, une particularité du monde marin qui influence fortement leurs propriétés physico-chimiques et biologiques (Ruocco et al., 2016).

**Tableau 1.** Caractéristiques et avantages des principaux polysaccharides des macroalgues

| Aspect                                                    | Algues brunes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Algues rouges                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Algues vertes                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Polysaccharides principaux</b>                         | Alginates, fucoïdanes, laminaranes                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Carraghénanes, agar                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Ulvanes                                                                                                                             |
| <b>Caractéristiques</b>                                   | <p><b>Alginates :</b> copolymères M/G, en blocs MM-GG-MG → propriétés gélifiantes en présence de <math>\text{Ca}^{2+}</math> (Laurienzo, 2010).</p> <p><b>Fucoïdanes :</b> sulfatés riches en L-fucose, très bioactifs (Ale et al., 2011).</p> <p><b>Laminaranes :</b> <math>\beta</math>-glucanes de réserve (Lahaye &amp; Robic, 2007).</p> | <p><b>Carraghénanes :</b> galactanes sulfatés (<math>\kappa</math>, <math>\iota</math>, <math>\lambda</math>), dépendant des ponts 3,6-anhydrogalactose (Campo et al., 2009).</p> <p><b>Agar :</b> structure plus régulière, extraite surtout de <i>Gracilaria</i>, <i>Gelidium</i> (Lahaye &amp; Robic, 2007).</p> | <p><b>Ulvanes :</b> sulfatés, riches en rhamnose, xylose, acide glucuronique, extraits d'<i>Ulva</i> spp. (Rioux et al., 2017).</p> |
| <b>Applications</b><br>Ruocco et al., 2016 ; Daudé, 2022) | <p>Texturants (E401)</p> <p>Gélifiants</p> <p>Épaississants</p> <p>Agents prébiotiques</p> <p>Filmogènes en cosmétique</p> <p>Activités anticoagulante,</p> <p>Activités antivirale,</p> <p>Activités antitumorale,</p> <p>Activités immunomodulatrice.</p>                                                                                   | <p>Gélifiants (E406–E407)</p> <p>Stabilisants alimentaires et pharmaceutiques</p> <p>Propriétés hydratantes</p> <p>Antivirales</p> <p>Immunomodulatrices</p> <p>Supports microbiologiques.</p>                                                                                                                      | <p>Prébiotiques</p> <p>Modulateurs immunitaires</p> <p>Valorisation dans les biomatériaux et la santé.</p>                          |

## 2.2 Pigments

Indispensables à la photosynthèse en milieu aquatique où la lumière est filtrée, les pigments algaux capturent l'énergie lumineuse sur un large spectre. Leur composition varie selon les groupes taxonomiques.

- Chlorophylles (Chl) : Chl a universelle, accompagnée de Chl b (vertes), Chl c (brunes), Chl d (certaines rouges).
- Caroténoïdes : Liposolubles, jaunes à rouges ( $\beta$ -carotène, lutéine). La fucoxanthine, abondante chez les algues brunes, est particulièrement étudiée pour ses propriétés antioxydantes, anti-obésité et anticancéreuses (Peng et al., 2011).
- Phycobiliprotéines : Hydrosolubles, spécifiques des algues rouges (phycoérythrines rouges, phycocyanines bleues). Elles forment des complexes collecteurs de lumière (phycobilisomes) et possèdent des activités antioxydantes et anti-inflammatoires notables (Fernandes et al., 2014).

Au-delà de leur rôle biologique, ces pigments sont valorisés comme colorants naturels (fucoxanthine, phycocyanine) et comme actifs nutraceutiques et cosmétiques pour leurs propriétés antioxydantes et photoprotectrices (Lafarga et al., 2020; Pangestuti et al., 2021).

### 2.3 Polyphénoles

Métabolites secondaires impliqués dans la défense contre les stress biotiques (herbivorie) et abiotiques (UV, métaux lourds), les polyphénols algaux sont structurellement diversifiés.

- Phlorotannins : Exclusifs aux algues brunes, ce sont des polymères de phloroglucinol aux structures complexes et variées. Ils sont reconnus comme des antioxydants extrêmement puissants, dépassant souvent l'activité de composés terrestres de référence (Li et al., 2011; Gager, 2019).
- Autres composés phénoliques : Acides phénoliques simples, flavonoïdes, tanins sont également présents, notamment chez les algues rouges et vertes, mais généralement en moindre quantité (Thomas et Kim, 2013).

Leurs fortes capacités antioxydantes et anti-inflammatoires ouvrent des perspectives majeures en pharmacologie (prévention de maladies chroniques), en nutraceutique et en cosmétique (anti-âge, protection solaire, apaisant) (Gager, 2019; Pereira et al., 2023; Nagahawatta et al., 2024).

### 2.4 Autres composés d'intérêt

Les macroalgues sont également une source notable de :

- Protéines : Certaines espèces, notamment rouges et vertes, peuvent avoir des teneurs en protéines significatives, avec des profils en acides aminés intéressants (Lomartire et al., 2021).
- Lipides : Riches en acides gras polyinsaturés (AGPI) essentiels comme les oméga-3 (EPA, DHA) et oméga-6, bénéfiques pour la santé cardiovasculaire et le développement neuronal (Holdt et Kraan, 2011).
- Minéraux et oligo-éléments : Elles accumulent les éléments présents dans l'eau de mer (iode, calcium, magnésium, potassium, fer, zinc...), ce qui en fait des compléments nutritionnels potentiels, mais nécessite toutefois une vigilance sur les contaminants éventuels (métaux lourds) (Lomartire et al., 2021).
- Vitamines: Source de vitamines A, C, E et certaines du groupe B.
- Autres métabolites secondaires d'intérêt : Stérols, terpènes, lectines, peptides bioactifs, aux activités antimicrobiennes, antivirales ou hypocholestérolémiantes (Holdt et Kraan, 2011).

## 3 Composés bioactifs et applications industrielles

La richesse moléculaire des macroalgues (*cf.* tableau 2), combinée à leur caractère renouvelable, ouvre la voie à une multitude d'applications dans divers secteurs industriels, positionnant ces organismes au cœur de la bioéconomie bleue.

**Tableau 2.** Applications industrielles des macroalgues selon leurs biomolécules et leur potentiel biotechnologique

| Domaine d'application   | Biomolécules                                                      | Potentiel biotechnologique                                                                                                                                                    |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pharmaceutique / Santé  | Polysaccharides sulfatés (alginate, fucoïdane, carraghénane)      | Activités immunomodulatrices, anticoagulantes, antivirales, anti-inflammatoires, anti-tumorales, bénéfiques cardiovasculaires (Holdt et Kraan, 2011; Lomartire et al., 2021). |
|                         | Polyphénols (phlorotannins)                                       | Activité antioxydante, antidiabétique, anti-inflammatoire (Lomartire et al., 2021; Pangestuti et al., 2021).                                                                  |
|                         | Pigments (chlorophylles, caroténoïdes, phycobilines)              | Activité antioxydante, photoprotectrice, rôle dans la prévention du vieillissement cutané (Lomartire et al., 2021).                                                           |
|                         | Peptides, stérols, acides gras polyinsaturés, terpènes, lectines  | Activités antimicrobiennes, antivirales, hypocholestérolémiantes, anti-inflammatoires (Holdt et Kraan, 2011; Lomartire et al., 2021).                                         |
| Agroalimentaire         | Phycocolloïdes (alginates, carraghénanes, agar-agar)              | Agents gélifiants, épaississants, stabilisants dans de nombreux aliments transformés (Holdt et Kraan, 2011)                                                                   |
|                         | Protéines, fibres, minéraux, vitamines                            | Alimentation fonctionnelle, enrichissement nutritionnel, amélioration du transit intestinal (Holdt et Kraan, 2011).                                                           |
| Cosmétique              | Pigments, polyphénols, extraits totaux                            | Propriétés hydratantes, anti-âge, apaisantes, protectrices UV, texturantes (Pimentel et al., 2018; Riani et al., 2021; Kalasariya et al., 2023).                              |
| Agriculture             | Biomasse entière (macroalgues riches en minéraux, oligo-éléments) | Engrais ou biostimulants naturels, favorisant la croissance végétale et la résistance aux stress (Lomartire et al., 2021).                                                    |
| Énergie / Environnement | Biomasse entière (glucides complexes)                             | Production de biocarburants (bioéthanol, biogaz) et bioplastiques, malgré des verrous techniques et économiques (Milledge et al., 2014).                                      |

## 4 Procédés d'extraction des biomolécules

L'extraction efficace et sélective des biomolécules d'intérêt est une étape clé pour leur valorisation. Le choix de la méthode dépend de la nature de la molécule ciblée, de sa localisation dans l'algue, de sa stabilité, ainsi que des contraintes économiques et environnementales. On distingue généralement les méthodes conventionnelles des techniques plus récentes, souvent qualifiées de " vertes " ou " innovantes ".

### 4.1 Méthodes conventionnelles

Ces méthodes reposent principalement sur l'utilisation de solvants pour solubiliser et extraire les composés d'intérêt après un prétraitement de la biomasse algale (séchage, broyage). Le choix du solvant est crucial et dépend de la polarité de la molécule cible.

- **Polyphénols et certains pigments** (caroténoïdes), des solvants organiques comme l'éthanol, le méthanol, l'acétone, ou des mélanges hydro-alcooliques sont couramment

utilisés, souvent à chaud (macération, Soxhlet) pour améliorer l'efficacité (Gager, 2019; Bermudez et al., 2024).

- **Polysaccharides** (alginates, carraghénanes), l'extraction se fait généralement en milieu aqueux, souvent à chaud et en conditions de pH spécifiques (acide ou alcalin) pour solubiliser les polymères pariétaux (Rioux et al., 2017; Dobrinčić et al., 2020).
- **Phycobiliprotéines** (pigments hydrosolubles), l'extraction se fait en tampon aqueux, souvent après congélation/décongélation ou broyage pour lyser les cellules (Fernandes et al., 2014).

Cependant, ces méthodes peuvent être longues, énergivores (chauffage) et requérantes en solvants organiques potentiellement toxiques et inflammables, posant des problèmes environnementaux et de sécurité. La chaleur peut également dégrader certaines molécules thermosensibles.

#### 4.2 Méthodes innovantes et éco-responsables

Face aux limites des méthodes conventionnelles, des techniques alternatives, plus rapides, plus efficaces et plus respectueuses de l'environnement, ont été développées. Elles visent souvent à améliorer le transfert de matière et/ou à utiliser des solvants plus "verts".

**Tableau 3.** Principes et avantages des techniques alternatives d'extraction appliquées aux algues

| Technique                                        | Principe                                                                                                                                                          | Avantages                                                             | Limites                                |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Extraction Assistée par Ultrasons (UAE)</b>   | Cavitation acoustique : micro-jets & ondes de choc qui cassent les parois cellulaires et facilitent la diffusion du solvant (Wang et al., 2018; Berrouane, 2020). | Rapide, efficace à basse température, réduction de solvant            | Optimisation des paramètres nécessaire |
| <b>Extraction Assistée par Micro-ondes (MAE)</b> | Chauffage rapide par micro-ondes → éclatement des cellules via pression intracellulaire (Yuan et al., 2018; Dobrinčić et al., 2020).                              | Très rapide, forte réduction des temps et du solvant                  | Risque de dégradation thermique        |
| <b>Extraction Assistée par Enzymes (EAE)</b>     | Hydrolyse sélective des parois par des enzymes spécifiques (Wang et al., 2018; Fournière, 2021).                                                                  | Douce, spécifique, conditions modérées                                | Coût élevé des enzymes                 |
| <b>Extraction par Fluide Supercritique (SFE)</b> | Utilise du CO <sub>2</sub> supercritique comme solvant . Co-solvants nécessaires pour molécules polaires (Herrero et al., 2010).                                  | Propre, sans solvant résiduel, excellent pour lipides/pigments        | Coût élevé de l'équipement             |
| <b>Autres (PEF, PLE, etc.)</b>                   | Champs électriques pulsés, solvants sous pression ou combinaisons pour maximiser l'extraction.                                                                    | Optimisation du rendement, sélectivité, impact environnemental réduit | Peu disponibles à échelle industrielle |

Le choix de la méthode d'extraction optimale est donc un compromis entre l'efficacité, la sélectivité, le coût, la rapidité, la sécurité, l'impact environnemental et la compatibilité avec les applications visées (alimentaire, pharmaceutique, cosmétique).

### 4.3 Facteurs influant sur l'efficacité de l'extraction

Plusieurs facteurs peuvent influencer significativement le rendement et la qualité des extraits obtenus :

**Tableau 4.** Facteurs influençant le rendement et la qualité des extraits algaux

| Liés à la matière première algale                                                                                                                                      | Selon le procédé d'extraction                                                                                              | Paramètres spécifiques aux techniques innovantes (Dobrinčić et al., 2020)                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Espèce &amp; origine géographique</b><br>Composition biochimique variable selon l'espèce et les conditions environnementales locales.                               | <b>Solvant (type, polarité)</b><br>Doit être adapté à la nature de la molécule cible.                                      | <b>Ultrasons (UAE)</b><br>Puissance, fréquence à ajuster pour maximiser la cavitation.                                                       |
| <b>Stade de développement &amp; saisonnalité</b> Variation des teneurs en biomolécules selon le cycle de vie et la saison.<br>(Gager, 2019)                            | <b>Température</b> améliore l'extraction mais risque de dégradation thermique de composés sensibles.                       | <b>Micro-ondes (MAE)</b><br>Puissance et durée d'irradiation déterminent l'efficacité et la sélectivité.                                     |
| <b>Prétraitement</b> (séchage, broyage, lavage) Influence la libération des composés et donc le rendement (taille de particule, accessibilité).<br>(Wang et al., 2018) | <b>Temps d'extraction</b><br>Temps optimal à définir : trop court = faible rendement ; trop long = impuretés, dégradation. | <b>Enzymes (EAE)</b> Type, concentration et conditions d'action (pH, T°) très spécifiques.                                                   |
|                                                                                                                                                                        | <b>pH</b> Influence la solubilité et stabilité de certains composés (ex : alginates, pigments).                            | <b>Fluide supercritique (SFE)</b><br>Température et pression du CO <sub>2</sub> supercritique influencent la solubilité des composés ciblés. |

## 5 Perspectives d'innovation

Au-delà des applications établies, la recherche continue d'explorer de nouvelles voies de valorisation. L'optimisation des procédés d'extraction "verts", le développement de l'algoculture pour des espèces spécifiques à haute valeur ajoutée, la modification enzymatique ou chimique des biomolécules pour améliorer leurs propriétés, et l'utilisation des outils de la biologie synthétique pour produire des composés algaux dans des systèmes hétérologues sont autant de pistes prometteuses pour l'avenir de la filière (Metz et al., 2024).

## 6 Freins et Enjeux : écologiques, économiques et juridiques

La valorisation des macroalgues, bien que prometteuse, se heurte à divers enjeux et freins, qu'ils soient écologiques, économiques ou juridiques. Une approche durable nécessite de les identifier et de les adresser, particulièrement dans le contexte algérien.

### 6.1 Enjeux écologiques et réglementaires

La première préoccupation est d'assurer que l'exploitation des macroalgues ne compromette pas l'équilibre des écosystèmes côtiers où elles jouent un rôle fondamental (*cf.* Section 1.4). La surexploitation des ressources algales naturelles constitue un risque majeur pour la biodiversité marine et l'équilibre des écosystèmes côtiers.

La récolte non durable peut entraîner une diminution des populations d'algues, affecter les habitats associés et perturber les chaînes trophiques (Araújo et al., 2021). Il est donc crucial de mettre en place des pratiques de récolte responsables et, si possible, de développer l'algoculture pour réduire la pression sur les stocks sauvages (FAO, 2020). La gestion des espèces invasives,

comme certaines algues brunes, représente également un défi écologique et peut offrir des opportunités de valorisation (Verlaque et al., 2015).

En Algérie, comme dans de nombreuses régions méditerranéennes, l'état des connaissances sur la distribution précise, l'abondance et la dynamique des populations de nombreuses espèces de macroalgues reste parcellaire (Bensouna et Belhadj, 2024). Ce manque de données rend difficile l'évaluation des stocks exploitables et la définition de quotas de prélèvement durables.

Enfin, le changement climatique (réchauffement des eaux, acidification, événements extrêmes) représente une menace majeure pour les peuplements algaux, modifiant leur distribution et leur physiologie, ajoutant ainsi, une incertitude supplémentaire quant à la disponibilité future de la ressource (Jueterbock et al., 2021).

Sur le plan réglementaire, la protection de la biodiversité marine est encadrée par des conventions internationales telles que la Convention sur la Diversité Biologique (CDB) de 1992, qui promeut la conservation de la diversité biologique, l'utilisation durable de ses éléments et le partage juste et équitable des avantages découlant de l'utilisation des ressources génétiques.

Le Protocole de Nagoya (2010) à la CDB renforce ces principes en établissant un cadre international pour l'accès aux ressources génétiques et le partage des avantages *Access and Benefit-Sharing* (ABS), ce qui est particulièrement pertinent pour la valorisation des biomolécules algales (Biber-Klemm et al., 2017).

En Algérie, la Loi n° 02-02 du 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral et la Loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement constituent les principaux cadres juridiques. Cependant, des réglementations spécifiques à la récolte, à la transformation et à la commercialisation des algues et de leurs produits dérivés sont encore peu développées ou fragmentées, ce qui peut freiner l'investissement et l'innovation (Salhi, 2017).

### **6.2 Enjeux économiques et structuration de la filière**

Le développement d'une filière de valorisation des macroalgues en Algérie fait face à plusieurs défis économiques. Bien que le marché mondial des produits dérivés d'algues soit en croissance (notamment pour les phycocolloïdes, les nutraceutiques et les cosmétiques), la compétitivité des acteurs locaux dépend de leur capacité à maîtriser les coûts de production, de récolte ou de culture, et de transformation.

Les freins économiques incluent :

- Coûts d'investissement : L'algoculture et les technologies d'extraction innovantes (SFE, MAE, etc.) nécessitent des investissements importants qui peuvent être difficiles à mobiliser, notamment pour les petites et moyennes entreprises (Milledge et al., 2014).
- Variabilité de la ressource : La disponibilité et la qualité de la biomasse peuvent varier fortement selon les saisons et les années, rendant l'approvisionnement industriel incertain et fluctuant en coût.
- Manque de structuration de la filière : En Algérie, la filière algues est encore embryonnaire. Il manque souvent une coordination entre les acteurs de la recherche, les récoltants/cultivateurs, les transformateurs et les marchés finaux (Plan Bleu, 2020).
- Accès au marché : La mise sur le marché de nouveaux ingrédients (alimentaires, cosmétiques, pharmaceutiques) issus d'algues nécessite de répondre à des normes de qualité et de sécurité strictes, ce qui implique des coûts d'analyse et de certification.

- Rentabilité des applications à faible valeur ajoutée : La production de biocarburants ou de bioplastiques à partir d'algues reste souvent économiquement peu viable face aux alternatives fossiles, malgré leur intérêt environnemental (Milledge et al., 2014).

Au niveau mondial, le marché des produits à base d'algues est en croissance constante, avec une valeur estimée à plusieurs milliards de dollars, tirée par la demande en ingrédients alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques (Global Market Insights, 2023).

Cependant, l'Algérie ne capte qu'une part infime de ce marché. Pour y remédier, il est essentiel de développer des stratégies nationales de soutien à l'innovation bleue, incluant des incitations fiscales, des financements pour la recherche et le développement, et des partenariats public-privé (Expertise France, 2024).

### 6.3 Enjeux juridiques et cadre réglementaire

Un cadre juridique et réglementaire clair et adapté est indispensable pour encadrer le développement de la filière algues. Plusieurs aspects sont cruciaux :

- Les modalités d'autorisation de récolte de la biomasse sauvage (permis, concessions, zones autorisées, quotas) doivent être définies et appliquées pour garantir la durabilité écologique (Plan Bleu, 2020).
- Comme mentionné, les produits destinés à l'alimentation humaine, à la cosmétique ou à la pharmacie doivent respecter des réglementations spécifiques en matière de sécurité, d'étiquetage et d'allégations, qui peuvent être complexes et coûteuses à satisfaire.
- Manque de textes d'application : En Algérie, comme souligné dans le contexte des aires marines protégées, il peut exister un décalage entre l'existence de lois-cadres et la publication des textes d'application nécessaires à leur mise en œuvre effective sur le terrain (CAR/ASP, s.d. - Rapport Reghaia). Ce vide juridique peut freiner les initiatives privées et publiques.

La mise en place d'une gouvernance claire, intégrant les dimensions environnementales, économiques et sociales, et s'appuyant sur un cadre juridique opérationnel, est un prérequis pour lever les freins réglementaires à la valorisation durable des macroalgues.

### 6.4 Autres freins

Outre les aspects écologiques et économiques, d'autres freins entravent spécifiquement l'étude et la valorisation des macroalgues en Algérie. L'absence de bases de données génétiques nationales complique la traçabilité et la caractérisation des souches locales, un constat largement partagé au niveau méditerranéen en raison de bases de données fragmentées (Saunders et McDevit, 2012; Mansouri et al., 2021)..

Sur le plan réglementaire, l'accès aux ressources marines pour la recherche et la valorisation peut être complexe, nécessitant des autorisations multiples et des procédures parfois lourdes. Enfin, la sensibilisation du public et des décideurs à l'immense potentiel des macroalgues est encore limitée, ce qui peut ralentir l'adoption de politiques de soutien et l'investissement dans ce secteur prometteur (Mannino et al., 2021).

Lever ces freins nécessite une approche concertée impliquant les pouvoirs publics, les instituts de recherche, les entreprises et la société civile, afin de construire une stratégie régionale, ou même, nationale pour une économie bleue basée sur les algues qui soit à la fois innovante, compétitive et durable.

## MATERIEL ET METHODES

---

## MATERIEL ET METHODES

Ce chapitre présente l'ensemble des moyens matériels, ainsi que les démarches méthodologiques mises en œuvre pour l'échantillonnage, l'identification, ainsi que la caractérisation biochimique et génétique des macroalgues sélectionnées dans le cadre de cette étude.

Ce travail a été réalisé en collaboration entre deux structures à savoir le laboratoire de Conservation et Valorisation des Ressources Marines LCVRM de l'École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL), et la plateforme génomique PLAGENOR de l'École Supérieure des Sciences Biologiques d'Oran (ESSBO).

### I.MATÉRIEL

Le matériel, ustensiles ainsi que les consommables utilisés, au cours de cette étude sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 5.** Récapitulatif du matériel utilisé dans l'ensemble des analyses

| Catégorie                             | Matériel de Biochimie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Matériel de Génétique                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Matériel biologique</b>            | <i>Dictyota dichotoma</i> , <i>Sphaerococcus coronopifolius</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <i>D. dichotoma</i> , <i>S. coronopifolius</i> , <i>Jania</i> sp., <i>Halopteris</i> sp., <i>Caulerpa racemosa</i> , <i>Ulva compressa</i>                                                                                  |
| <b>Produits chimiques</b>             | Hexane, acétone, éthanol, eau distillée, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> concentré, NaOH, catalyseur Kjeldahl (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , CuSO <sub>4</sub> , Se), acide borique, acide sulfurique N/50, phénol 5 %, DPPH, carbonate de sodium, Folin-Ciocalteu, acide gallique, glucose, gel de silice, méthanol, éthanol, acide ascorbique | Tampon TAE, colorant de charge, BigDye™ Terminator v3.1, tampon de séquençage, DynaBeads™, éthanol, formamide, solutions de lavage, amorces, eau ultrapure, SYBR Safe, Chloroforme, isopropanol, CTAB, Tris-Hcl, PK, ARNase |
| <b>Appareillage &amp; équipements</b> | Extracteur Soxhlet, évaporateur rotatif, FTIR (Jasco FTIR-4X), spectrophotomètre (UV-1800), centrifugeuse, bain-marie, agitateur magnétique, étuve, lyophilisateur, bain à ultrasons, colonne de chromatographie, distillateur (Büchi), balance de précision                                                                                      | Thermocycleur, séquenceur capillaire ABI 3130xl, cuve d'électrophorèse, transilluminateur UV, support magnétique, balance, hotte à flux laminaire                                                                           |
| <b>Consommables &amp; ustensiles</b>  | Cartouches cellulose, tubes Falcon, tubes à essai, mortier et pilon, spatules, verrerie, tamis, gants, papier aluminium, microbalances, filtres Whatman                                                                                                                                                                                           | Pointes stériles, tubes PCR, gel d'agarose, micropipettes, cassettes de séquençage, colonnes d'élution, plaques PCR, microtubes Eppendorf, gants, lunettes de protection, Parafilm                                          |

## II. MÉTHODES

### 1 Travail sur terrain

#### 1.1 Pré-échantillonnage

Avant de procéder à l'échantillonnage, les espèces de macroalgues et les sites de collecte ont été choisis selon plusieurs considérations scientifiques et logistiques :

##### 1.1.1 Critères de sélection des espèces

- Disponibilité et abondance : Les espèces sélectionnées devaient être suffisamment présentes et accessibles sur le littoral algérien pour permettre un échantillonnage représentatif et répété si nécessaire.
- Diversité taxonomique : Des espèces appartenant aux trois grands groupes de macroalgues (algues brunes, rouges et vertes) ont été ciblées afin d'explorer un large spectre de potentiel biotechnologique.
- Potentiel biotechnologique connu ou supposé : Une attention particulière a été portée aux espèces pour lesquelles la littérature scientifique suggère un intérêt, du point de vue production de biomolécules bioactives.

##### 1.1.2 Sélection des sites d'échantillonnage

- Variabilité écologique des milieux (rocheux, sableux, exposés ou abrités).
- Pressions anthropiques différenciées (zone périurbaine vs zone isolée).
- Accessibilité par des clubs de plongée conventionnés avec l'ENSSMAL.
- Expérience préalable : plongées antérieures lors du stage de plongée de premier degré (P1) et lors du camp scientifique BIODIVAL 2 à Rachgoun.

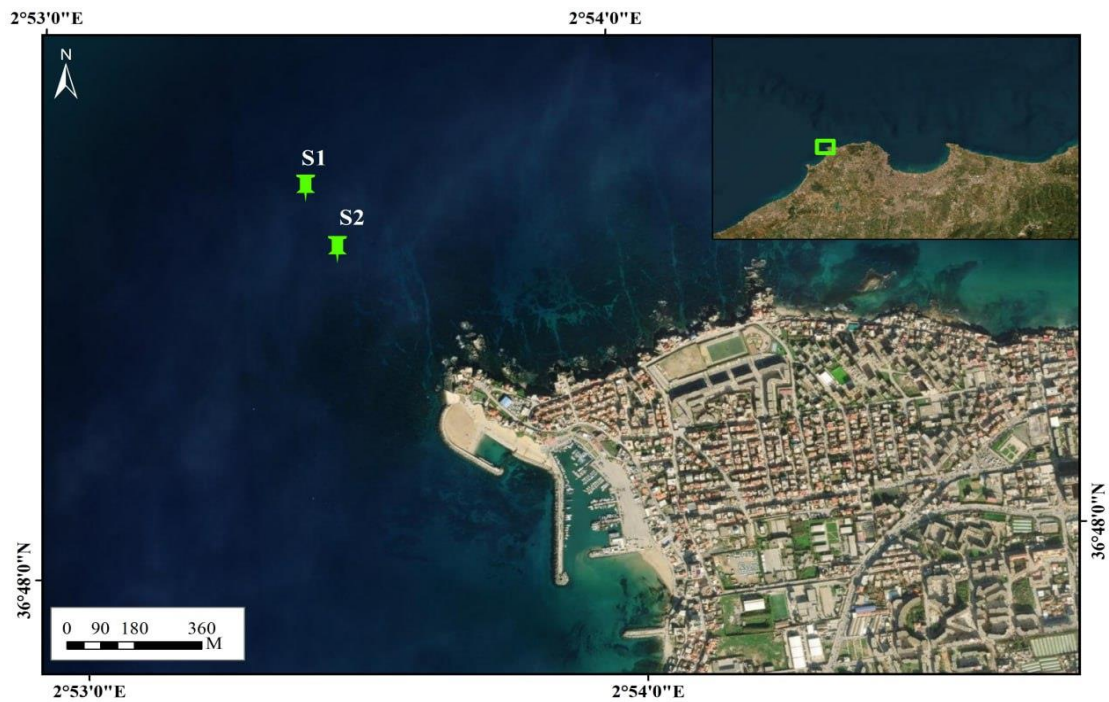
Les sites ont été choisis pour représenter des zones géographiques distinctes du littoral algérien, offrant des conditions environnementales potentiellement variées et une diversité algale intéressante. Le choix s'est également porté sur des zones où sont implantés des clubs de plongée conventionnés avec l'ENSSMAL, notamment le Paradive Club à Rachgoun (Aïn Témouchent) et le Club El Mordjane à La Madrague (Alger), ce qui a facilité l'organisation logistique. Ces sites nous étaient déjà familiers grâce à des plongées antérieures effectuées dans le cadre d'un stage (P1) et du camp scientifique BIODIVAL 2 favorisant, ainsi, une connaissance préalable de la biodiversité locale.

### 1.2 Échantillonnage

#### 1.2.1 Zones d'étude

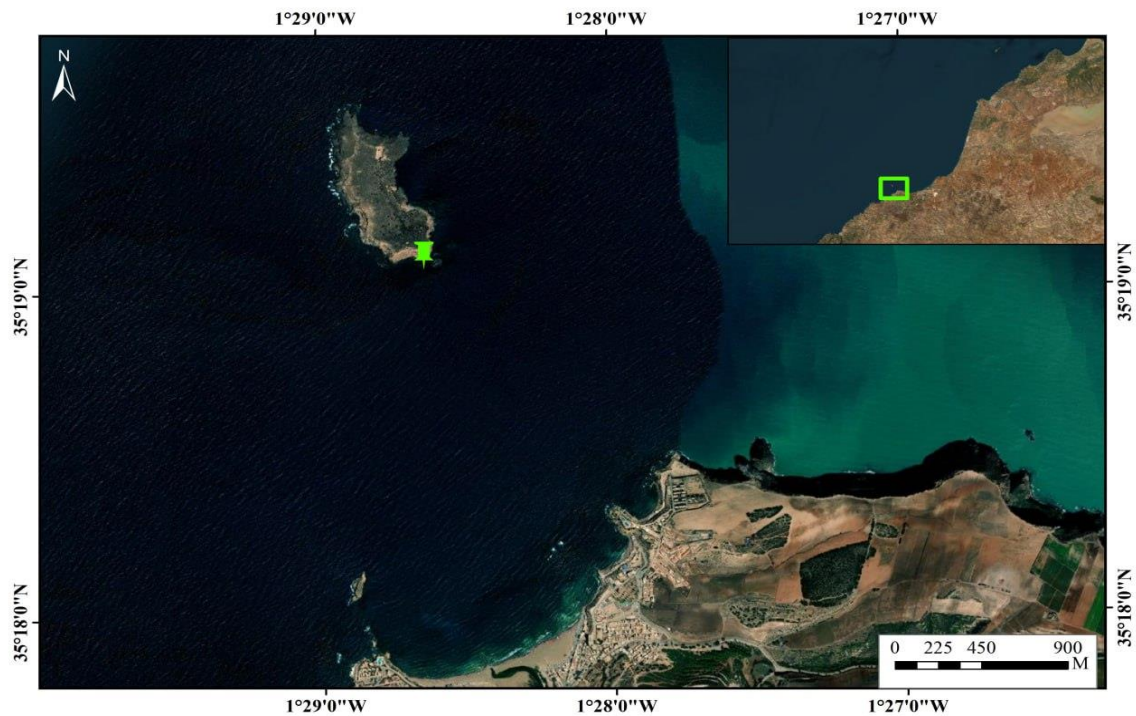
- Zone Centre (La Madrague, Alger) : Au large de la plage Ouest de la Madrague, Ain Benian, une zone côtière rocheuse à l'ouest d'Alger, bien connue pour sa biodiversité marine. Accessible, avec une exposition aux courants marins modérée. Elle représente un environnement côtier typique de la région d'Alger (fig.2).

## MATERIEL ET METHODES



**Figure 2.** Localisation des sites d'échantillonnage sur Alger; Coordonnées GPS : 36° 48' 11" N, 2° 55' 18" E (Google Earth, 2025)

- Zone Ouest (Rachgoun, Aïn Témouchent) : Ile de Rachgoun, ou communément appelée Leila, se situe au nord-ouest du littoral de la wilaya de Ain Témouchent. Elle est caractérisée par des côtes rocheuses (roches volcaniques) exposées aux vagues, et une sédimentologie de sable fin et moyen, offrant un habitat diversifié, classé comme site d'intérêt biologique. Conditions de plongée parfois délicates, mais forte richesse spécifique (Fig 3).



**Figure 3.** Localisation des sites d'échantillonnage sur Rachgoun ; Coordonnées GPS : 35° 19' 17" N, 1° 28' 48" O (Google Earth, 2025).

### 1.2.2 Collecte

Les prélèvements ont été effectués par plongée en scaphandre autonome (*SCUBA Diving*) (fig.4.) en respectant toutes les règles de sécurité. Les algues ont été détachées manuellement du substrat rocheux en veillant à prélever des thalles entiers et sains. Chaque échantillon a été immédiatement placé dans des sacs plastiques individuels, immergés dans l'eau de mer pour maintenir l'hydratation et minimiser le stress avant le transport au laboratoire.



**Figure 4.** Echantillonnage en plongée sous-marine

Lors de chaque plongée, les paramètres physico-chimiques de l'eau (température, salinité, oxygène dissous, conductivité et pH) ont été mesurés *in situ* à l'aide d'une valise multi-paramètres, afin de caractériser l'environnement de prélèvement.

- À Alger : Deux plongées ont été effectuées en février 2025, à des profondeurs variant entre 13 et 20 mètres. Les conditions sous-marines étaient favorables, permettant de prélever deux échantillons algaux (*Dictyota dichotoma* et *Sphaerococcus coronopifolius*) en quantité suffisante pour les analyses génétiques et surtout biochimiques.
- À Rachgoun : Une seule plongée a été réalisée en avril 2025, à une profondeur de 7 à 10 mètres. Les conditions sous-marines étaient moins favorables ce qui a entraîné la collecte d'une biomasse plus faible. L'objectif principal de cette collecte était la diversité des espèces plutôt que la quantité, avec environ sept échantillons réservés à l'identification génétique uniquement.

## 2 Travail au laboratoire (LCVRM)

### 2.1 Prétraitement et conditionnement des échantillons

#### 2.1.1 Échantillons collectés à Alger

Après la collecte en mer (plongée), les échantillons d'algues provenant des sites côtiers d'Alger ont été immédiatement transportés dans des glacières, au laboratoire de conservation et valorisation des ressources marines (LCVRM) de l'ENSSMAL. Une fois arrivés, plusieurs étapes successives ont été appliquées :

- Tri : les échantillons ont été triés manuellement, afin d'éliminer les épiphytes et les autres espèces associées.
- Lavage : chaque échantillon a été soigneusement lavé à l'eau du robinet, pour éliminer les impuretés grossières (sable, débris), puis rincé à l'eau distillée.

- Conditionnement : les algues ont été placées dans des sacs plastiques zip étiquetés, avec le code de l'échantillon, puis immédiatement congelées à -20 °C.
- Répartition des portions :
  - Une petite portion a été dédiée à l'analyse taxonomique (identification macroscopique et microscopique).
  - Une autre portion a été lavée avec de l'éthanol 70 % (v/v), répartie dans des pots stériles, puis congelée à -20 °C en vue des analyses génétiques ultérieures.
- Transfert vers l'ESSBO : les portions destinées à l'analyse génétique ont ensuite été transportées par voie terrestre vers le laboratoire PLAGENOR de l'ESSBO, dans des glacières contenant de la carboglace, afin de préserver l'intégrité de l'ADN. À réception, les échantillons ont été stockés à -80 °C.

### 2.1.2 Échantillons collectés à Rachgoun

Pour les échantillons issus du site de Rachgoun (Aïn Témouchent), le protocole a été adapté selon les moyens disponibles sur le terrain :

- Prétraitement sur site : les échantillons ont été directement triés après la plongée, au niveau du club de plongée PARADIVE, avant d'être lavés successivement à l'eau de robinet, puis à l'eau distillée et enfin à l'éthanol 70 %.
- Conditionnement : les échantillons ont été placés dans des pots stériles, soigneusement codés selon la pigmentation des algues.
- Transport : les pots ont été maintenus dans des glacières durant le transport jusqu'au laboratoire PLAGENOR (ESSBO). À réception, les échantillons ont été stockés à -80 °C, en vue de l'extraction et des analyses génétiques ultérieures.

## 2.2 Etude de la flore algale : identification taxonomique

L'identification taxonomique est une étape essentielle pour relier les activités biochimiques ou biotechnologiques à des espèces algales précises. Elle a été réalisée à deux niveaux et de manière différenciée selon le site de collecte.

### 2.2.1 Observation macroscopique

Tous les échantillons ont d'abord été examinés à l'œil nu puis à l'aide d'une loupe binoculaire (réf. OPTECH), afin d'identifier les principaux caractères morphologiques généraux (forme du thalle, ramification, texture, couleur, taille), permettant une classification préliminaire.

### 2.2.2 Observation microscopique

Elle n'a concerné que les deux échantillons collectés sur le site d'Alger. Les autres, notamment ceux de Rachgoun, n'ont pas été étudiés au microscope, en raison du temps limité, du manque de moyens et de la faible quantité de biomasse prélevée.



**Figure 5.** Poste de travail dédié à l'identification microscopique des macroalgues.

Des coupes transversales manuelles ont été réalisées à l'aide d'un scalpel, puis montées entre lame et lamelle dans de l'eau distillée. Les observations ont été effectuées au microscope optique (réf. OPTIKA, Italy), avec prise de photos des structures internes.

La détermination a été affinée par comparaison avec les descriptions issues de la littérature et des clés d'identification dédiées aux macroalgues (Fischer, 1987; Perret-Boudouresque et Seridi, 1989; Verlaque et al., 2015), puis confirmée par le Docteur Bahbah Lamia (ENSSMAL).

La nomenclature actuelle et la classification ont été vérifiées via la base AlgaeBase (Guiry et Guiry, 2025).

### **3 Identification génétique (ESSBO)**

La caractérisation génétique des macroalgues a été réalisée à la plateforme de génomique PLAGENOR de l'ESSBO, dans le but de confirmer l'identification taxonomique morphologique et d'initier une cartographie génétique des espèces étudiées, contribuant ainsi au développement d'une première base de données génétiques locale pour les espèces marines algériennes.

Cette approche moléculaire a suivi plusieurs étapes clés, de l'optimisation des protocoles d'extraction, jusqu'à l'analyse bioinformatique des séquences d'ADN.

#### **3.1. Optimisation de l'extraction de l'ADN génomique**

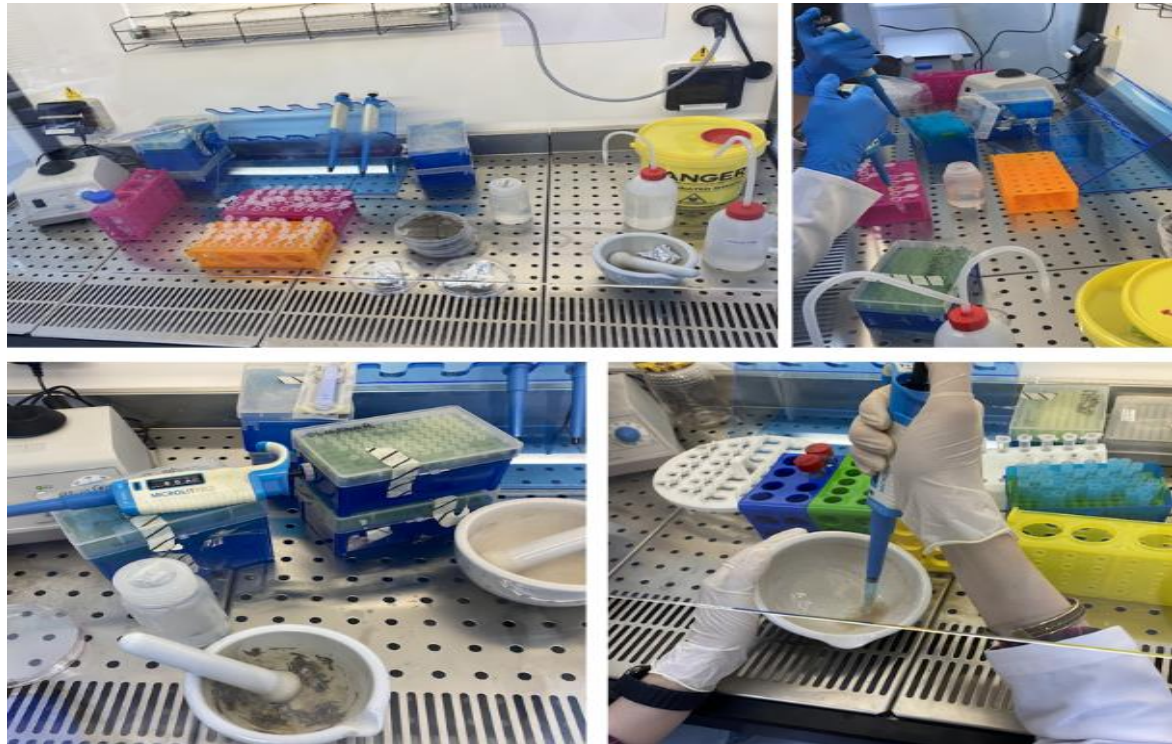
L'extraction d'un ADN génomique pur, intact et exempt d'inhibiteurs est une condition essentielle à la réussite des analyses moléculaires. Or, les matrices biologiques marines, et particulièrement les macroalgues, présentent une composition biochimique complexe, souvent riche en polysaccharides, composés phénoliques et autres métabolites secondaires susceptibles d'interférer lors des manipulations (Doyle et Doyle, 1987).

Face à ces contraintes, une démarche d'optimisation progressive de l'extraction a été entreprise, en combinant et adaptant deux méthodes distinctes afin d'obtenir un ADN de qualité suffisante pour les applications en aval.

## MATERIEL ET METHODES

### ○ Phase d'optimisation initiale : protocole AIONA – PLAGENOR

La première phase a été réalisée à l'aide du kit AIONA, développé à la plateforme PLAGENOR, appliqué à trois espèces codées B, E et G. Les échantillons (400 mg de matériel algal préalablement lavé à l'éthanol 70 % et conservé à -80 °C) ont été broyés avec un tampon de lyse préchauffé à 70 °C. Le lysat obtenu a été transféré dans des tubes Eppendorf, vortexé, puis incubé à 65 °C pendant 45 minutes.



**Figure 6.** Principales étapes de la lyse cellulaire pour l'extraction de l'ADN génomique à l'aide du kit AIONA.

Après centrifugation à 1400 g pendant 15 minutes, le surnageant a été transféré dans un nouveau tube, mélangé à 500  $\mu$ L de tampon de liaison, puis passé à travers une colonne de silice par centrifugation (14000 g, 2 min), cette étape utilise l'affinité de l'ADN pour la silice en présence de sels chaotropiques pour éliminer les contaminants résiduels. Le filtrat a été éliminé et deux lavages successifs ont été réalisés avec les tampons de lavage 1 et 2. L'élution de l'ADN s'est faite à l'aide de 50  $\mu$ L de tampon d'élution préchauffé à 70 °C, avec une incubation de 5 minutes à température ambiante suivie d'une centrifugation (2 min), puis conservation à -20 °C.

Une phase d'adaptation méthodologique a alors été engagée suite aux résultats insatisfaisants, impliquant l'introduction de l'espèce D dans les tests et la modification progressive de certaines étapes du protocole initial (temps d'incubation, vitesse de centrifugation, purification à la RNase, etc.).

### ○ Protocole CTAB optimisé

Suite à la disponibilité du bromure de cétyltriméthylammonium (CTAB) sur la plateforme, le protocole CTAB (Doyle et Doyle, 1987)) a été mis en œuvre sur les espèces restantes (CRP, S, ENT, M et V), avec quelques modifications.

L'extraction a été réalisée à partir de 500 mg d'algues pré-congelés et broyées à l'aide d'un mortier et pilon refroidis. Le broyat a été homogénéisé dans 800  $\mu$ L de tampon CTAB (NaCl, EDTA, Tris-HCl, CTAB et  $\beta$ -mercaptoéthanol) préchauffé à 65 °C.

## MATERIEL ET METHODES

Le mélange a été incubé à 65 °C pendant 90 minutes avec agitation périodique après l'ajout de la protéinase K (PK).

Après refroidissement, une extraction à l'aide de 800 µL de chloroforme-alcool isoamylique (24:1) a été réalisée sous hotte aspirante, suivie d'une centrifugation (13 000 rpm, 10 min, 4 °C). La phase aqueuse a été récupérée, et l'extraction répétée pour assurer la pureté.

Afin de favoriser la précipitation des impuretés solubles, du NaCl a été ajouté à la phase aqueuse. Ensuite, 2/3 volumes d'isopropanol froid ont été incorporés, et le mélange a été homogénéisé par retournement doux (inversion).

Une incubation *overnight* à -20 °C a permis de précipiter efficacement l'ADN. La précipitation a été suivie d'une centrifugation prolongée (30 minutes à 4 °C) pour collecter le culot d'ADN, lequel a été ensuite lavé avec de l'éthanol 70 % glacé afin d'éliminer les sels résiduels, puis suspendu dans 50 µL de tampon TE (10 mM Tris-HCl, 1 mM EDTA, pH 8.0).

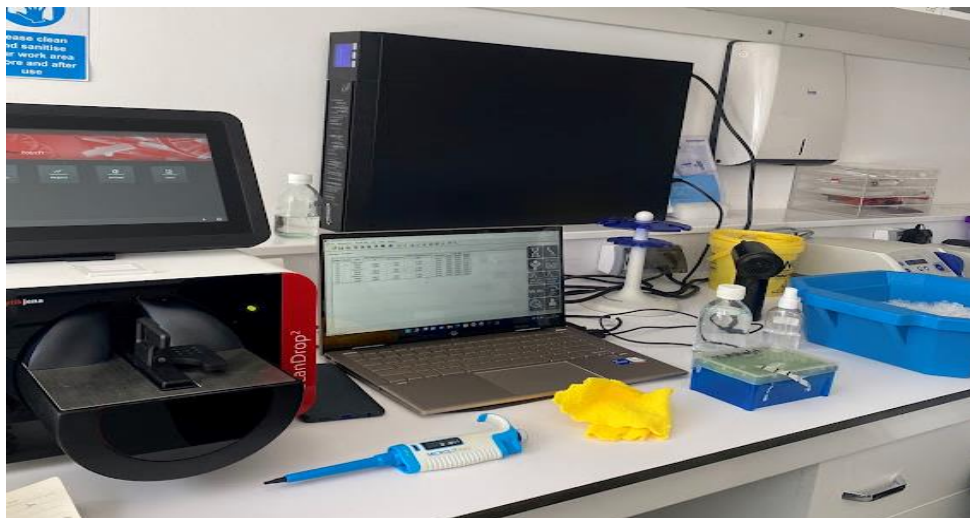
Pour garantir une pureté maximale, une purification complémentaire sur colonne de silice (issues du kit AIONA) a été effectuée. Cette étape a inclus deux lavages successifs à l'aide des tampons de lavage 1 et 2, conformément aux instructions du kit, suivis d'une élution finale dans un tampon préchauffé (70 °C), avec incubation à température ambiante avant centrifugation. L'ADN purifié a été conservé à -20 °C jusqu'à utilisation.

### 3.2. Contrôle qualité de l'ADN

#### ○ Contrôle quantitatif

La concentration et la pureté de l'ADN extrait ont été évaluées à l'aide du spectrophotomètre ScanDrop<sup>2</sup>, une technologie avancée utilisant la microspectrophotométrie pour des mesures précises sur de faibles volumes d'échantillon (0,5-2 µL). Les ratios d'absorbance A260/A280 et A260/A230 ont été mesurés pour évaluer la pureté de l'ADN vis-à-vis des protéines et des contaminants organiques, respectivement. :

- A260/A280, indicateur de contamination protéique : l'ADN pur présente un ratio proche de 1,8, car l'ADN absorbe fortement à 260 nm tandis que les protéines le font à 280 nm (Glasel, 1995; Wilfinger et al., 1997). A260/A230, indicateur de contamination par des composés organiques ou des sels (phénols, polysaccharides, EDTA, etc.), avec une valeur attendue entre 2,0 et 2,2 pour un ADN pur (Sambrook et Russell, 2001).



**Figure 7.** Quantification de l'ADN extrait à l'aide du spectrophotomètre ScanDrop.

### ○ Contrôle qualitatif

L'intégrité de l'ADN a été vérifiée par électrophorèse sur gel d'agarose 1,2 % en tampon TAE (Tris-Acétate-EDTA : tampon de migration maintenant un pH stable et une force ionique appropriée), révélée au SYBR Safe, un intercalant fluorescent, permettant de visualiser la présence d'ADN de haut poids moléculaire non dégradé sous illumination UV.



**Figure 8.** Contrôle qualitatif de l'ADN par électrophorèse sur gel d'agarose.

### 3.3. Amplification par PCR du gène ARNr 18S

Afin de confirmer l'identité génétique des macroalgues étudiées, une amplification ciblée du gène ribosomal 18S a été réalisée. Ce gène universel est largement utilisé en taxonomie des eucaryotes marins pour sa conservation inter-espèces et sa résolution phylogénétique satisfaisante (Lin et al., 2012).

Ce choix était également dicté par des contraintes pratiques, la synthèse d'amorces spécifiques nécessitant des délais incompatibles avec le calendrier de l'étude, et les difficultés rencontrées pour trouver des amorces publiques, accessibles et validées pour les macroalgues méditerranéennes.

#### ○ Synthèse et contrôle qualité des amorces

Les amorces universelles ciblant le gène ARNr 18S ont été synthétisées chimiquement à PLAGENOR en utilisant le synthétiseur d'oligonucléotides *MerMade 4*. Les séquences utilisées sont celles décrites par Lin et al. (2012) dans leur étude sur la diversité des microalgues :

- Amorce sens (Forward) : 5'- GTA GTC ATA TGC TTG TCT C -3'
- Amorce antisens (Reverse) : 5'- CTT CCG TCA ATT CCT TTA AG -3'
- Taille d'amplicon attendue : ~ 1150 pb

Après déprotection à l'ammoniaque selon le protocole standard (Beaucage et Caruthers, 1981), les oligonucléotides ont été précipités à l'aide de butanol froid, méthode efficace pour la purification des amorces qui élimine les résidus de synthèse et les solvants organiques. Le mélange a ensuite été centrifugé à 4 °C pour faciliter la formation du culot et préserver l'intégrité des oligonucléotides.

Un contrôle qualité qualitatif et quantitatif des amorces purifiées a été réalisé par spectrophotométrie et électrophorèse sur gel d'agarose pour vérifier leur concentration, pureté et intégrité avant utilisation.

### ○ Principe et conditions de PCR

La réaction en chaîne par polymérase (PCR, *Polymerase Chain Reaction*), permet l'amplification exponentielle d'une séquence spécifique d'ADN cible par cycles thermiques successifs (Mullis et Faloona, 1987). Dans cette étude, la PCR visait à amplifier un fragment du gène ribosomal ARNr 18S, souvent utilisé comme marqueur moléculaire universel pour l'identification taxonomique des eucaryotes.

Le processus repose sur la fixation complémentaire de deux amorces (forward et reverse) aux extrémités 5' et 3' du fragment cible, puis la synthèse du brin complémentaire par une ADN polymérase thermostable (Taq), qui incorpore les désoxynucléotides triphosphates (dNTPs) selon le principe de complémentarité des bases.

### ○ Conditions de réaction

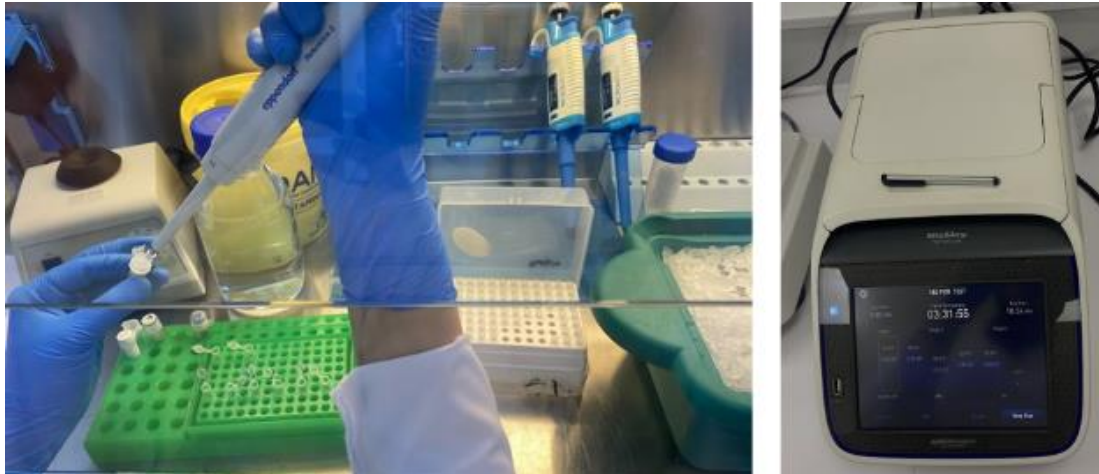
Les réactions PCR ont été effectuées dans un volume final de 25 µL, en utilisant la Taq ADN polymérase recombinante (Thermo Scientific). La composition du mélange réactionnel est la suivante :

- 2,5 µL de tampon PCR 10X
- 2,5 µL de MgCl<sub>2</sub> (25 mM)
- 0,5 µL de dNTPs (10 mM)
- 1 µL de chaque amorce (10 µM)
- 0,2 µL de Taq polymérase (5 U/µL)
- 2 µL d'ADN matrice
- Eau stérile q.s.p. 25 µL

L'amplification a été réalisée dans un thermocycleur *Applied Biosystems SimpliAmp*<sup>TM</sup>, selon le programme détaillé ci-dessous :

- Dénaturation initiale : 95 °C pendant 2 minutes
- 35 cycles de :
  - a. Dénaturation : 95 °C pendant 1 minute
  - b. Hybridation : 55 °C pendant 1 minute
  - c. Élongation : 72 °C pendant 4 minutes
- Élongation finale : 72 °C pendant 6 minutes

- Conservation à 4 °C jusqu'à utilisation



**Figure 9.** Préparation des mélanges réactionnels de la PCR et le thermocycleur utilisé pour l'amplification.

### ○ Contrôle qualité des produits PCR

Les produits d'amplification ont été analysés par électrophorèse sur gel d'agarose 1,2 % en tampon TAE. La taille des fragments amplifiés a été vérifiée par comparaison avec un marqueur de taille moléculaire (GeneRuler 1kb DNA Ladder). La présence d'une bande unique à la taille attendue confirme la spécificité de l'amplification.

### ○ Purification des produits PCR

Les produits PCR ont été purifiés à l'aide du kit ExoSAP-IT (Thermo Scientific), un système enzymatique combinant l'exonucléase I et la phosphatase alcaline de crevette. Cette purification enzymatique est cruciale pour optimiser l'efficacité du séquençage en éliminant les contaminants susceptibles d'interférer avec la réaction de séquençage (amorces simples brins résiduelles, dNTPs non incorporés etc.) (Werle et al., 1994).

Le traitement a été effectué selon les recommandations du fabricant : 5  $\mu$ L de produit PCR ont été mélangés avec 2  $\mu$ L d'ExoSAP-IT, puis incubés à 37 °C pendant 15 minutes, suivis d'une inactivation à 80 °C pendant 15 minutes.

## 3.4. Séquençage Sanger

Le séquençage des fragments amplifiés a été réalisé selon la méthode de Sanger modifiée, également appelée séquençage par terminaison de chaîne (Sanger et al., 1977).

Cette technique repose sur l'utilisation de didésoxynucléotides triphosphates fluorescents (ddNTPs) qui, une fois incorporés par l'ADN polymérase, bloquent l'élongation du brin en cours de synthèse. Chaque ddNTP est marqué par un fluorochrome spécifique correspondant à l'une des quatre bases (A, T, C ou G), ce qui permet, après séparation par électrophorèse capillaire, de lire la séquence nucléotidique base par base.

Le séquençage a été effectué dans les deux directions (brins sens et antisens) afin d'assurer une meilleure couverture, d'obtenir une séquence consensus fiable et de corriger d'éventuelles ambiguïtés.

### ○ Réaction de séquençage (PCR BigDye)

La réaction de séquençage a été réalisée à l'aide du kit BigDye™ Terminator v3.1 Cycle Sequencing (Applied Biosystems), qui repose sur une PCR asymétrique intégrant à la fois des dNTPs standards et des ddNTPs terminaux fluorescents.

Le volume final de réaction était de 10 µL, contenant :

- ADN matrice (produit PCR purifié),
- Amorces spécifiques (sens ou antisens),
- Mix BigDye™ (enzyme, dNTPs, ddNTPs fluorescents),
- Tampon de séquençage (buffer 5×),
- Eau ultrapure (qsp)

La réaction a été mise en œuvre selon les conditions suivantes :

- Dénaturation initiale : 96 °C pendant 1 minute
- 25 cycles de :
  - a. Dénaturation : 96 °C pendant 10 secondes
  - b. Hybridation : 50 °C pendant 5 secondes
  - c. Élongation : 60 °C pendant 4 minutes



**Figure 10.** Thermocycleur PCRmax utilisé pour la PCR BigDye.

### ○ Purification des produits de séquençage

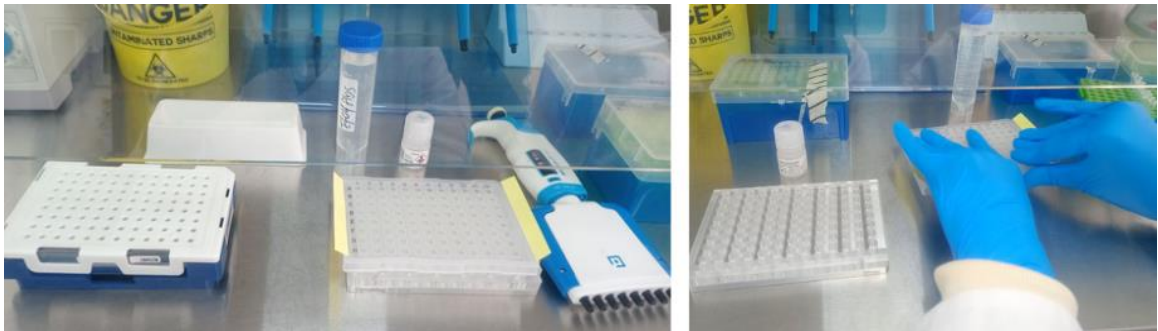
Les produits de la PCR de séquençage ont été purifiés à l'aide du kit DynaBeads™ Sequencing Clean-Up (Thermo Scientific), basé sur des billes magnétiques permettant d'éliminer

## MATERIEL ET METHODES

efficacement les ddNTPs non incorporés, les amorces libres, et les sels et autres contaminants susceptibles d'altérer la qualité du signal lors de l'analyse capillaire.

Le protocole se déroule en plusieurs étapes :

1. Fixation : les fragments d'ADN marqués sont liés à la surface des billes magnétiques par affinité.
2. Séparation : les billes sont attirées contre la paroi du tube à l'aide d'un support magnétique, permettant l'élimination du surnageant contenant les impuretés.
3. Lavage : deux lavages successifs sont effectués à l'aide d'éthanol 85 % glacé afin d'éliminer les contaminants tout en conservant l'ADN lié aux billes.
4. Séchage : les billes sont brièvement séchées à température ambiante pour éliminer toute trace résiduelle d'éthanol.
5. Éluion : l'ADN purifié est ensuite resuspendu dans du formamide déionisé, un solvant faiblement dénaturant qui maintient les brins d'ADN en simple brin, essentiel pour leur migration correcte lors de l'électrophorèse capillaire.



**Figure 11.** Purification des produits d'amplification BigDye à l'aide de billes magnétiques

Avant injection dans le séquenceur, les échantillons sont chauffés à 95 °C pendant 2 minutes, puis placés immédiatement sur glace afin de stabiliser l'ADN sous forme monocaténaire. Cette étape finale garantit une lecture précise et sans interférence lors de la séparation capillaire et de la détection des signaux fluorescents.

### ○ **Electrophorèse capillaire**

L'analyse des produits purifiés a été effectuée sur un séquenceur (Applied Biosystems 3500 Genetic Analyzer), basé sur la technologie de l'électrophorèse capillaire. Les fragments d'ADN marqués par fluorescence sont injectés dans des capillaires contenant un gel polymérique, où ils migrent sous l'effet d'un champ électrique selon leur taille.

Chaque fragment se termine par une base fluorescente identifiable, et le signal émis par chaque fluorophore est détecté par un système optique intégré, permettant la lecture automatisée de la séquence avec une résolution de l'ordre du nucléotide (Schmalzing et al., 1997). Les fichiers générés sont produits au format «.ab1», contenant :

- La séquence brute,
- Les chromatogrammes (profils de fluorescence),
- Les scores de qualité de lecture (Phred scores) pour chaque base.

Ces données ont ensuite été analysées pour assembler les lectures forward et reverse et obtenir une séquence consensus de haute qualité.

### 3.5. Analyse bioinformatique des séquences

Les données brutes de séquençage ont été analysées, permettant une évaluation rapide de la qualité des lectures, l'obtention de séquences consensus et une identification préliminaire via le serveur BLASTn (NCBI) en utilisant ChromasPro pour la visualisation et l'édition des chromatogrammes, ainsi que MEGA 12 pour l'alignement multiple et la construction d'arbres phylogénétiques, suivant les étapes ci-dessous, suivant les étapes illustrées (fig 12) ci-dessous:

#### a. Visualisation et édition des séquences

Les fichiers bruts «.ab1 » ont été ouverts avec ChromasPro pour :

- Visualiser les chromatogrammes,
- Évaluer la qualité des lectures (intensité, double pics, bases faibles ou chevauchement),
- Corriger manuellement les erreurs évidentes,
- Réaliser le trimming des extrémités et supprimer les séquences d'amorces.

#### b. Assemblage des brins

Les séquences obtenues pour les deux amorces (forward et reverse) ont été alignées et assemblées afin d'obtenir une séquence consensus propre, prête pour l'identification taxonomique.

#### c. Identification BLAST

Chaque séquence a été soumise à une recherche de similarité via BLASTn sur la base de données NCBI GenBank et évaluée selon :

- Le pourcentage d'identité (% identity),
- La couverture de la séquence (query coverage),
- La valeur e (expect),
- Le score de bit.

#### d. Alignement et inférence phylogénétique

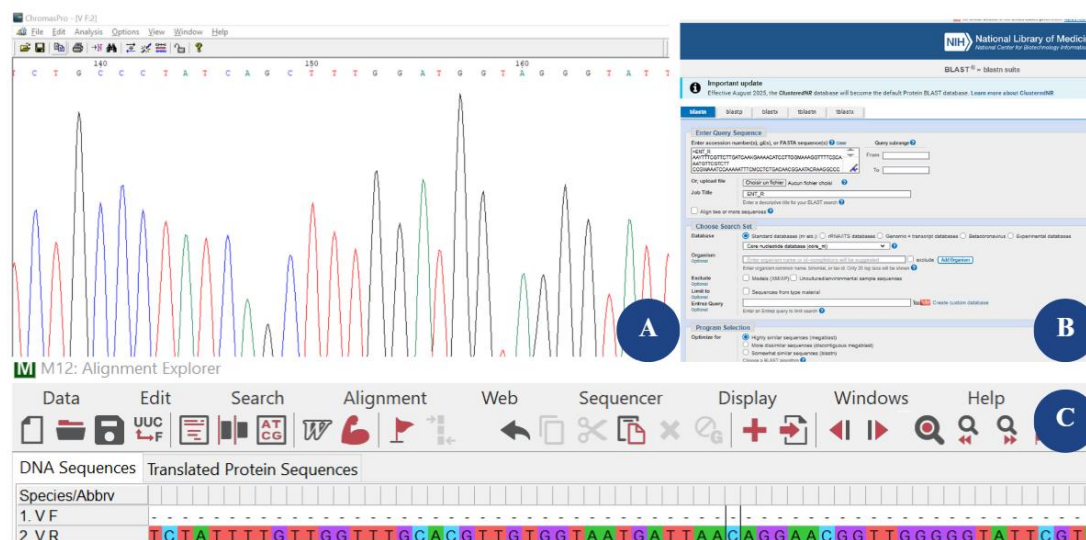
Afin de valider l'identité taxonomique des séquences, une analyse phylogénétique a été effectuée suivant les étapes ci-dessous:

1. Alignement multiple : réalisé avec ClustalW intégré au logiciel MEGA 12 à partir des séquences obtenues et de séquences de référence issues de GenBank.
2. Construction des arbres phylogénétiques avec un maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood).

#### e. Validation croisée des données

Les résultats d'identification ont été validés par comparaison croisée entre :

- Les résultats BLAST de l'analyse
- La position phylogénétique dans les arbres construits
- Les caractères morphologiques observés lors de l'identification classique.



**Figure 12.** Étapes principales de l'analyse bioinformatique des séquences d'ADN : (A) Visualisation et vérification des chromatogrammes obtenus par séquençage à l'aide du logiciel ChromasPro ; (B) Identification des séquences par comparaison avec la base de données NCBI via l'outil BLASTn ; (C) Alignement multiple des séquences à l'aide du logiciel MEGA 12.

## 4. Caractérisation biochimique (ENSSMAL)

La caractérisation biochimique des macroalgues a été menée au laboratoire LBCM2 de l'ENSSMAL, afin d'évaluer leur composition en biomolécules d'intérêt et leur potentiel antioxydant.

Les deux espèces collectées sur Alger, *Dictyota dichotoma* et *Sphaerococcus coronopifolius*, ont été spécifiquement étudiées.

### 4.1. Préparation du matériel biologique pour les analyses biochimiques

Les échantillons de macroalgues, après avoir été lavés et congelés comme décrit précédemment (cf. section 2.1.1), ont subi les étapes suivantes pour leur préparation en vue des analyses biochimiques :

- Lyophilisation : les échantillons ont été lyophilisés pendant 72 h à -50 °C, sous une pression de 0.1 mBar. Ce séchage par congélation sous vide, est une technique de déshydratation douce qui permet de retirer l'eau contenue dans les échantillons sans altérer leurs composés thermosensibles. Dans le cadre de l'étude des macroalgues, cette méthode est particulièrement avantageuse, car elle préserve l'intégrité des biomolécules telles que les pigments, les polyphénols ou les polysaccharides, qui sont souvent sensibles à la chaleur ou à l'oxydation. Les algues lyophilisées présentent une excellente stabilité et peuvent être conservées plus longtemps pour des analyses ultérieures (Ganesan et al., 2020).
- Séchage complémentaire : afin d'éliminer toute trace résiduelle d'humidité, un séchage à l'étuve à 28 °C a été réalisé pendant 2 à 3 heures avant le broyage.
- Broyage : les échantillons secs ont été réduits en poudre fine à l'aide d'un broyeur de laboratoire, puis passés au tamis afin d'obtenir une poudre fine. Cette étape est cruciale pour augmenter la surface de contact et optimiser l'efficacité des extractions ultérieures.

- Stockage : les poudres ont été conservées dans des bocaux en verre borosilicaté, étiquetés, et placés dans un dessiccateur à l'abri de la lumière et de l'humidité jusqu'à leur utilisation pour prévenir toute dégradation des composés.



**Figure 13.** Préparation des biomasses algales pour les analyses biochimiques : (A) Lyophilisation des algues ; (B) Broyage des biomasses lyophilisées

### 4.2. Etude de la composition biochimique des biomasses

Cette analyse visait l'évaluation des teneurs en biomolécules d'intérêt biotechnologique chez les deux espèces algales sélectionnées. L'étude s'est particulièrement basée sur les teneurs en lipides totaux, protéines totales, polysaccharides totaux et en polyphénols totaux.

#### 4.2.1. Lipides totaux

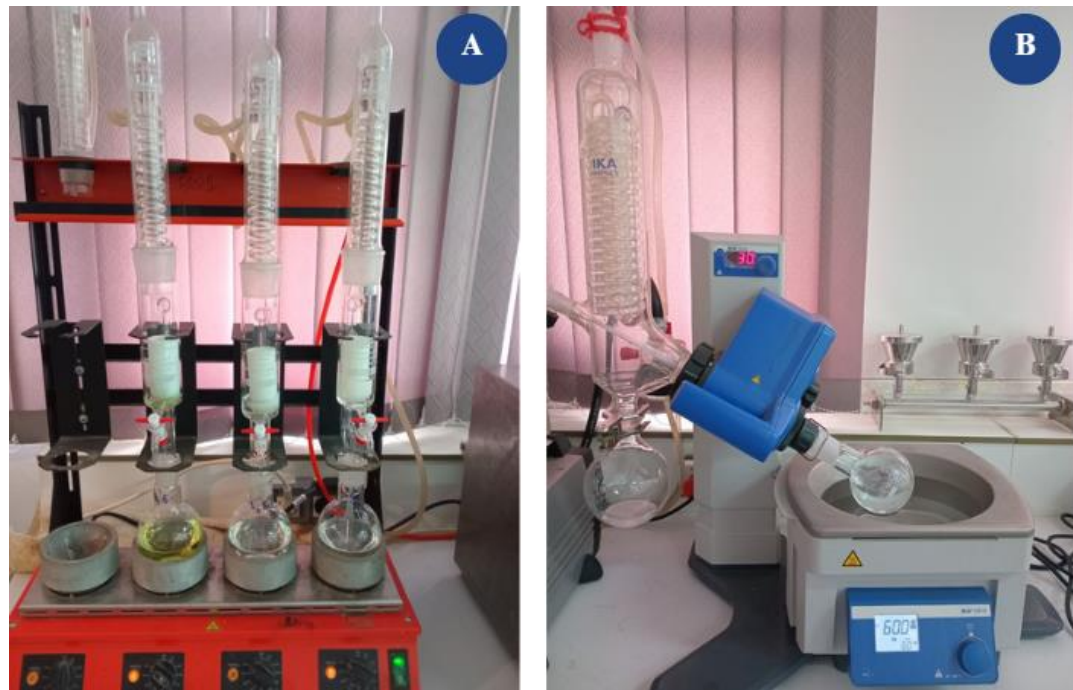
##### — Principe d'extraction

L'extraction des lipides totaux est basée sur leur solubilité dans des solvants organiques non polaires. Pour cela, la méthode de Soxhlet a été choisie. C'est une technique d'extraction solide-liquide continue qui permet une récupération efficace des composés liposolubles reposant sur un processus d'extraction en continu par reflux, où le solvant est chauffé et ses vapeurs montent vers un condenseur puis retombent sur l'échantillon solide contenu dans une cartouche en cellulose, dissolvant ainsi les lipides. Ce cycle se répète, permettant une extraction efficace et continue des lipides du matériau solide par un solvant purifié à chaque cycle (Hawach, 2025).

L'hexane est un solvant apolaire couramment utilisé pour l'extraction des lipides en raison de sa bonne capacité à dissoudre les graisses et de sa volatilité, facilitant son évaporation ultérieure (Dejoye, 2013).

##### — Procédé d'extraction

2 g de poudre algale sont placés dans une cartouche en cellulose, insérée dans l'extracteur de Soxhlet. Un ballon de 250 mL contenant 160 mL d'hexane est connecté à la base de l'extracteur. Le montage est chauffé à une température permettant l'ébullition douce de l'hexane (60-70 %) pendant 4 h pour assurer une extraction complète des lipides. Après cela, le solvant est évaporé sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif pour récupérer les extraits de lipides totaux, qui sont ensuite pesés pour déterminer leur teneur.



**Figure 14.** Extraction des lipides totaux à partir des biomasses algales : (A) montage de l'extracteur Soxhlet; (B) évaporation du solvant à l'aide d'un évaporateur rotatif

### — Teneur globale

La teneur des lipides est calculée en pourcentage selon la formule suivante :

$$\text{Teneur (\%)} = [(P1 - P0) / \text{Masse de poudre algale (g)}] \times 100$$

Où:

- P1 : poids du ballon après extraction (g)
- P0 : poids initial du ballon avant extraction(g)

NOTE: insérer un schéma récapitulatif de cette procédure

### 4.2.2. Protéines totales

#### — Principe

La teneur en protéines brutes est déterminée à partir de la conversion de la teneur de l'azote total dosé par la méthode KJELDHAL, une technique qui repose sur trois étapes principales; la minéralisation, la distillation et le titrage (AFNOR, 1985; Chang et al., 2020).

- La minéralisation : l'échantillon est chauffé avec de l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur (souvent du Sulfate de Potassium, du Sulfate de Cuivre et de Sélénium), transformant l'Azote organique en ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ).
- La distillation : l'ammonium est libéré sous forme d'ammoniac gazeux par addition d'une base forte (NaOH) et est entraîné par la vapeur d'eau dans une solution d'acide borique ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ).
- Le titrage : l'ammoniac piégé est titré avec une solution d'acide fort de concentration connue, permettant de quantifier l'azote et, par conversion, la teneur en protéines.

## MATERIEL ET METHODES

### — Procédé

Une masse de 1 g de poudre d'algue sèche a été introduite dans un matras de 250 mL. Environ 2 g de catalyseur et 20 mL d'acide sulfurique concentré ont été ajoutés sous hotte chimique. Le mélange a été chauffé sur un support d'attaque, jusqu'à obtention d'une coloration verte stable.

Après refroidissement, le contenu a été dilué à l'eau distillée puis distillé avec 50 mL de soude (NaOH) dans un distillatoire (Büchi).

L'ammoniac dégagé a été piégé dans 20 mL d'acide borique ( $H_3BO_3$ ) avec indicateur coloré (rouge de méthyl et vert de bromocrésol).

Enfin, le distillat a été titré avec de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) N/50 pour quantifier l'azote (AFNOR, 1985).

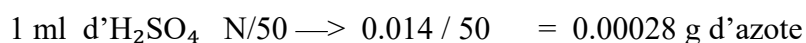
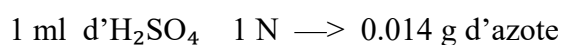
**Figure 15.** Dosage des protéines totales par la méthode de Kjeldahl : (A) Minéralisation



de l'échantillon algal ; (B) Distillation de l'ammoniac libéré après addition de soude ; (C) Titrage de l'ammoniac piégé dans l'acide borique à l'acide sulfurique

### — Teneur globale

Le volume d'acide titrant permet de calculer la quantité d'azote dans l'échantillon. La teneur en protéines brutes est ensuite obtenue en multipliant la quantité d'azote déterminée par un facteur de conversion standard (généralement 6,25).



$$N \text{ (g)} = V1 \times 0.00028 \times 100/Y \times 250/ V_0$$

Où:

- V1 : volume de l'acide sulfurique N/50 (ml)
- Y : poids initial de l'échantillon (g)
- V0 : Volume de la prise d'essai (ml)

$$\text{Teneur en MAT (\%MS)} = N \text{ (g)} \times 6.25 / MS$$

### 4.2.3. Polysaccharides totaux

#### 4.2.3.1.Extraction

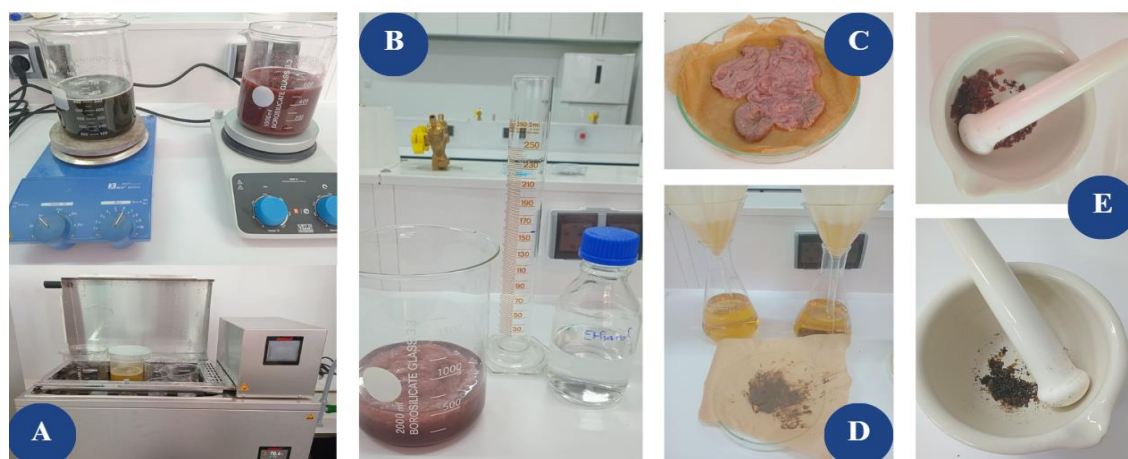
##### — Principe d'extraction

L'extraction des polysaccharides est réalisée avec une simple macération de la matière première, une technique classique pour l'extraction des molécules bioactives à partir des algues marines (Chiu et al., 2011). Cette méthode repose sur la solubilité des polysaccharides dans l'eau après une étape de dépigmentation à l'acétone permettant d'éliminer les pigments chlorophylliens et d'autres composés liposolubles qui pourraient interférer avec l'extraction et les analyses ultérieures des polysaccharides (Wang et al., 2017).

##### — Procédé d'extraction

Selon la méthode modifiée de Chiu et al. (2011), 20 g de poudre d'algue sont d'abord macérés dans 200 mL d'acétone pendant 2 heures sous agitation, à l'abri de la lumière, pour une étape de dépigmentation. Cet extrait acétonique est ensuite filtré et conservé comme extrait de pigments chlorophylliens (*cf.* section 4.5.2).

- Le résidu solide de la macération est ensuite mélangé avec 500 mL d'eau distillée. La solution est placée dans un bain-marie pendant 3 heures sous agitation constante, puis centrifugée à 5000 rpm pendant 15 minutes.
- Le filtrat obtenu, contenant les polysaccharides solubilisés, est précipité avec de l'éthanol à raison de (V filtrat / 2V éthanol). Le mélange est laissé reposer pendant une nuit à température ambiante. La masse des polysaccharides obtenue est finalement séchée dans une étuve à 40 °C pendant 24 heures, puis broyée avec un mortier en poudre fine et pesée pour calculer le rendement.



**Figure 16.** Extraction des polysaccharides totaux par macération à l'eau chaude et précipitation à l'éthanol: (A) Macération du résidu algal dépigmenté dans de l'eau distillée sous agitation dans un bain-marie à 80 °C; (B) Ajout d'éthanol au surnageant centrifugé de l'extrait d'algue rouge; (C) Masse de polysaccharides fraîchement récupérée; (D) Ajout

d'éthanol au surnageant de l'algue brune et masse obtenue après précipitation ; (E) Broyage des masses polysaccharidiques sèches.

### — Rendement d'extraction

Le rendement d'extraction des polysaccharides est calculé en pourcentage selon la formule suivante :  $\text{Rendement (\%)} = (P1 / P0) \times 100$

Où:

- P1 : Masse des polysaccharides extraits (g)
- P2 : Masse de poudre algale initiale (g)

### 4.2.3.2. Dosage colorimétrique des oses totaux

#### — Principe

La méthode de Dubois et al. (1956), également connue sous le nom de méthode au phénol-acide sulfurique, est une méthode colorimétrique largement utilisée pour la détermination des oses totaux et des substances apparentées.

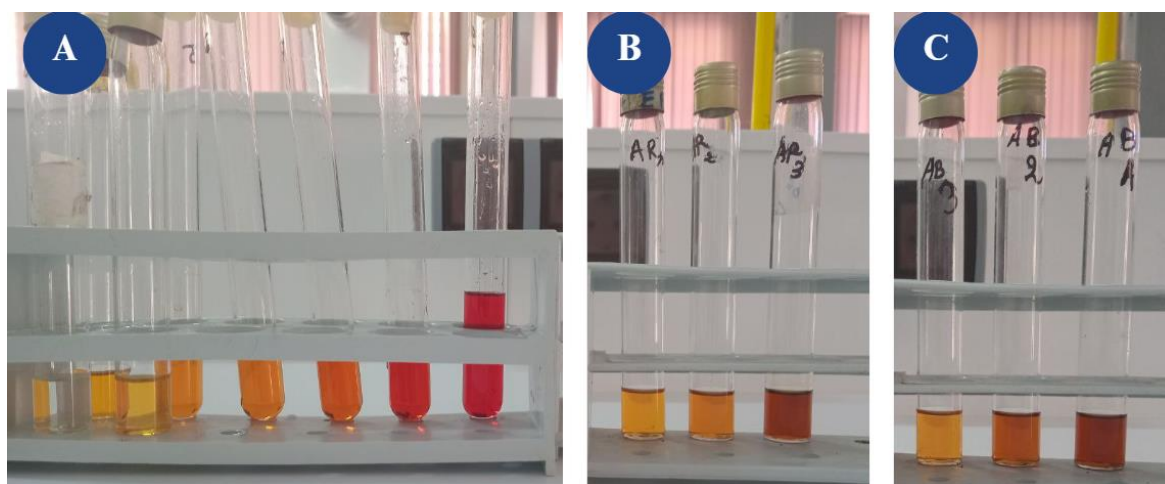
Le principe repose sur l'hydrolyse des polysaccharides en monosaccharides par l'acide sulfurique concentré, suivie de leur déshydratation en furfural ou en dérivés de furfural. Ces dérivés réagissent ensuite avec le phénol pour former un complexe coloré stable, dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en sucres.

La mesure de l'absorbance de ce complexe à une longueur d'onde spécifique (ici 485 nm) permet de quantifier la teneur en polysaccharides en utilisant une courbe d'étalonnage préparée avec un sucre standard (le glucose) (Dubois et al., 1956; Quero-Jiménez et al., 2019).

#### — Mode opératoire

Une solution mère de glucose à 1 mg/mL est préparée pour établir une courbe d'étalonnage avec six concentrations : 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 µg/mL. Pour le dosage des échantillons, 1 mL de l'échantillon (avec trois dilutions : 100 %, 50 % (500 µL échantillon + 500 µL eau distillée), et 35 % (350 µL échantillon + 650 µL eau distillée)) est placé dans un tube à essai.

Ensuite, 1 mL d'une solution aqueuse de phénol à 5 % (m/v) est ajouté, suivi rapidement de 5 mL d'acide sulfurique concentré (96 %) assurant une réaction exothermique (La manipulation du phénol et de l'acide sulfurique a été effectuée sous hotte aspirante en raison de leur toxicité et de leur caractère corrosif). Le mélange est ensuite vortexé, puis incubé à 30° C pendant 20 minutes.



**Figure 17.** Visualisation des gammes d'étalonnage et des extraits polysaccharidiques dosés (méthode Dubois) : (A) Gamme d'étalonnage du glucose; (B) Extraits de l'algue rouge (AR); (C) Extraits de l'algue brune (AB).

L'absorbance est ensuite mesurée à 485 nm contre un blanc. La concentration en polysaccharides de l'échantillon est ensuite déterminée à partir de la courbe d'étalonnage.

### 4.2.3.3. Analyse par spectroscopie FTIR

#### — Principe

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une technique analytique non destructive et rapide utilisée pour identifier les groupes fonctionnels présents dans une molécule et caractériser sa structure chimique. Elle repose sur l'absorption de la lumière infrarouge par les liaisons chimiques, qui vibrent à des fréquences spécifiques. Chaque type de liaison (par exemple, O-H, C-H, C=O, C-O) absorbe à une longueur d'onde caractéristique, produisant un spectre unique qui agit comme une « empreinte digitale » de la molécule. Pour les polysaccharides, la spectroscopie FTIR permet d'identifier les différents types de liaisons glycosidiques, la présence de groupes sulfate, de groupes carboxyle, et d'autres caractéristiques structurales importantes (Hong et al., 2021; Martins et al., 2023).

#### — Procédé

L'analyse des extraits polysaccharidiques a été réalisée par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) à l'aide de l'appareil *Jasco FTIR-4X* (*JASCO Corporation*, Japon).

Une petite quantité des extraits polysaccharidiques secs et finement broyés ont été déposés directement sur la cellule en cristal de type ATR (*Attenuated Total Reflectance*) intégrée à l'appareil. Les spectres ont été enregistrés dans la plage spectrale de 4000 à 400  $\text{cm}^{-1}$ , avec une résolution de 4  $\text{cm}^{-1}$ , puis corrigés automatiquement pour la ligne de base. Les bandes caractéristiques observées dans les spectres FTIR, exprimés en transmittance, ont été interprétées pour identifier les groupes fonctionnels typiques des polysaccharides.

### 4.2.4. Polyphénols totaux

#### 4.2.4.1.Extraction

##### — Principe d'extraction

L'extraction des polyphénols par macération est une méthode conventionnelle qui repose sur la diffusion des composés phénoliques du matériel végétal vers un solvant. Le principe est basé sur la solubilité des polyphénols dans le solvant choisi (ici un mélange éthanol/eau 70/30).

La macération implique de laisser l'échantillon solide (poudre algale) en contact avec le solvant pendant une période prolongée, permettant aux polyphénols de se dissoudre progressivement. Le mélange éthanol/eau (70/30) est un solvant couramment utilisé pour l'extraction des polyphénols des algues marines en raison de son efficacité à solubiliser une large gamme de composés phénoliques et de sa faible toxicité (Santos et al., 2019; Čagalj et al., 2021).

##### — Procédé d'extraction

La méthode de Pappou et al., (2022) a été adoptée pour l'extraction des polyphénols totaux, avec quelques modifications. 10 g de poudre algale sont placés dans un bécher et mélangés avec 100 mL du mélange éthanol/eau (70/30, v/v).

Le mélange est soumis à une agitation magnétique à température ambiante et à l'abri de la lumière pendant 12 heures. Après la période de macération, la suspension est filtrée pour séparer l'extrait liquide des résidus solides.

Le filtrat est ensuite centrifugé à 5000 tr/min pendant 15 minutes. Le surnageant est récupéré et concentré sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif. Les extraits concentrés sont pesés ensuite conservés à -20 °C jusqu'à leur utilisation pour l'évaluation de l'activité antioxydante.

##### — Rendement d'extraction

Le rendement d'extraction des polyphénols est calculé en pourcentage selon la formule suivante: **Rendement (%) = (P1 / P2) x 100**

Où:

- P1 : Masse de l'extrait sec (g)
- P2 : Masse de poudre algale initiale (g)

#### 4.2.4.2.Dosage colorimétrique

##### — Principe

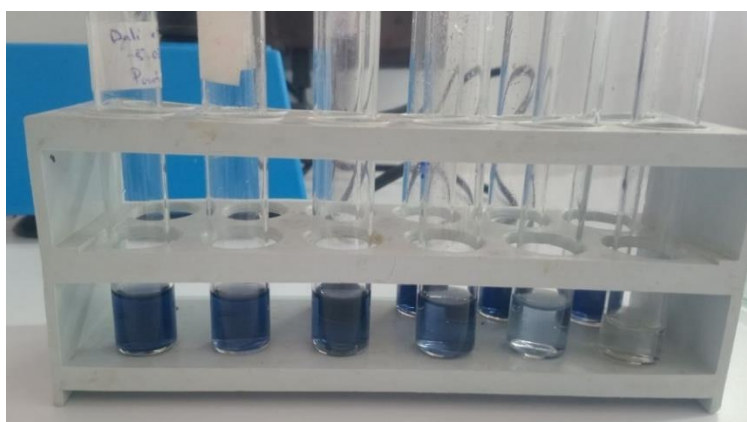
La méthode de Folin-Ciocalteu est une méthode colorimétrique largement utilisée pour la quantification des polyphénols totaux. Elle est basée sur la réaction d'oxydoréduction entre les composés phénoliques et le réactif de Folin-Ciocalteu, qui est un mélange d'acides phosphotungstique et phosphomolybdique. En milieu alcalin, les groupes hydroxyle des polyphénols réduisent les hétéropolyacides du réactif de Folin-Ciocalteu, entraînant la formation d'un complexe de couleur bleue. L'intensité de la couleur bleue est proportionnelle à la concentration en polyphénols et est mesurée par spectrophotométrie à une longueur d'onde maximale d'absorption (ici 760 nm). Une courbe d'étalonnage est construite à l'aide d'un standard phénolique, tel que l'acide gallique, pour déterminer la concentration des échantillons (Blainski et al., 2013; Pérez et al., 2023).

### — Mode opératoire

Une solution mère d'acide gallique à 0.2 mg/mL est préparée pour établir une courbe d'étalonnage avec dix concentrations : 0,0.03, 0.09, 0.12, 0.15, 0.18, 0.21, 0.24, 0.27, 0.3 µg/mL.

Pour le dosage des échantillons, 100 µL de l'extrait de polyphénols (avec trois dilutions : 100, 75 et 50 %) sont mélangés avec 500 µL du réactif de Folin-Ciocalteu dilué 10 fois. Après 5 minutes d'incubation à température ambiante, 2 mL d'une solution de carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) à 20 % (m/v) sont ajoutés.

Le mélange est ensuite incubé dans l'obscurité à température ambiante pendant 30 minutes. L'absorbance est mesurée à 760 nm contre un blanc préparé de la même manière mais sans échantillon. Les résultats sont exprimés en équivalents d'acide gallique par gramme de matière sèche (mg EAG/g MS) (Pappou et al., 2022).



**Figure 18.** Visualisation des tubes de la gamme d'étalonnage de l'acide gallique

### 4.2.4.3.Évaluation de l'activité antioxydante (Test DPPH)

#### — Principe

L'activité antioxydante des extraits de polyphénols est évaluée par le test de piégeage du radical libre 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH). Le DPPH est un radical stable de couleur violette qui, en présence d'un composé antioxydant, est réduit en 2,2-diphényl-1-picrylhydrazine, une forme non radicalaire de couleur jaune.

Cette décoloration est mesurée par spectrophotométrie à 517 nm. La diminution de l'absorbance est proportionnelle à la capacité de l'échantillon à piéger les radicaux libres, reflétant ainsi son activité antioxydante.

Les résultats sont souvent exprimés en pourcentage d'inhibition du radical DPPH ou en concentration efficace ( $\text{IC}_{50}$ ), qui est la concentration d'échantillon nécessaire pour inhiber 50% des radicaux DPPH (Baliyan et al., 2022; Afrin et al., 2023).

#### — Procédé

Le test de piégeage du radical libre DPPH a été réalisé selon le protocole décrit par Prieto et al. (1999), tel que rapporté par Sanchez-Moreno et al. (1998) avec quelques modifications.

Une solution mère de DPPH est préparée en dissolvant 6 mg de DPPH dans 60 mL de méthanol. Des solutions filles sont ensuite préparées à des concentrations de 62.5, 125, 250, 500 et 1000 ppm (1 ppm =  $10^{-3}$  mL). Pour la préparation des échantillons, 30 mg de chaque extrait de polyphénols (extraits liquides récupérés dans l'éthanol et pesés selon la masse de 1 mL d'éthanol)

sont dissous dans 30 mL de méthanol. Pour chaque échantillon, des dilutions identiques à celles utilisées pour l'acide ascorbique (standard positif) sont préparées. Ensuite, 4 mL de la solution de DPPH préparée sont ajoutés à chaque dilution d'échantillon. Les mélanges sont agités et incubés dans l'obscurité à température ambiante pendant 30 minutes. L'absorbance est mesurée à 517 nm contre un blanc (méthanol).

Un contrôle témoin est préparé en mélangeant 4.5 mL de méthanol et 0.5 mL de solution de DPPH, incubé également 30 minutes et lu à 517 nm.

La valeur de l'IC50 est déterminée graphiquement à partir de la courbe de pourcentage d'inhibition en fonction de la concentration de l'extrait.

Le pourcentage d'inhibition du radical DPPH selon la formule suivante :

$$\% \text{ Inhibition} = [(DO \text{ contrôle} - DO \text{ échantillon}) / DO \text{ contrôle}] \times 100$$

### 4.2.5. Pigments

#### 4.2.5.1.Extraction des pigments rouges (Phycobiliprotéines)

##### ○ Principe

Les pigments rouges des macroalgues, principalement les phycobiliprotéines (phycoérythrine, phycocyanine, allophycocyanine), sont des protéines hydrosolubles. Leur extraction est généralement réalisée par macération en milieu aqueux, souvent assistée par des ultrasons.

L'ultrasonication favorise la rupture des parois cellulaires et la libération des pigments intracellulaires dans le solvant. L'eau distillée est utilisée comme solvant en raison de la nature hydrosoluble de ces pigments. La macération prolongée permet une diffusion efficace des pigments dans la solution (Castro-Varela et al., 2022; Kovaleski et al., 2022).

##### ○ Procédé

2 g de poudre algale sont mélangés avec 20 ml d'eau distillée dans un tube Falcon. Le mélange est soumis à une sonication dans un bain à ultrasons (BRANSON 2510E-MT) à 45 kHz pendant 3 heures à basse température pour éviter la dégradation des pigments thermosensibles.

Après cela, la suspension est centrifugée (5000 rpm pendant 10 min) pour séparer le surnageant contenant les phycobiliprotéines des débris cellulaires. Le surnageant est ensuite filtré et conservé à l'abri de la lumière et à basse température pour les analyses ultérieures (Linares et al., 2022).

#### 4.2.5.2.Extraction des pigments chlorophylliens

##### ○ Principe

L'extraction des pigments chlorophylliens (chlorophylles a et b, caroténoïdes) des macroalgues est basée sur leur solubilité dans les solvants organiques. L'acétone est un solvant polaire couramment utilisé pour cette extraction en raison de sa capacité à dissoudre efficacement ces pigments hydrophobes.

La macération de l'échantillon dans l'acétone permet aux pigments de diffuser hors des cellules algales. Le temps de macération et l'obscurité sont importants pour éviter la dégradation des pigments sensibles à la lumière (Jain et al., 2021; Poorter, 2025).

##### ○ Procédé

L'extrait acétonique obtenu lors de l'étape de dépigmentation de l'extraction des polysaccharides (voir section 2.4.2.3) est utilisé comme extrait de pigments chlorophylliens.

Après filtration, cet extrait est concentré par évaporation sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif. Le concentré est ensuite récupéré dans 2 mL d'acétone et conservé à -20 °C à l'abri de la lumière jusqu'à l'analyse spectrophotométrique et chromatographique (Caesar et al., 2018).

### 4.2.5.3. Chromatographie sur colonne de gel de silice

#### ○ Principe

La chromatographie sur colonne est une technique de séparation basée sur les différences d'affinité des composés pour une phase stationnaire (ici le gel de silice) et une phase mobile (le mélange de solvants hexane/acétone).

Le gel de silice est une phase stationnaire polaire. Les pigments chlorophylliens, qui ont des polarités différentes (par exemple, les caroténoïdes sont moins polaires que les chlorophylles), vont migrer à des vitesses différentes le long de la colonne.

Les composés les moins polaires seront élués en premier par le solvant apolaire (hexane), tandis que les composés plus polaires nécessiteront un solvant plus polaire (acétone) pour être élués. Cela permet de séparer les différents pigments présents dans l'extrait (Amrita, 2025; Flinn Scientific, 2025).

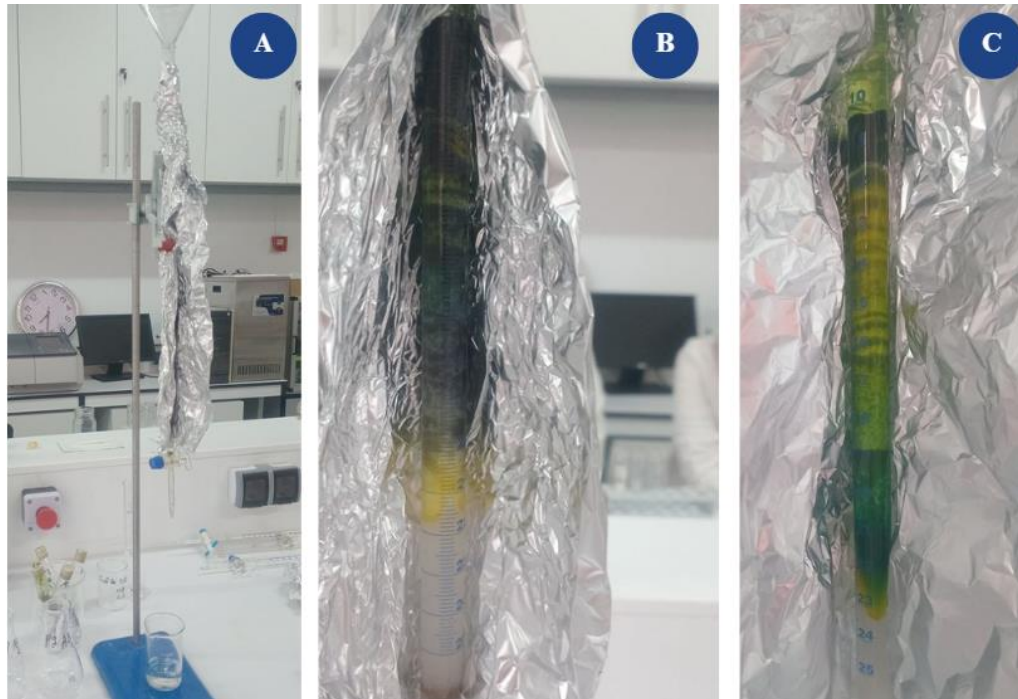
#### ○ Procédé

Une colonne de chromatographie est préparée en remplissant un tube en verre avec du gel de silice (60-120 mesh) en suspension dans de l'hexane. La colonne est laissée à tasser et l'excès de solvant est drainé jusqu'à ce que le niveau du solvant atteigne le sommet du gel de silice.

L'extrait pigmentaire concentré (1 mL) est délicatement déposé sur le dessus de la colonne. L'élution est ensuite effectuée en utilisant une série de mélanges de solvants de polarité croissante pour obtenir différentes fractions :

- Hexane/acétone (9:1, v/v)
- Hexane/acétone (7:3, v/v)
- Hexane/acétone (1:1, v/v)
- Acétone/méthanol (1:1, v/v)

Les fractions contenant les pigments séparés sont collectées individuellement dans des tubes protégés de la lumière externe. La progression de la séparation peut être suivie visuellement par l'apparition de bandes colorées distinctes le long de la colonne (Flinn Scientific, 2025).



**Figure 19.** Chromatographie sur colonne des pigments chlorophylliens des deux extraits algaux : (A) Montage du dispositif de chromatographie sur colonne avec gel de silice et solvant d'élution; (B) Séparation des pigments issus de l'algue brune (AB); (C) Séparation des pigments issus de l'algue rouge (AR)

#### 4.2.5.4. Etude spectrale (Balayage de spectre)

##### ○ Principe

Le balayage de spectre dans le visible est une technique spectrophotométrique qui permet d'obtenir un profil d'absorption complet d'un échantillon sur une gamme de longueurs d'onde donnée. Pour les pigments, cette méthode est cruciale car chaque pigment possède un spectre d'absorption unique avec des maxima caractéristiques.

En enregistrant l'absorbance, il est possible d'identifier qualitativement les pigments présents dans l'extrait en comparant les pics obtenus avec les données de la littérature. Cette approche permet également de détecter la présence de plusieurs pigments dans un même extrait et d'évaluer leur pureté (Rowland et al., 2022; Khan Academy, 2025).

##### ○ Procédé

L'absorbance des extraits pigmentaires (obtenus après chromatographie sur colonne pour les pigments chlorophylliens, et l'extrait brut du pigment rouge) est mesurée à l'aide du spectrophotomètre *SHIMADZU UV-1800*. Un balayage de spectre est réalisé dans la gamme de longueurs d'onde de 380 nm à 680 nm.

Les résultats bruts du balayage sont ensuite lus et convertis grâce au logiciel *UV Probe spectrum*. Ces données spectrales sont utilisées pour l'identification qualitative des pigments par comparaison avec les spectres d'absorption connus de pigments de macroalgues dans la littérature.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

---

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus dans le cadre de ce travail, qui a porté sur l'identification morphologique et moléculaire de plusieurs espèces de macroalgues marines, ainsi que sur leur caractérisation biochimique en vue d'évaluer leur potentiel biotechnologique. Les analyses réalisées ont permis d'explorer la diversité des biomolécules présentes (lipides, protéines, polysaccharides, polyphénols, pigments), et d'estimer certaines de leurs activités biologiques. Les résultats sont discutés de manière critique, en les confrontant aux données disponibles dans la littérature, afin de mieux situer les spécificités des espèces étudiées et d'envisager leurs perspectives de valorisation.

### 1 Échantillonnage et caractérisation du milieu

#### 1.1. Conditions physico-chimiques des sites d'échantillonnage

Les paramètres physico-chimiques de l'eau de mer ont été mesurés in situ lors des différentes campagnes d'échantillonnage (Tableau 6).

**Tableau 6.** Paramètres physico-chimiques de l'eau de mer lors de l'échantillonnage

| Site     | Période          | Plongée | T (°C) | pH   | Salinité (PSU) | O <sub>2</sub> dissous (mg/L) | Conductivité (mS/cm) |
|----------|------------------|---------|--------|------|----------------|-------------------------------|----------------------|
| Alger    | Mi- février 2025 | 1       | 16,0   | 8,22 | 36,6           | 10,3                          | 54,7                 |
|          | Fin février 2025 | 2       | 16,5   | 8,15 | 36,55          | 9,93                          | 55,85                |
| Rachgoun | Mi- avril 2025   | 1       | ~18,0  | 8,25 | 36,3-36,9      | -                             | -                    |

Les conditions physico-chimiques mesurées correspondent aux valeurs caractéristiques des eaux côtières méditerranéennes algériennes. Les températures enregistrées reflètent la saisonnalité, avec des valeurs plus élevées à Rachgoun en avril (18 °C) par rapport à Alger en février (16-16,5 °C).

Le pH légèrement alcalin (8,15-8,25) est typique des environnements marins méditerranéens et favorable au développement des macroalgues (Gattuso et al., 2010). La salinité mesurée (36,3-36,9 PSU) correspond aux valeurs normales de la Méditerranée occidentale, légèrement supérieures aux océans en raison du taux d'évaporation élevé et des apports limités d'eau douce (Béthoux et al., 1999).

Les concentrations en oxygène dissous à Alger (9,93-10,3 mg/L) indiquent des conditions d'oxygénation satisfaisantes, favorables aux communautés algales photosynthétiques (Falkowski et Raven, 2007).

#### 1.2. Collecte et diversité des échantillons

La différence de biomasse collectée entre les deux sites s'explique par les conditions d'échantillonnage contrastées. À Alger, les conditions calmes ont permis une collecte ciblée et quantitative de deux espèces principales, tandis qu'à Rachgoun, les conditions légèrement agitées, témoignent d'un hydrodynamisme plus marqué ont limité la récolte mais favorisé une approche qualitative axée sur la diversité spécifique.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

**Tableau 7.** Récapitulatif des échantillons collectés

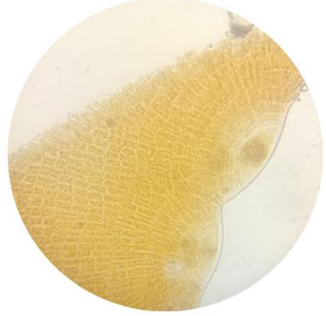
| Site     | Profondeur (m) | Conditions         | Espèces collectées | Collecte                                     |
|----------|----------------|--------------------|--------------------|----------------------------------------------|
| Alger    | 13-20          | Favorables         | 2 espèces          | Suffisante pour analyses complètes           |
| Rachgoun | 7-10           | Légèrement agitées | 7 espèces          | Faible (identification génétique uniquement) |

## 2. Identification taxonomique

### 2.1. Identification macroscopique et microscopique

L'identification taxonomique a été réalisée selon une approche hiérarchique combinant observations macroscopiques et microscopiques (*cf.* section 2.2 du chapitre II).. Les tableaux ci-dessous présentent les résultats de cette identification pour les espèces récoltées respectivement à Alger et à Rachgoun (Tableau 8) (Tableau 9), accompagnées de leurs photographies réelles (prises lors de la phase de tri et d'observation), des codes d'échantillons attribués et des noms taxonomiques proposés.

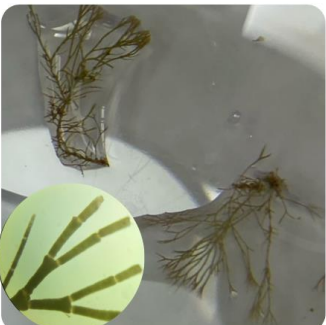
**Tableau 8.** Résultats de l'identification morphologique et microscopique des macroalgues collectées sur Alger.

| Espèce                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Caractères macroscopiques                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Caractères microscopiques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Dictyota dichotoma (Hudson)<br/>J.V.Lamouroux, 1809</p> <p>- <b>Embranchement :</b><br/><i>Ochrophyta</i></p> <p>- <b>Classe :</b><br/><i>Phaeophyceae</i></p> <p>- <b>Ordre :</b> <i>Dictyotales</i></p> <p>- <b>Famille :</b><br/><i>Dictyotaceae</i><br/>(Worms, 2025)</p> <p><b>Code échantillon :</b> D</p> |  <p>Thalle brun olivâtre, aplati, rubané, à ramification dichotomique régulière. Largeur des segments de 5-15 mm, longueur totale pouvant atteindre 20-30 cm. Texture membraneuse mais consistante (Fischer, 1987).</p> |  <p>Structure parenchymateuse simple, une seule assise de cellules internes volumineuses et incolores avec, de chaque côté une assise de petites cellules corticales superficielles renfermant de nombreux plastides avec une croissance terminale par une seule cellule initiale (Fischer, 1987).</p> |

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><i>Sphaerococcus coronopifolius</i><br/>Stackhouse, 1797</p> <p>- <b>Embranchement :</b><br/><i>Rhodophyta</i></p> <p>- <b>Classe :</b><br/><i>Florideophyceae</i></p> <p>- <b>Ordre :</b> <i>Gigartinales</i></p> <p>- <b>Famille :</b><br/><i>Sphaerococcaceae</i><br/>(Worms, 2025)</p> <p><b>Code échantillon :</b> S</p> |  <p>Thalle rouge carmin à rouge violacé, cartilagineux, très ramifié. Ramification pinnée à sub-dichotomique, avec des axes principaux cylindriques de 1-2 mm de diamètre. Longueur totale de 10-25 cm (Fischer, 1987).</p> |  <p>Structure pseudo parenchymateuse avec cortex dense de petites cellules arrondies et médulla de cellules allongées formant des filaments lâches. Présence de cellules glandulaires dispersées dans le cortex (Fischer, 1987).</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Tableau 9.** Résultats de l'identification morphologique des macroalgues collectées à Rachgoun.

| Espèce                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Caractères macroscopiques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><i>Jania J.V.Lamouroux, 1812</i></p> <p>- <b>Embranchement :</b><br/><i>Rhodophyta</i></p> <p>- <b>Classe :</b> <i>Florideophyceae</i></p> <p>- <b>Ordre :</b> Corallinales</p> <p>- <b>Famille :</b> <i>Corallinaceae</i></p> <p><b>Code échantillon :</b> E</p>                        | <p>Corallines articulés, formant des thalles érigés composés de segments calcifiés cylindriques ou comprimés (intergenicula). Les thalles, de couleur rose à rouge, présentent des ramifications dichotomiques et se fixent au substrat par un disque basal (Doris, 2025).</p>  |
| <p><i>Halopteris Kützing, 1843</i></p> <p>- <b>Embranchement :</b><br/><i>Ochrophyta</i></p> <p>- <b>Classe :</b> <i>Phaeophyceae</i></p> <p>- <b>Ordre :</b> <i>Fucales</i></p> <p>- <b>Famille :</b> <i>Halopteridaceae</i><br/>(Worms, 2025)</p> <p><b>Codes échantillons :</b> M, B</p> | <p>Un fucophycée de couleur brun verdâtre, avec un thalle principalement filamenteux ou finement ramifié, souvent souple. Les ramifications sont régulières mais peu denses, et le thalle se fixe par de petites frondes ou un disque basal (Doris, 2025).</p>                  |

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><i>Halopteris</i> Kützinger, 1843</p> <p>- <b>Embranchement</b> :<br/><i>Ochrophyta</i></p> <p>- <b>Classe</b> : <i>Phaeophyceae</i></p> <p>- <b>Ordre</b> : Dictyotales</p> <p>- <b>Famille</b> : <i>Dictyotaceae</i><br/>(Worms, 2025)</p> <p><b>Codes échantillons</b> : V</p>                                 | <p>Les espèces du genre <i>Dictyota</i> sont des algues brunes à thalle dichotomiquement ramifié en forme de ruban plat (laminaire), de couleur brun-jaune à brun-vert. Les frondes sont rigides, mesurent généralement quelques dizaines de centimètres de long et sont attachées par un petit disque basal. Le thalle est plat et souvent découpé, avec un port élancé et des ramifications dichotomiques régulières (Doris, 2025).</p> |    |
| <p><i>Caulerpa racemosa</i> (Forsskål)<br/><i>J. Agardh</i>, 1873</p> <p>- <b>Embranchement</b> :<br/><i>Chlorophyta</i></p> <p>- <b>Classe</b> : <i>Ulvophyceae</i></p> <p>- <b>Ordre</b> : Bryopsidales</p> <p>- <b>Famille</b> : <i>Caulerpaceae</i><br/>(Worms, 2025)</p> <p><b>Codes échantillons</b> : CRP</p> | <p>Algue verte possède un stolon rampant produisant des rhizoïdes fixateurs et un ensemble de frondes (assimilateurs) dressées, ayant une structure siphonnée (contenant de multiples noyaux dans une seule cellule). Les frondes sont irrégulièrement ramifiées en ramuli sphériques ou ovoïdes disposés sans ordre distinct, formant des « grappes » reconnaissables (Doris, 2025).</p>                                                 |    |
| <p><i>Ulva compressa</i> Linnaeus,<br/>1753</p> <p>- <b>Embranchement</b> :<br/><i>Chlorophyta</i></p> <p>- <b>Classe</b> : <i>Ulvophyceae</i></p> <p>- <b>Ordre</b> : Ulvales</p> <p>- <b>Famille</b> : <i>Ulvalaceae</i><br/>(Worms, 2025)</p> <p><b>Codes échantillons</b> : ENT</p>                              | <p>Algue verte avec un thalle membraneux, mince, feuilleté et d'aspect rubané. Le thalle est large, lisse, d'un vert vif, avec des bords finement ondulés. Sa texture est souple, épaisse de quelques cellules, atteignant quelques centimètres de hauteur (Fischer, 1987).</p>                                                                                                                                                           |  |

### 3. Identification génétique

L'identification moléculaire des macroalgues marines échantillonnées a été entreprise pour confirmer l'identification taxonomique classique et contribuer à la mise en place d'une première base de données génétiques locale. Les étapes clés de cette analyse, de l'extraction de l'ADN à l'analyse bioinformatique, sont détaillées dans la section (référence à la section Méthodologie).

#### 3.1. Extraction et contrôle qualité de l'ADN génomique

Suite à l'optimisation progressive des protocoles d'extraction d'ADN, des résultats contrastés ont été obtenus selon les espèces et les méthodes utilisées. La première approche, basée sur le kit AIONA appliquée aux échantillons codés B, E, G et D, s'est révélée inefficace, n'ayant pas permis l'obtention d'un ADN de qualité suffisante pour les applications en aval. Cela s'est traduit par l'échec de l'amplification PCR pour ces échantillons (*cf.* section III.3.2).

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

En revanche, les espèces CRP, V, S, M et ENT traitées selon le protocole CTAB modifié ont donné des extraits d'ADN de meilleure qualité, à la fois en termes de concentration et de pureté, permettant la poursuite des analyses génétiques.

La quantification spectrophotométrique par ScanDrop<sup>2</sup> a permis d'estimer la concentration en ADN ainsi que sa pureté, à travers les rapports d'absorbance A260/A280 (protéines) et A260/A230 (composés organiques). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 10.** Quantification et pureté de l'ADN génomique des échantillons d'algues

| Echantillon | Concentration (ng/μL) | Pureté A260/A280 | Qualité    |
|-------------|-----------------------|------------------|------------|
| CRP         | 26,33                 | 1,70             | Acceptable |
| S           | 19,10                 | 1,94             | Bonne      |
| ENT         | 21,83                 | 1,80             | Excellente |
| M           | 304,1                 | 1,92             | Bonne      |
| V           | 178,9                 | 1,80             | Excellente |
| B           | 45,3                  | 1,3              | Faible     |
| E           | 57,2                  | 2,27             | Faible     |
| G           | 20,28                 | 1,4              | Faible     |
| D           | 34,09                 | 1,5              | Faible     |

Ces résultats soulignent la performance nettement meilleure du protocole CTAB modifié, dont les extraits (CRP, S, ENT, M, V) ont affiché des ratios A260/A280 proches de la norme, associés à des concentrations largement suffisantes pour la PCR (généralement >10 ng/μL requis ; Sambrook et Russell, 2001).

À l'inverse, les ADN issus du protocole AIONA présentaient des ratios non conformes, traduisant des impuretés qui sont connues pour inhiber les réactions enzymatiques telles que la PCR et le séquençage (Schrader et al., 2012) :

- Ratios faibles (<1,8) pour B, G et D, indiquant une contamination probable par des protéines ou des composés phénoliques ;
- Ratio élevé (>2,0) pour E, pouvant signaler une contamination par l'ARN ou une perturbation du pH (Wilfinger et al., 1997 ; Schrader et al., 2012).

L'inefficacité de cette méthode pour certaines espèces pourrait s'expliquer par son incapacité à éliminer efficacement les polysaccharides et phénols. Ces métabolites secondaires sont particulièrement abondants dans les parois cellulaires des macroalgues (Loomis, 1969).

L'analyse qualitative par électrophorèse sur gel d'agarose a généralement montré la présence de bandes d'ADN de haut poids moléculaire pour les échantillons traités au CTAB, confirmant leur bonne intégrité. En revanche, les espèces traitées par AIONA ont montré des traînées diffuses (*smear*) ou des bandes mal définies, reflétant une possible dégradation de l'ADN. Bien

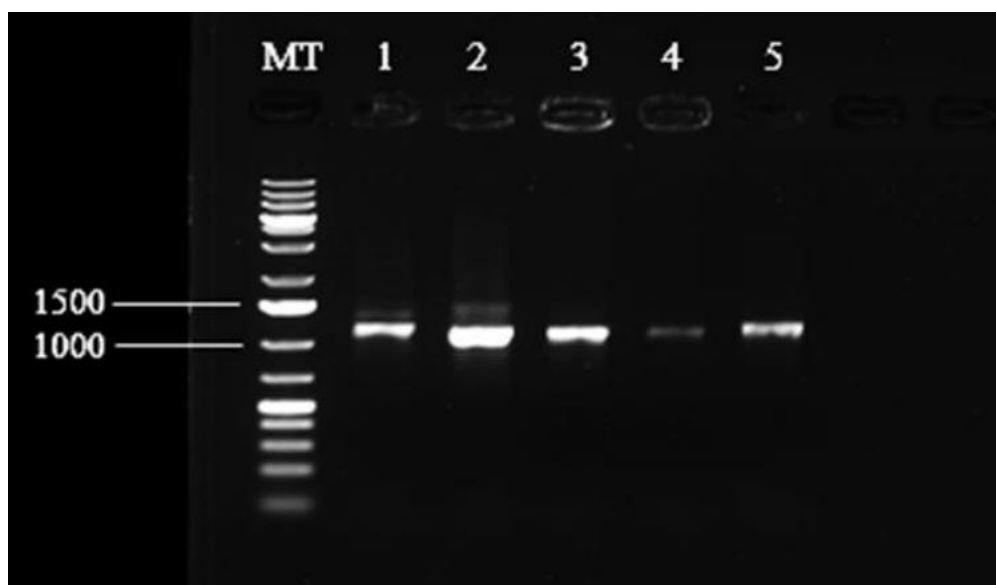
que des tentatives de purification aient été entreprises, une nouvelle extraction n'a pu être réalisée pour les espèces E, B et G (biomasse épuisée), ni pour D (contraintes temporelles).

Malgré ces limitations, les résultats globaux démontrent que le protocole CTAB optimisé est plus adapté à la matrice complexe des macroalgues, combinant un rendement satisfaisant et une qualité d'ADN jugée acceptables pour mener les analyses en aval.

### 3.2. Amplification par PCR du gène ARNr 18S

Les amorces universelles décrites par Lin et al. (2012) ont été synthétisées avec succès, puis purifiées (déprotection, précipitation, contrôle qualité) avant d'être utilisées pour la PCR.

L'amplification ciblée du gène ribosomal 18S a été testée sur l'ensemble des ADN extraits à partir des 9 échantillons macroalgaux. Les produits PCR ont été quantifiés par Scandrop puis visualisés par électrophorèse sur gel d'agarose à 1,2 %, révélant les profils suivants (fig.19).



**Figure 20.** Visualisation des amplicons PCR 18S rRNA des espèces d'algues sur gel d'agarose 1,2% , MT : marqueur de taille de l'ADN (GeneRuler 1 kb DNA Ladder). Bandes : 1 – V ; 2 – M ; 3 – ENT ; 4 – S ; 5 – CRP.

Les échantillons traités selon le protocole CTAB ont globalement montré une bande unique bien définie, à une taille estimée d'environ 1150 pb, correspondant à l'amplicon attendu pour le gène 18S. Toutefois, certaines variations d'intensité ou d'aspect ont été observées :

- Échantillon S : une bande spécifique a été détectée, mais de faible intensité, probablement en lien avec une concentration initiale plus faible en ADN ou une dégradation partielle (Wilson, 1997).
- Échantillon M : une bande secondaire faiblement marquée a été observée, suggérant une amplification aspécifique, possiblement due à une hybridation partielle des amorces ou à une contamination croisée lors de la préparation du mélange réactionnel (Arezi et al., 2003).

En revanche, aucune amplification n'a été obtenue pour les échantillons B, E, G et D, malgré plusieurs tentatives. Ces échecs peuvent s'expliquer par :

- La présence d'inhibiteurs enzymatiques (polysaccharides, phénols), fréquemment rencontrés dans les matrices macroalgales, comme en témoignent leurs ratios

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

A260/A280 inférieurs à 1,5, bien en dessous du seuil optimal pour un ADN pur (Opel et al., 2010 ; Schrader et al., 2012).

- Ou encore une quantité insuffisante d'ADN amplifiable, malgré des concentrations apparentes parfois élevées, en raison d'un ADN fragmenté ou altéré, ou de contaminants co-extraits non détectés par spectrophotométrie (Demeke et Jenkins, 2010).

Pour ces échantillons, une ré-extraction de l'ADN avec un protocole plus robuste ou des étapes de purification supplémentaires seraient nécessaires pour obtenir des amplicons.

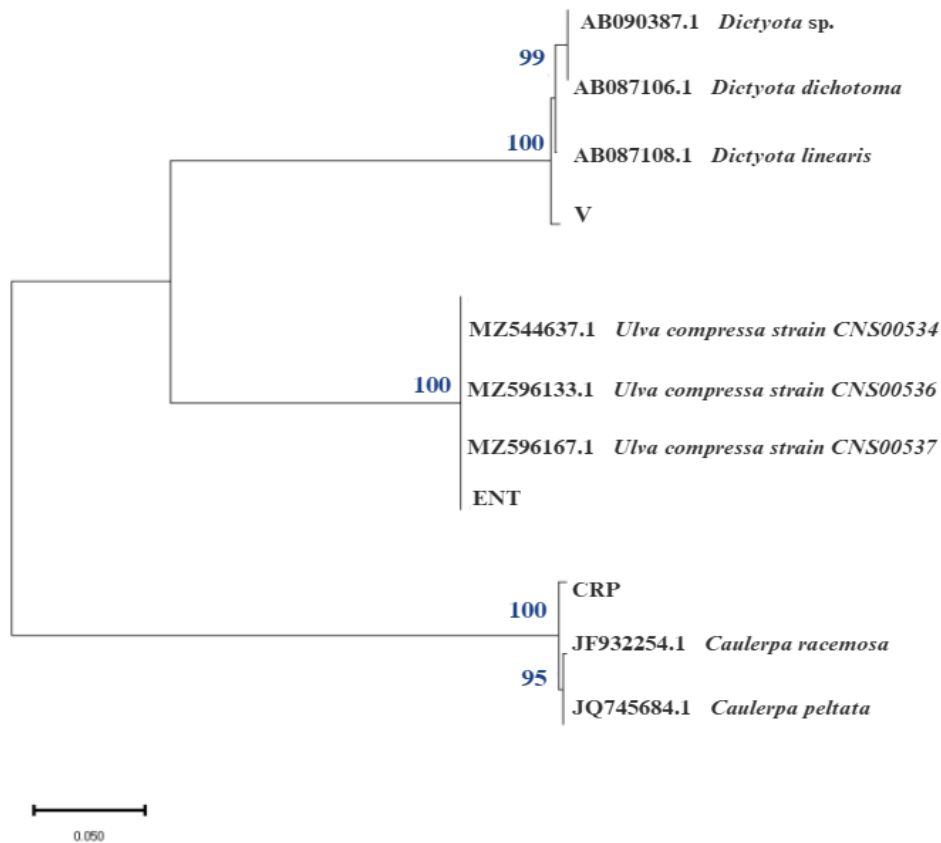
Ces résultats soulignent l'importance d'un ADN à la fois pur, intact et exempt de toute inhibition pour la réussite des étapes d'amplification enzymatique et des analyses moléculaires en aval (Wilson, 1997 ; Schrader et al., 2012).

### 3.3.Séquençage et analyse bioinformatique

L'analyse des séquences partielles du gène ARNr 18S obtenues par séquençage Sanger a été réalisée selon une approche bioinformatique standardisée (*cf.* chapitre II, section 3.6). Sur les cinq échantillons soumis au séquençage, trois ont fourni des séquences exploitables permettant une identification moléculaire fiable illustrée par le tableau 11 et l'arbre phylogénétique (fig 20) suivants. L'arbre phylogénétique a été construit à l'aide du logiciel MEGA 12, sur la base des séquences du gène 18S ARNr avec la méthode de Maximum de Vraisemblance (*Maximum Likelihood*) et une analyse de bootstrap sur 1000 répliques. Les deux échantillons restants (S et M) ont présenté des chromatogrammes de qualité insuffisante pour l'analyse bioinformatique.

**Tableau 11.** Résultats de l'analyse BLAST pour les échantillons séquencés avec succès

| Code | Espèce identifiée        | Max score | Total score | Query cover | % d'identité | Accession                |
|------|--------------------------|-----------|-------------|-------------|--------------|--------------------------|
| V    | <i>Dictyota linearis</i> | 1406      | 1406        | 100 %       | 100 %        | gi 38141734 AB087108.1   |
| ENT  | <i>Ulva compressa</i>    | 800       | 800         | 99 %        | 100 %        | gi 2070437036 MZ596167.1 |
| CRP  | <i>Caulerpa racemosa</i> | 1219      | 1219        | 98 %        | 95,63 %      | JF932254.1               |



**Figure 21.** Arbre phylogénétique des espèces d’algues marines séquencées (MEGA 12, 2025)

- **Échantillon V :** L'analyse moléculaire révèle une correspondance parfaite (100 % d'identité, 100 % de couverture) avec *Dictyota linearis*, confirmant l'appartenance au genre *Dictyota* déterminée morphologiquement, tout en précisant l'espèce. L'arbre phylogénétique place cet échantillon dans le clade *Dictyota* avec un support de bootstrap de 100 %, validant la robustesse de cette identification.

Il convient de noter que *Dictyota linearis* est régulièrement documentée dans la littérature méditerranéenne (Ribera et al., 1992 ; Cormaci et al., 2012). Les espèces du genre *Dictyota* sont largement distribuées en Méditerranée, incluant les côtes algériennes (Perret-Boudouresque & Seridi, 1989 ; Verlaque, 2001). Cette identification moléculaire s'inscrit donc dans le contexte biogéographique connu de l'espèce.

- **Échantillon ENT :** L'identification moléculaire révèle *Ulva compressa* avec une identité parfaite (100 %) et une couverture de 99 %. L'analyse phylogénétique confirme cette identification en positionnant l'échantillon au sein du clade *Ulva compressa* avec un support de bootstrap de 100%. Cette identification précise l'identification morphologique

préliminaire et concorde avec la distribution connue de cette espèce cosmopolite, fréquemment signalée en Méditerranée (Hayden et al., 2003 ; Flagella et al., 2007).

- **Échantillon CRP** : L'analyse moléculaire confirme l'identification morphologique avec *Caulerpa racemosa* (95,63 % d'identité, 98 % de couverture). Bien que le pourcentage d'identité soit légèrement inférieur à 100 %, il reste dans la gamme acceptable pour une identification spécifique au niveau du gène 18S (Saunders, 2005). L'arbre phylogénétique forme un clade bien résolu avec les séquences de référence de *C. racemosa* et *C. peltata* (supports de bootstrap de 100% et 96% respectivement), confirmant l'appartenance au complexe *Caulerpa racemosa*. Cette espèce invasive est bien documentée en Méditerranée, y compris sur les côtes algériennes (Verlaque et al., 2003 ; Djellouli et al., 2010).

- **Limites méthodologiques**

Les tentatives de séquençage pour les échantillons S et M n'ont pas abouti à des séquences exploitables. L'analyse des chromatogrammes révèle des profils de faible qualité avec des pics incohérents et un rapport signal/bruit insuffisant, rendant impossible l'assemblage de séquences consensus fiables (Ewing et Green, 1998).

Ces échecs peuvent être attribués à plusieurs facteurs techniques identifiés lors des étapes préliminaires :

- **Qualité de l'ADN template** : Les échantillons S et M ont présenté des ratios A260/A280 de 1,94 et 1,92 respectivement, mais avec une concentration relativement faible (19,10 ng/μL) pour l'échantillon S, qui pourrait avoir compromis l'efficacité de l'amplification PCR (Schrader et al., 2012).
- **Amplification PCR sub-optimale** : L'échantillon S avait montré une bande PCR de faible intensité lors de l'électrophorèse, suggérant une amplification limitée. Pour l'échantillon M, la présence d'une bande secondaire faible indiquait une possible amplification aspécifique, pouvant interférer avec le séquençage (Arezi et al., 2003).
- **Inhibiteurs résiduels** : Malgré l'utilisation du protocole CTAB optimisé, la présence d'inhibiteurs résiduels (polysaccharides, polyphénols) caractéristiques des macroalgues pourrait avoir affecté la qualité du séquençage (Opel et al., 2010).

Ces résultats soulignent l'importance de l'optimisation des protocoles d'extraction et de purification pour les matrices algales complexes, ainsi que la nécessité d'évaluer la qualité des amplicons PCR avant le séquençage.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

Il est important de noter que cette étude s'appuie sur le séquençage partiel du gène ARNr 18S, marqueur couramment utilisé pour l'identification taxonomique des eucaryotes (Saunders, 2005). Mais bien qu'il soit informatif au niveau spécifique, il ne constitue pas un séquençage génomique complet. Les identifications obtenues doivent être considérées comme des identifications moléculaires préliminaires, qui gagneraient à être consolidées par l'analyse de marqueurs supplémentaires (ITS, rbcL, COI) selon les recommandations pour le barcoding des algues (Saunders et Kucera, 2010).

### 4. Caractérisation biochimique

#### 4.1. Composition en lipides totaux

**Tableau 12.** Teneurs en lipides totaux des macroalgues étudiées

| Espèce                   | Masse initiale (g) | P <sub>0</sub> (g) | P <sub>1</sub> (g) | Teneur en lipides (%) |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| <i>S. coronopifolius</i> | 2,02               | 99,7714            | 99,8284            | <b>2,82</b>           |
| <i>D. dichotoma</i>      | 2,07               | 112,0552           | 112,2005           | <b>7,01</b>           |

Les teneurs en lipides obtenues révèlent une différence significative entre les deux espèces étudiées. *Dictyota dichotoma* présente une teneur en lipides de 7,01 %, nettement supérieure à celle de *Sphaerococcus coronopifolius* (2,82 %).

Ces résultats sont cohérents avec les données de la littérature indiquant que les algues brunes (*Phaeophyceae*) accumulent généralement plus de lipides que les algues rouges (*Rhodophyta*). Selon Kumari et al. (2013), les algues brunes peuvent contenir entre 1 et 15 % de lipides en poids sec, tandis que les algues rouges présentent généralement des teneurs inférieures à 5 %.

La teneur élevée en lipides de *D. dichotoma* peut s'expliquer par la présence d'acides gras polyinsaturés caractéristiques des *Phaeophyceae*, notamment les acides gras en C<sub>20</sub> et C<sub>22</sub> (Schmid et al., 2014). Ces lipides jouent un rôle important dans la fluidité membranaire et la résistance au stress environnemental (Guschina et Harwood, 2006).

#### 4.2. Composition en protéines totales

**Tableau 13.** Teneurs en protéines totales par la méthode Kjeldahl

| Espèce                   | Essai | V <sub>1</sub> (mL) | Azote (g/100g MS)  | Protéines (% MS)    |
|--------------------------|-------|---------------------|--------------------|---------------------|
| <i>S. coronopifolius</i> | R1    | 22,5                | 3,15               | 19,69               |
|                          | R2    | 23,9                | 3,35               | 20,94               |
|                          | R3    | 25,9                | 3,63               | 22,69               |
| <b>Moyenne ± ET</b>      | -     | -                   | <b>3,38 ± 0,24</b> | <b>21,11 ± 1,50</b> |
| <i>D. dichotoma</i>      | B1    | 14,7                | 2,06               | 12,88               |
|                          | B2    | 15,2                | 2,13               | 13,30               |
|                          | B3    | 16,5                | 2,31               | 14,44               |
| <b>Moyenne ± ET</b>      | -     | -                   | <b>2,17 ± 0,13</b> | <b>13,54 ± 0,82</b> |

### Calculs d'écart-type

- *S. coronopifolius*

$$ET = \sqrt{[(3,15 - 3,38)^2 + (3,35 - 3,38)^2 + (3,63 - 3,38)^2] / 2} = 0,24$$

- *D. dichotoma*

$$ET = \sqrt{[(2,058 - 2,165)^2 + (2,128 - 2,165)^2 + (2,310 - 2,165)^2] / 2} = 0,13$$

Les analyses révèlent que *Sphaerococcus coronopifolius* présente une teneur en protéines significativement plus élevée ( $21,11 \pm 1,50$  %) que *Dictyota dichotoma* ( $13,59 \pm 0,82$  %).

Cette différence reflète les spécificités métaboliques des deux groupes taxonomiques. Les rhodophycées sont généralement plus riches en protéines que les phaeophycées, notamment en raison de leur système photosynthétique complexe incluant les phycobiliprotéines (Wells et al., 2017). Selon Fleurence (1999), les algues rouges peuvent contenir jusqu'à 47 % de protéines en poids sec, avec des valeurs moyennes de 15-25 % pour les espèces méditerranéennes.

### Analyse statistique :

Le test t de Student révèle une différence hautement significative entre les deux espèces ( $p < 0,001$ ), avec un coefficient de variation de 7,1 % pour *S. coronopifolius* et 6,0 % pour *D. dichotoma*, témoignant d'une bonne reproductibilité analytique. Cette faible variation ( $CV < 10$  %) montre que la méthode Kjeldahl a été bien appliquée, et que les résultats obtenus sont cohérents entre les répliques.

### 4.3. Composition en polysaccharides totaux

#### 4.3.1. Rendements d'extraction

**Tableau 14.** Rendements d'extraction des polysaccharides

| Espèce                   | Masse initiale (g) | Extrait sec (g) | Rendement (%) |
|--------------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| <i>S. coronopifolius</i> | 20,0               | 2,22            | <b>11,10</b>  |
| <i>D. dichotoma</i>      | 20,0               | 0,62            | <b>3,10</b>   |

Le rendement d'extraction des polysaccharides hydrosolubles est nettement supérieur chez *S. coronopifolius* (11,10 %) par rapport à *D. dichotoma* (3,10 %).

Ces rendements d'extraction reflètent la nature et l'abondance des polysaccharides hydrosolubles dans chaque espèce. Le rendement élevé de *S. coronopifolius* s'explique par la richesse en carraghénanes, polysaccharides sulfatés hautement hydrophiles caractéristiques des Gigartinales (Campo et al., 2009).

Ces biopolymères forment des solutions visqueuses en milieu aqueux et sont facilement extractibles par traitement à chaud.

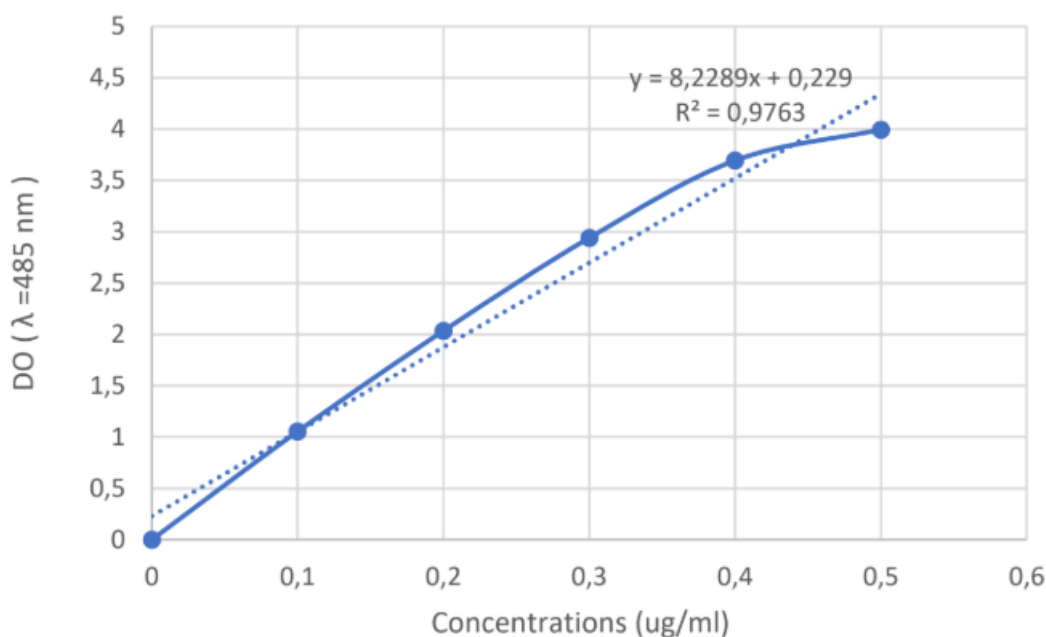
Le rendement plus faible de *D. dichotoma* peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- Nature des polysaccharides : les alginates et fucoïdanes des algues brunes présentent une solubilité variable selon leur composition en acides mannuronique/guluronique et leur degré de sulfatation (Draget et Taylor, 2011)
- Structure pariétale : la matrice pariétale des *Phaeophyceae* est plus complexe et rigide, limitant l'extraction par simple traitement aqueux

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

- Associations moléculaires : les polysaccharides peuvent être associés à d'autres composants (protéines, polyphénols) réduisant leur extractibilité (Holdt et Kraan, 2011)

### 4.3.2. Dosage colorimétrique des sucres totaux



**Figure 22.** Droite d'étalonnage du glucose

Les concentrations des polysaccharides dans chaque échantillon et leurs teneurs ont été calculées à partir de l'équation de régression de la droite d'étalonnage du glucose (fig.21) et sont résumées dans le tableau 15 et tableau 16.

**Tableau 15.** Résultats du dosage des sucres totaux par la méthode de Dubois

| Espèce                   | Tubes | Facteur de dilution | DO (485 nm) | Concentration (mg/mL) |
|--------------------------|-------|---------------------|-------------|-----------------------|
| <i>D. dichotoma</i>      | 1     | 6,67                | 2,528       | 0,279                 |
|                          | 2     | 2,86                | 3,3         | 0,373                 |
|                          | 3     | 2,0                 | 3,950       | 0,452                 |
| <i>S. coronopifolius</i> | 1     | 10,0                | 1,806       | 0,192                 |
|                          | 2     | 6,67                | 3,128       | 0,353                 |

Note : La dilution 3 de *S. coronopifolius* était hors gamme étalon

#### Calculs des concentrations

Concentration dans 1 mL d'échantillon = (Concentration mesurée × facteur de dilution)

Teneur dans la poudre algale = (Concentration × volume total d'extraction) / masse initiale

En considérant que 0,1 g d'extrait polysaccharidique provient de l'extraction de 20 g de poudre

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

**Tableau 16.** Teneurs en sucres totaux

| Espèce                   | Teneur dans l'extrait polysaccharidique (%) | Teneur rapportée à la MS (g/100g) |
|--------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|
| <i>D. dichotoma</i>      | 73,6                                        | 2,28                              |
| <i>S. coronopifolius</i> | 54,6                                        | 6,06                              |

Ces teneurs (2,28 % pour *D. dichotoma* et 6,06 % pour *S. coronopifolius*) correspondent aux polysaccharides hydrosolubles purifiés et sont cohérentes avec les rendements d'extraction observés.

Ces résultats confirment la richesse variable en polysaccharides des macroalgues selon leur taxonomie. Les algues rouges sont généralement riches en polysaccharides structuraux comme l'agar et les carraghénanes, tandis que les algues brunes contiennent principalement des alginates et des fucoïdanes (Usov, 2011).

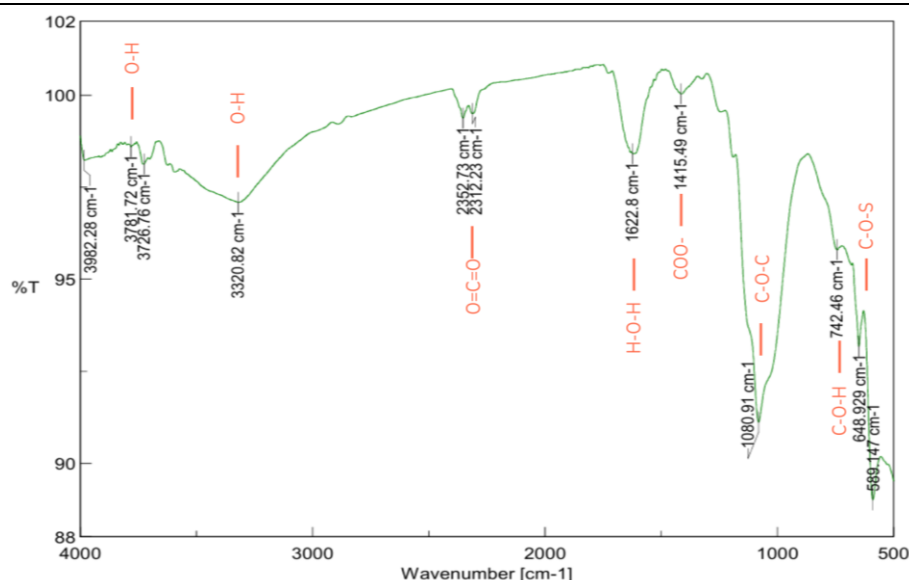
La teneur élevée en polysaccharides de *S. coronopifolius* est cohérente avec la présence de carraghénanes, polysaccharides sulfatés caractéristiques des Gigartinales (Campo et al., 2009). Ces biopolymères présentent des propriétés gélifiantes et épaississantes largement exploitées industriellement (Necas et Bartosikova, 2013).

### 4.3.3. Analyse par spectroscopie FTIR des extraits polysaccharidiques

L'analyse par spectroscopie FTIR des extraits polysaccharidiques révèle des profils spectraux distincts entre les deux espèces étudiées (Annexe), confirmant la nature différente de leurs polysaccharides constitutifs.

#### - *Dictyota dichotoma* – Algue brune (AB)

Le spectre FTIR de l'extrait (fig. 22) révèle une large bande d'élongation O–H centrée autour de 3320 cm<sup>-1</sup>, typique des groupes hydroxyle abondants dans les polysaccharides. Une bande d'élongation asymétrique des carboxylates (COO<sup>-</sup>) apparaît à 1623 cm<sup>-1</sup>, suivie d'une vibration symétrique à 1415 cm<sup>-1</sup>, caractéristiques des acides uroniques présents dans les alginates (Lahaye & Robic, 2007). L'intense bande à 1081 cm<sup>-1</sup> est attribuée aux vibrations C–O–C des liaisons glycosidiques, structure de base des polysaccharides. Enfin, les bandes entre 648 et 589 cm<sup>-1</sup> correspondent aux vibrations S=O ou C–O–S, suggérant la présence de fucoïdanes sulfatés, typiques des algues brunes (Ale et al., 2011).

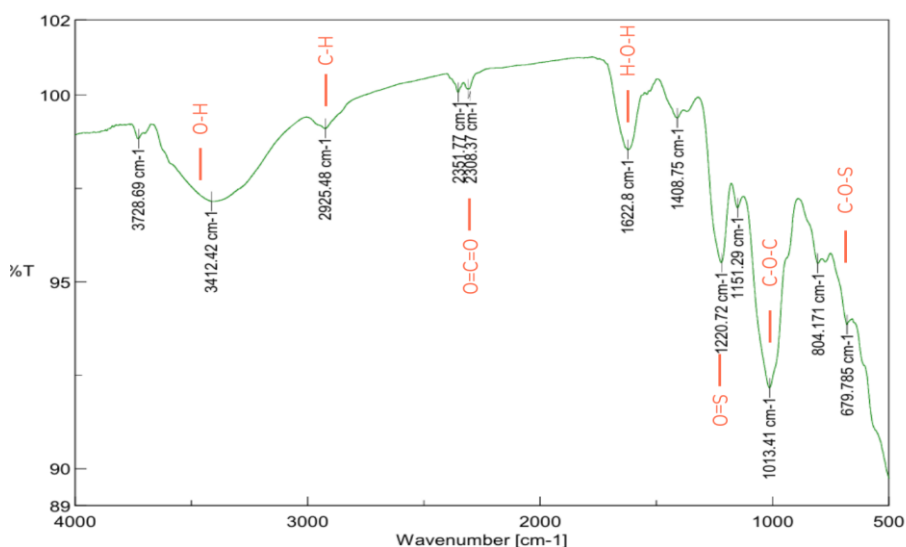


**Figure 23.** Spectre FTIR des polysaccharides de *Dictyota dichotoma*

Ces signaux confirment la nature polysaccharidique de l'extrait, probablement un mélange d'alginate et de fucoïdanes. Toutefois, une caractérisation fine par chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC), résonance magnétique nucléaire (RMN) ou spectrométrie de masse serait nécessaire pour confirmer précisément la structure et la composition des polysaccharides extraits.

## - *Sphaerococcus coronopifolius* – Algue rouge (AR)

Le spectre (fig. 23) montre une bande O-H large à  $3412\text{ cm}^{-1}$ , et des pics à  $1221\text{ cm}^{-1}$  et  $804\text{--}679\text{ cm}^{-1}$  correspondant aux vibrations d'élongation asymétrique des groupements sulfatés ( $\text{S}=\text{O}$  et  $\text{C}-\text{O}-\text{S}$ ), signatures des carraghénanes, polysaccharides sulfatés typiques des algues rouges (Rioux et al., 2007). L'absence de bandes fortes autour de  $1400\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$  confirme l'absence notable de groupes carboxylates, ce qui exclut les alginates. Le pic à  $1013\text{ cm}^{-1}$  est associé aux liaisons glycosidiques  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ , marqueur commun des polysaccharides.



**Figure 24.** Spectre FTIR des polysaccharides de *Sphaerococcus coronopifolius*

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ces résultats sont donc compatibles avec la présence de polysaccharides, probablement les carraghénanes, mais leur type précis ( $\kappa$ ,  $\iota$  ou  $\lambda$ ) ne peut être déterminé que par des analyses structurales complémentaires (RMN, électrophorèse capillaire, HPLC, ou La chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse GC-MS).

Cette caractérisation structurale complète l'analyse quantitative précédente et confirme l'identité chimique des polysaccharides extraits. Les différences spectrales observées expliquent les variations de rendement d'extraction et de solubilité entre les deux espèces.

### 4.4. Composition en polyphénols totaux

#### 4.4.1. Rendements d'extraction

Tableau 17. Rendements d'extraction des polyphénols

| Espèce                   | Masse initiale (g) | Extrait sec (g) | Rendement (%) |
|--------------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| <i>D. dichotoma</i>      | 10,0               | 3,442           | 34,42         |
| <i>S. coronopifolius</i> | 10,0               | 2,032           | 20,32         |

Les rendements d'extraction des polyphénols révèlent des valeurs élevées pour les deux espèces, mais une différence marquée entre *Dictyota dichotoma* (34,42 %) et *Sphaerococcus coronopifolius* (20,32 %).

Les différences de rendement peuvent être influencées par plusieurs facteurs techniques et biologiques : la polarité du solvant utilisé (ici un mélange éthanolique optimisé), la granulométrie de la poudre d'algue, l'état physiologique de l'échantillon au moment de la récolte, la saisonnalité, connue pour influencer la biosynthèse des polyphénols ainsi que le type et composition de l'algue (Wang et al., 2009; Catarino et al., 2017).

#### 4.4.2. Dosage colorimétrique par Folin-Ciocalteu

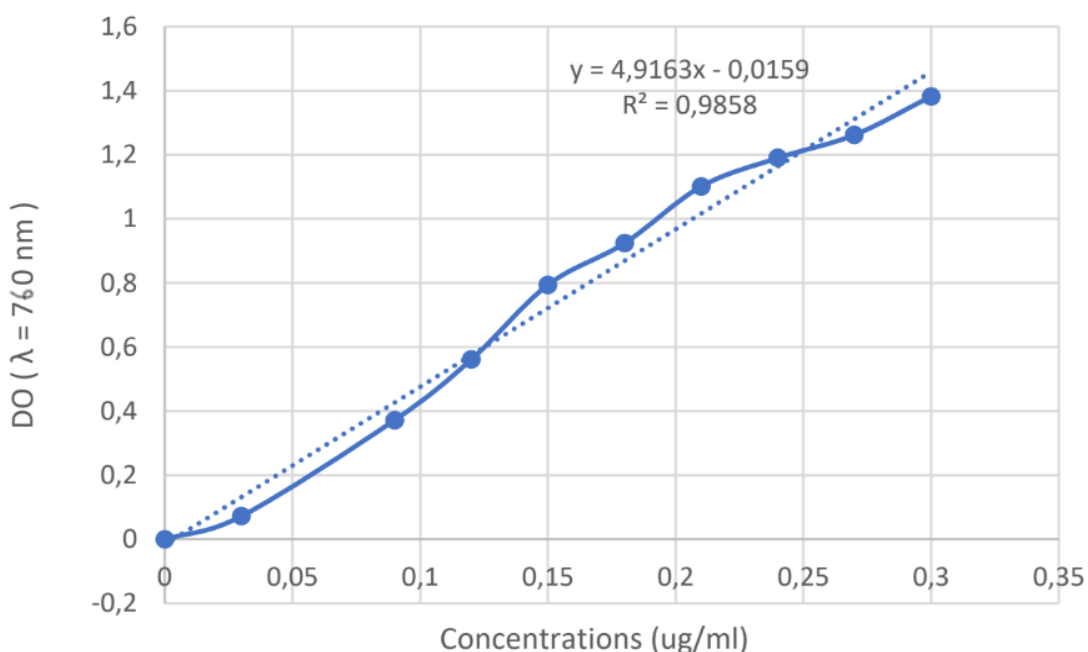


Figure 25. Courbe d'étalonnage de l'acide gallique

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

**Tableau 18.** Résultats du dosage des polyphénols totaux

| Espèce                   | Concentration (%) | DO (760 nm) | Concentration (mg EAG/mL) | Teneur (mg EAG/g MS) | Conversion en (% MS) |
|--------------------------|-------------------|-------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| <i>D. dichotoma</i>      | 100               | 2,1         | 0,431                     | 17,68                | -                    |
|                          | 50                | 0,934       | 0,193                     | 15,84                | -                    |
| <b>Moyenne</b>           | -                 | -           | -                         | <b>16,76</b>         | <b>1,68</b>          |
| <i>S. coronopifolius</i> | 100               | 1,211       | 0,250                     | 10,08                | -                    |
|                          | 75                | 1,031       | 0,213                     | 11,33                | -                    |
|                          | 50                | 0,470       | 0,099                     | 7,94                 | -                    |
| <b>Moyenne</b>           | -                 | -           | -                         | <b>9,78</b>          | <b>0,98</b>          |

Note : La dilution à 75 % de *D. dichotoma* était hors gamme étalon

Les résultats ont été obtenues à partir de l'équation de régression de la droite d'étalonnage de l'acide gallique (fig. 24) et révèlent que *Dictyota dichotoma* présente une teneur en polyphénols totaux significativement plus élevée (16,76 mg EAG/g MS) que *Sphaerococcus coronopifolius* (9,78 mg EAG/g MS).

Cette différence s'explique par la composition phénolique spécifique des algues brunes, riches en phlorotannins, des polymères phénoliques complexes dérivés du phloroglucinol (Koivikko et al., 2005). Ces composés, absents chez les algues rouges, constituent une réponse adaptative aux stress environnementaux et présentent des propriétés antioxydantes remarquables (Pavia et Toth, 2000).

Selon Agregán et al. (2017), les algues brunes méditerranéennes peuvent contenir entre 0,2 et 14 % de phlorotannins en poids sec, nos résultats s'inscrivant dans cette gamme. Les algues rouges contiennent principalement des acides phénoliques simples et des flavonoïdes en quantités généralement inférieures (Farvin et Jacobsen, 2013).

### 4.4.3. Évaluation de l'activité antioxydante (Test DPPH)

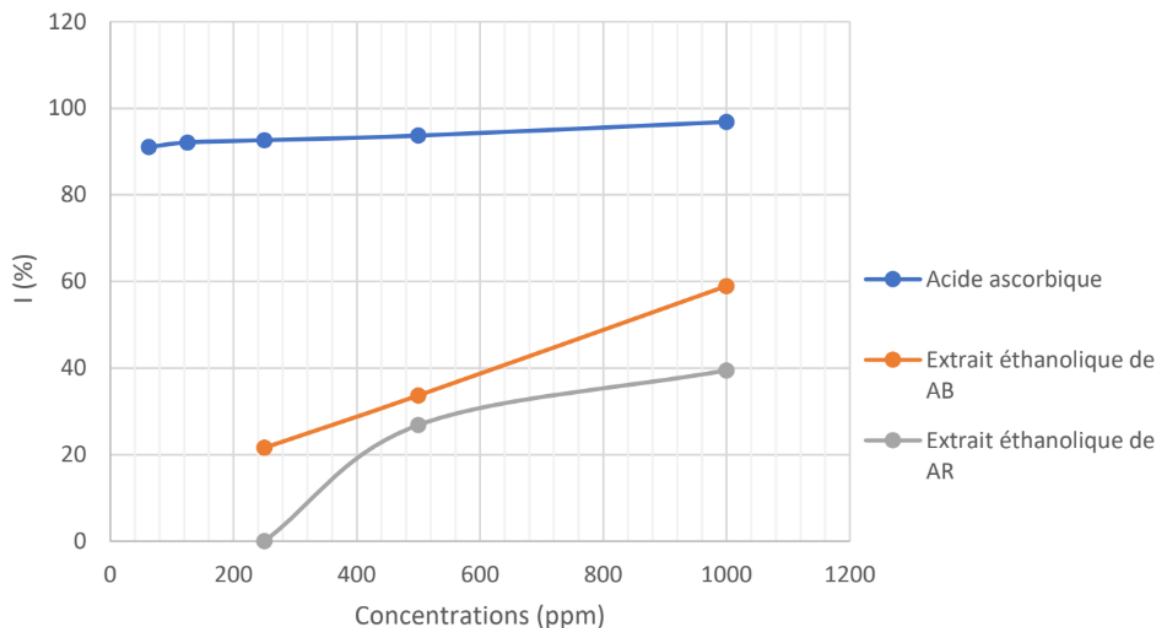
L'évaluation de l'activité antioxydante a été réalisée par le test DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl) sur les extraits de polyphénols des deux espèces d'algues ainsi que sur l'acide ascorbique utilisé comme référence, permettant d'obtenir les valeurs de densité optique présentées dans le tableau suivant (Tableau 19).

**Tableau 19.** Valeurs d'absorbance (DO à 517 nm) mesurées lors du test DPPH

| Echantillon              | 1000 ppm | 500 ppm | 250 ppm | 125 ppm | 62,5 ppm |
|--------------------------|----------|---------|---------|---------|----------|
| <i>D. dichotoma</i>      | 0,078    | 0,126   | 0,149   | -       | -        |
| <i>S. coronopifolius</i> | 0,115    | 0,139   | 0,147   | -       | -        |
| Acide ascorbique         | 0,006    | 0,012   | 0,014   | 0,015   | 0,017    |

Sachant que : DO contrôle = 0,190

## RESULTATS ET DISCUSSIONS



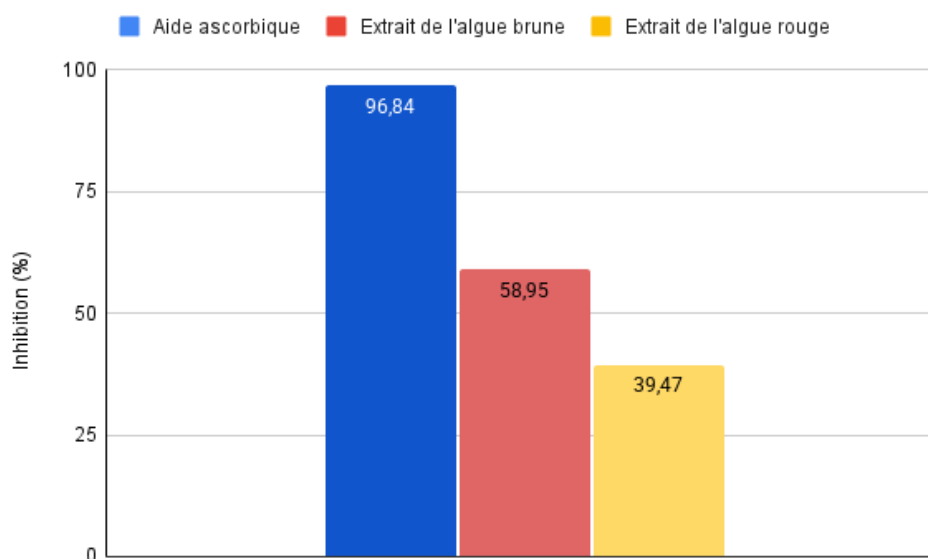
**Figure 26.** Variations du pourcentage d'inhibition en fonction des concentrations de l'acide ascorbique et des deux extraits algaux

**Tableau 20.** Activité antioxydante des extraits de polyphénols des deux algues

| Espèce                   | Concentration (ppm) | Inhibition % | IC <sub>50</sub> (ppm) | Équivalent acide ascorbique (mg/g) |
|--------------------------|---------------------|--------------|------------------------|------------------------------------|
| <i>S. coronopifolius</i> | 1000                | 39,47        | ≈1200-1300             | ≈80-90                             |
|                          | 500                 | 26,84        |                        |                                    |
|                          | 250                 | 22,63        |                        |                                    |
| <i>D. dichotoma</i>      | 1000                | 58,95        | ≈800-850               | ≈120-130                           |
|                          | 500                 | 33,68        |                        |                                    |
|                          | 250                 | 21,58        |                        |                                    |

L'analyse comparative des courbes dose-réponse (fig. 26) révèle des cinétiques d'inhibition distinctes entre les trois échantillons testés. L'acide ascorbique présente une activité antioxydante très élevée avec un IC<sub>50</sub> inférieur à 62,5 ppm, atteignant 91,05% d'inhibition à cette concentration, confirmant son efficacité reconnue comme antioxydant de référence.

Les extraits algaux démontrent une activité antioxydante modérée mais significative, avec une supériorité claire de *D. dichotoma* (IC<sub>50</sub> ≈ 800-850 ppm) par rapport à *S. coronopifolius* (IC<sub>50</sub> ≈ 1200-1300 ppm). Cette hiérarchie d'activité est illustrée par l'histogramme des pourcentages d'inhibition à 1000 ppm (fig 25), où *D. dichotoma* présente 58,95 % d'inhibition contre 39,47 % pour *S. coronopifolius*.



**Figure 27.** Activité antiradicalaire du DPPH : comparaison du pourcentage d'inhibition des trois échantillons à 1000 ppm

L'histogramme comparatif illustre de manière synthétique la hiérarchie des capacités antioxydantes à la concentration de 1000 ppm. L'acide ascorbique exhibe le pourcentage d'inhibition le plus élevé (96,84%), établissant la référence maximale d'efficacité antioxydante. L'extrait de *D. dichotoma* montre une activité intermédiaire substantielle (58,95%), représentant environ 61% de l'activité de référence, tandis que *S. coronopifolius* présente une capacité d'inhibition plus modeste (39,47%), équivalant à 41% de l'activité de référence. Cette gradation reflète fidèlement les différences de composition phénolique entre les espèces étudiées.

Cette différence d'activité est directement corrélée aux teneurs en polyphénols totaux mesurées précédemment. L'activité antioxydante supérieure de *D. dichotoma* s'explique par la présence de phlorotannins, reconnus pour leur capacité de piégeage des radicaux libres supérieure à celle des antioxydants de synthèse (Li et al., 2011).

Selon Santoso et al. (2004), les phlorotannins d'algues brunes présentent des  $IC_{50}$  variant de 5 à 500  $\mu\text{g/mL}$  selon leur pureté et leur concentration. Nos résultats, bien que plus élevés, restent dans une gamme acceptable pour des extraits bruts non purifiés.

L'expression en équivalent acide ascorbique révèle des capacités antioxydantes de 120- mg/g pour *D. dichotoma* et 80-90 mg/g pour *S. coronopifolius*, positionnant ces espèces comme des sources potentielles d'antioxydants naturels pour des applications nutraceutiques ou cosmétiques (Connan et al., 2007).

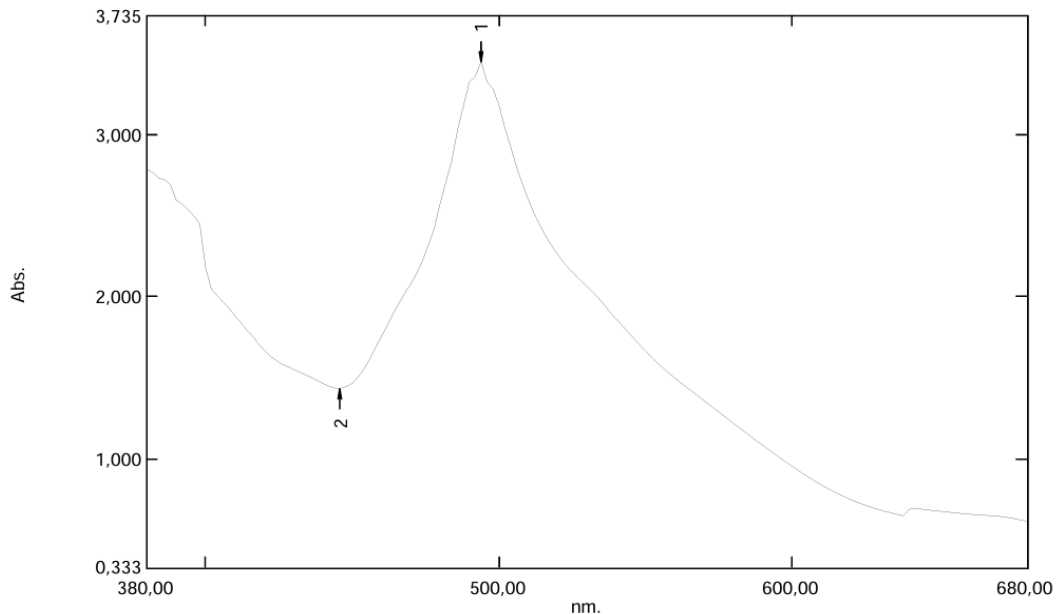
### 4.5. Analyse des pigments extraits des macroalgues

#### 4.5.1. Identification des phycobiliprotéines de l'algue rouge

L'extraction aqueuse par sonication à basse température a permis d'obtenir un extrait pigmentaire rouge caractéristique des phycobiliprotéines des algues rouges.

Le profil spectral (fig. 27) obtenu suite au balayage de spectre d'absorption UV-visible (380-680 nm) est caractéristique de la phycoérythrine (PE), pigment accessoire majeur du photosystème II chez les rhodophycées. Cette identification repose sur plusieurs critères :

- Maximum d'absorption à 494 nm : Typique de la phycoérythrine, qui présente généralement son pic principal entre 490-500 nm dans le bleu-vert (Glazer, 1985)
- Absorption secondaire à 446 nm : Correspond aux transitions électroniques des chromophores phycoérythrobiline présents dans la structure protéique
- Absence de pic vers 620-650 nm : Confirme la faible concentration en phycocyanine, qui présenterait un maximum vers 620 nm.



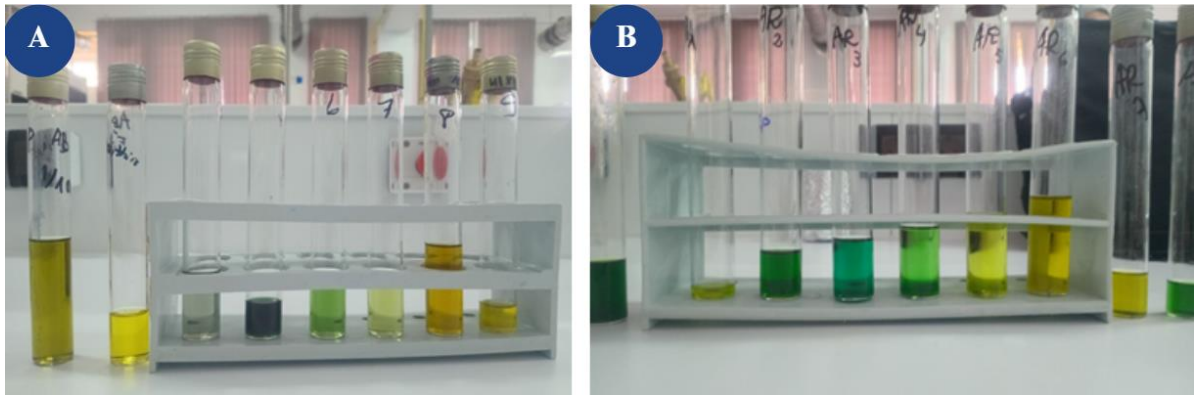
**Figure 28.** Profil spectrale de l'extrait hydrosoluble de l'algue rouge (UVProb-1800)

La présence de phycoérythrine chez *S. coronopifolius* reflète son adaptation aux environnements marins profonds où dominent les longueurs d'onde bleues-vertes, c'est une antenne collectrice de lumière pour la photosynthèse, optimisant la capture photonique dans les zones à faible luminosité en milieu infralittoral (Gantt, 1981).

Cette caractérisation confirme la richesse en phycobiliprotéines de *S. coronopifolius* et explique partiellement sa teneur élevée en protéines totales mesurée précédemment. Les phycobiliprotéines constituent en effet une fraction significative des protéines totales chez les algues rouges (Fleurence, 1999). Ces protéines présentent un intérêt biotechnologique comme colorants naturels et antioxydants (Sekar et Chandramohan, 2008).

### 4.5.2. Fractionnement des pigments chlorophylliens des algues étudiées

La chromatographie sur colonne a permis la séparation de différentes fractions pigmentaires à partir des extraits bruts de l'algue brune (*D. dichotoma*) et de l'algue rouge (*S. coronopifolius*). Les observations visuelles des fractions éluées sont présentées dans les figures et le tableau ci-dessous.



**Figure 29.** Fractions pigmentaires de l'extrait chlorophyllien des deux échantillons algaux : (A) Séparation de l'extrait brut de l'algue brune ; (B) Séparation de l'extrait brut de l'algue rouge.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

**Tableau 21.** Récapitulatif des fractions pigmentaires de l'algue brune obtenues par chromatographie sur colonne

| Espèce      | Fraction     | Solvant d'élution et polarité       | Code         | Observation                          |
|-------------|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|
| Algue Brune | Extrait Brut | —                                   | AB brute     | brun / vert foncé                    |
|             | Fraction 1   | Hexane/Acétone (9:1) - Faible       | AB3          | Jaune vif                            |
|             |              |                                     | Phéopigments | Noirâtre (non analysé spectralement) |
|             | Fraction 2   | Hexane/Acétone (7:3) - Moyenne      | AB4-5        | Vert foncé                           |
|             | Fraction 3   | Hexane/ Acétone (1:1) - Haute       | AB6          | Vert clair                           |
|             |              |                                     | AB7          | Jaune-vert                           |
|             | Fraction 4   | Acétone/Méthanol (1:1) - Très haute | AB8          | Jaune brun                           |
|             |              |                                     | AB9          | Jaune foncé                          |
| Algue Rouge | Extrait Brut | —                                   | AR brute     | Vert foncé                           |
|             | Fraction 1   | Hexane/Acétone (9:1) - Faible       | AR1-2        | Vert clair                           |
|             | Fraction 2   | Hexane/Acétone (7:3) - Moyenne      | AR3          | Vert clair                           |
|             |              |                                     | AR4          | Vert très clair                      |
|             | Fraction 3   | Acétone/Méthanol (1:1) - Haute      | AR5          | Jaune clair                          |
|             |              |                                     | AR6          | Jaune foncé                          |
|             | Fraction 4   | Acétone/Méthanol (1:1) - Très haute | AR7          | Jaune                                |
|             |              |                                     | AR8          | Vert foncé                           |

### 4.5.3. Analyse spectrophotométrique UV-Vis

L'analyse UV-Visible des fractions pigmentaires des deux algues a permis d'identifier qualitativement les principales familles de pigments par leurs longueurs d'onde maximales d'absorption ( $\lambda_{\text{max}}$ ), grâce à des spectres représentatifs (Annexes), comparés aux données de la littérature.

#### A. *Dictyota dichotoma*

- Extrait Brut (AB brute) : Le spectre de l'extrait brut présente un pic majeur à 664 nm, caractéristique de la chlorophylle a (chl a). Des épaules d'absorption sont observées entre 480 nm et 534 nm, indiquant la présence de caroténoïdes, dont la fucoxanthine, pigment accessoire majeur des algues brunes. La couleur sombre est due au mélange complexe de pigments.
- Fraction 1 (AB3) : Cette fraction présente des pics intenses dans la région du bleu-violet (398 nm et 468 nm), caractéristiques des caroténoïdes apolaires, et particulièrement compatibles avec la fucoxanthine (Britton et al., 2004). La présence d'un pic significatif à 666 nm indique une co-élution de chlorophylle a ou de dérivés dégradés.
- Phéopigments (visuel) : Une phase liquide noirâtre a été visuellement identifiée après l'élution de la fraction AB3. Cette observation est fortement indicative de la présence de phéophytines (produits de dégradation de la chlorophylle a), dont la couleur gris-brun est caractéristique (Solymosi et Schoefs, 2008).
- Fraction 2 (AB4-5) : Cette fraction est dominée par des pics intenses à 650 nm et 612 nm, caractéristiques de la chlorophylle a et de la chlorophylle c respectivement. Des pics secondaires entre 480 nm et 534 nm indiquent la co-présence de caroténoïdes ou de xanthophylles.
- Fraction 3 (AB6 et AB7) : Les spectres montrent une diminution progressive de la chlorophylle a (pic à 660 nm) et une augmentation des bandes de Soret (398 nm), suggérant une proportion croissante de xanthophylles plus polaires et/ou de phéopigments. Les absorbances plus faibles dans AB7 sont cohérentes avec une dilution ou une concentration moindre des pigments principaux.
- Fraction 4 (AB8 et AB9) : Ces fractions de haute polarité présentent une faible absorption de chlorophylle a (658 nm), mais des pics intenses dans le bleu-violet (398 nm) et des pics/épaules à 580-604 nm. Ces profils spectraux, combinés aux couleurs jaune-brun/jaune foncé, sont très caractéristiques des phéophytines (Solymosi et Schoefs, 2008) et des xanthophylles très polaires.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

**Tableau 22.** Interprétation des spectres UV-Vis des fractions de *Dictyota dichotoma*

| Fraction     | Code     | $\lambda_{\text{max}}$ (nm) majeures | Interprétation pigmentaire                                          |
|--------------|----------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Extrait Brut | AB brute | 664, 534, 504, 482                   | Mélange de chlorophylles et de caroténoïdes                         |
| Fraction 1   | AB3      | 398, 468, 666 (intense)              | Fucoxanthine (dominante), Chl a (co-éluee)                          |
| Fraction 2   | AB4-5    | 650, 612, 534, 504, 480              | Chl a (dominante), Chl c, Caroténoïdes/Xanthophylles                |
| Fraction 3   | AB6      | 660, 604, 398                        | Chl a, traces de caroténoïdes/phéopigments                          |
|              | AB7      | 660 (faible), 610, 398               | Chl a (faible), Xanthophylles polaires, Phéopigments                |
| Fraction 4   | AB8      | 658 (faible), 604, 580, 398          | Phéophytines (dominantes), Xanthophylles polaires, Chl a résiduelle |
|              | AB9      | 398 (intense), 658 (très faible)     | Phéopigments (dominants), Xanthophylles très polaires               |

*Dictyota dichotoma* présente un profil pigmentaire typique des algues brunes, dominé par la chlorophylle a, la chlorophylle c et la fucoxanthine (Mimouni et al., 2012; Smerilli et Brunet, 2019). La fucoxanthine, un caroténoïde majeur, est responsable de la couleur jaune-brun caractéristique de ces algues et est éluee précocement en raison de sa polarité relativement faible (Britton et al., 2004).

La présence de phéopigments est notable, et souvent liée à des conditions de stress environnemental telles que la forte exposition lumineuse, l'élévation de température, les variations de salinité ou le vieillissement des tissus algaux (Havaux, 1998; Solymosi et Schoefs, 2008). Le site d'échantillonnage (Aïn Benian) est soumis à une forte anthropisation, ainsi qu'à des variations de température, de turbidité et de salinité, ce qui peut accentuer leur production. D'un point de vue écologique, ces phéopigments ne sont pas de simples produits de dégradation passive ; ils peuvent aussi jouer un rôle adaptatif en protégeant les cellules contre la photodégradation ou en stabilisant les membranes chloroplastiques sous stress oxydatif (Havaux, 1998).

La diversité pigmentaire de *D. dichotoma* confère à cette espèce un fort potentiel biotechnologique. La fucoxanthine, en particulier, est reconnue pour ses propriétés antioxydantes, anti-obésité, anti-diabétiques, et son utilisation comme colorant naturel ou agent photoprotecteur en cosmétique (Zhang et al., 2021).

### **B. *Sphaerococcus coronopifolius***

L'analyse UV-Visible des fractions pigmentaires de *Sphaerococcus coronopifolius* a permis d'identifier qualitativement les principales familles de pigments.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

**Tableau 23.** Interprétation des spectres UV-Vis des fractions de *Sphaerococcus coronopifolius*

| Fraction     | Code     | $\lambda_{\text{max}}$ (nm) principaux | Interprétation pigmentaire                                                     |
|--------------|----------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Extrait Brut | AR brute | 654, 616, 578                          | Mélange de Chl a, de caroténoïdes et de phéopigments                           |
| Fraction 1   | AR1-2    | 658, 616, 578                          | Chl a, Caroténoïdes (élution précoce)                                          |
| Fraction 2   | AR3      | 658, 616                               | Chl a (dominante), pigments accessoires (616 nm)                               |
|              | AR4      | 662, 616                               | Chl a (dominante), pigments accessoires (616 nm)                               |
| Fraction 3   | AR5      | 660 (faible), 614 (faible), 412        | Caroténoïdes polaires (Xanthophylles), Phéopigments, Chlorophylles résiduelles |
|              | AR6      | 422, 470, 660 (très faible)            | Caroténoïdes polaires (Xanthophylles), Phéopigments (dominants)                |
| Fraction 4   | AR7      | 398, 662 (faible)                      | Caroténoïdes polaires (Xanthophylles), Phéopigments                            |
|              | AR8      | 662, 616                               | Chl a (dominante) et pigments accessoires                                      |

- Extrait Brut (AR brute) : Le spectre de l'extrait brut présente un pic majeur à 654 nm (chlorophylle a) avec un pic secondaire très significatif à 616 nm, probablement lié à d'autres pigments accessoires ou à des interférences (Jeffrey et Humphrey, 1975). Des pics/épaules entre 518 nm et 590 nm indiquent la présence de caroténoïdes.
- Fraction 1 (AR1-2) : Cette fraction contient principalement de la chlorophylle a (658 nm) et des pigments absorbant autour de 616 nm (potentiellement des pigments accessoires ou des interférences). L'élution précoce de ces chlorophylles, bien que de faible polarité, peut suggérer une élution non complète ou la présence de formes légèrement altérées.
- Fraction 2 (AR3 et AR4) : Ces fractions sont clairement dominées par la chlorophylle a (658-662 nm) avec des absorbances très intenses, indiquant une forte concentration et une pureté relative de ces pigments.
- Fraction 3 (AR5 et AR6) : Ces fractions montrent une diminution des chlorophylles et ne dominance des pics dans le bleu-violet (412 nm, 422 nm, 470 nm), caractéristiques des caroténoïdes polaires (xanthophylles) et des phéopigments. La couleur jaune est cohérente avec ces pigments.
- Fraction 4 (AR7 et AR8) : La fraction AR7 est similaire aux précédentes, dominée par les caroténoïdes polaires et les phéopigments. Étonnamment, la fraction AR8, la dernière éluee, montre un retour à une forte concentration de chlorophylle a (662 nm)

et chlorophylle c (616 nm). Cela pourrait indiquer l'élution de formes très polaires ou fortement liées de ces chlorophylles, nécessitant le solvant le plus polaire pour être éluées.

*Sphaerococcus coronopifolius* présente un profil pigmentaire caractérisé par la dominance de la chlorophylle a et de pigments accessoires absorbant autour de 616 nm. Les algues rouges sont typiquement caractérisées par la présence de chlorophylles a et de phycobiliprotéines (phycoérythrine, phycocyanine, allophycocyanine) comme pigments accessoires majeurs, et ne contiennent généralement pas de chlorophylle c (Jeffrey et Humphrey, 1975). Les caroténoïdes et xanthophylles sont également présents, contribuant aux teintes jaunes des fractions plus polaires.

L'élution des chlorophylles a et des pigments accessoires (autour de 616 nm) dans des fractions de polarité très différentes (AR1-2 et AR8) suggère une complexité dans leur association ou leur état de dégradation, ou bien la présence de différentes formes de ces pigments avec des polarités variées. Comme pour l'algue brune, la présence de phéopigments dans les fractions de haute polarité indique des processus de dégradation, potentiellement influencés par les conditions environnementales du site d'échantillonnage.

Cependant, la spectrophotométrie UV-Vis, bien qu'utile pour un premier criblage qualitatif, ne permet pas une identification formelle et une quantification précise des pigments. Des analyses complémentaires, notamment par chromatographie liquide à haute performance (HPLC) couplée à la détection spectrale ou de masse, sont indispensables pour confirmer l'identité exacte de chaque pigment, résoudre les co-élutions complexes et établir des corrélations quantitatives robustes. Cela permettrait également de mieux comprendre les mécanismes d'adaptation des algues aux stress environnementaux et d'optimiser l'extraction de biomolécules d'intérêt afin d'exploiter leur potentiel bioactif.

#### 4.6. Synthèse de la caractérisation biochimique

Cette synthèse établit une corrélation directe entre la composition biochimique des macroalgues *Dictyota dichotoma* (algue brune) et *Sphaerococcus coronopifolius* (algue rouge), échantillonnées en février 2025 sur la côte d'Alger, leurs stratégies d'adaptation écophysiologique et leur potentiel biotechnologique. L'analyse met en lumière des profils métaboliques distincts, influencés par les conditions environnementales et la saisonnalité.

Les analyses révèlent des stratégies adaptatives spécifiques à chaque espèce, clairement illustrées par leurs compositions relatives (fig 29).

Cette caractérisation révèle des profils biochimiques complémentaires entre les deux espèces étudiées. *Dictyota dichotoma* se distingue par des teneurs élevées en lipides et polyphénols, conférant un potentiel antioxydant remarquable. *Sphaerococcus coronopifolius* présente une richesse en protéines et polysaccharides, suggérant des applications dans les domaines alimentaire et pharmaceutique.

La chromatographie sur colonne, couplée à la spectrophotométrie UV-Vis, a permis un premier criblage qualitatif des pigments des deux espèces d'algues. Les profils pigmentaires observés sont cohérents avec les classifications taxonomiques des algues brunes et rouges, mettant en évidence des compositions distinctes mais aussi des similarités :

- Les deux espèces sont riches en chlorophylle a.
- La fucoxanthine est le caroténoïde dominant et caractéristique de *D. dichotoma*. Chez *S. coronopifolius*, d'autres types de caroténoïdes et xanthophylles sont présents

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

---

- Des phéopigments sont identifiés dans les fractions les plus polaires des deux espèces, indiquant des processus de dégradation des chlorophylles.

La présence de phéopigments dans les deux espèces souligne l'impact potentiel de facteurs de stress environnementaux sur la composition pigmentaire et l'état physiologique des algues, témoignant d'un système adaptatif permettant aux algues de s'ajuster aux fluctuations du milieu marin.

Ces résultats confirment l'intérêt biotechnologique des macroalgues méditerranéennes et ouvrent des perspectives pour leur valorisation en tant que sources de biomolécules actives (Schiener et al., 2015). La diversité des profils métaboliques observés témoigne de l'adaptation évolutive des différents groupes taxonomiques aux contraintes environnementales méditerranéennes (Cormaci et al., 2012).

### 5 Discussion générale

L'échantillonnage réalisé sur deux sites distincts (Alger et Rachgoun) a permis de collecter une diversité d'espèces dans des conditions physico-chimiques typiques des eaux côtières méditerranéennes.

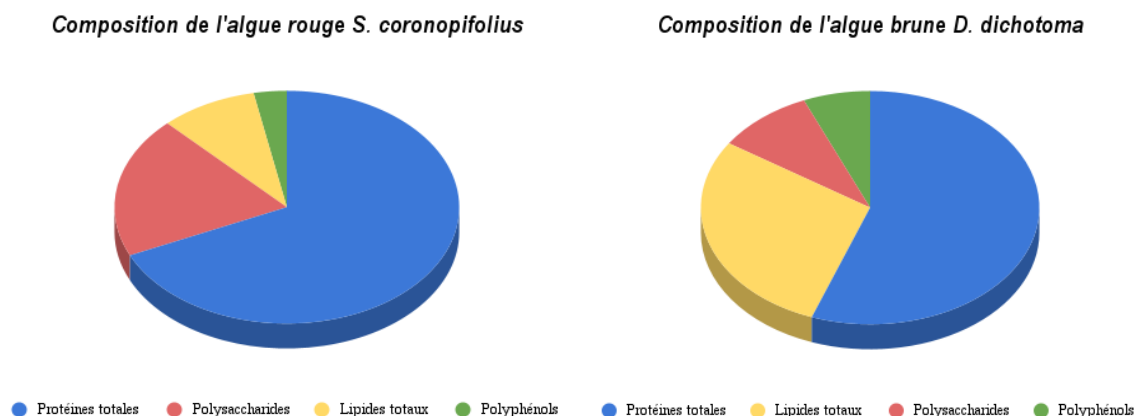
#### 5.1. Identification Génétique : Succès et Limites

L'optimisation des protocoles d'extraction d'ADN, notamment avec le protocole CTAB qui s'est avéré plus performant que le kit AIONA initial, a permis l'amplification réussie du gène 18S ARNr pour plusieurs espèces. Le séquençage a confirmé avec succès l'identité de *Dictyota linearis* et *Ulva compressa* avec une grande précision (100% d'identité), tandis que *Caulerpa racemosa* a été identifiée avec un pourcentage d'identité légèrement inférieur, ce qui reste acceptable pour ce marqueur.

Cependant, plusieurs échantillons n'ont malheureusement pas pu être identifiés génétiquement malgré les efforts d'optimisation, soulignant la complexité des matrices algales riches en métabolites secondaires et composés phénoliques qui interfèrent avec les réactions enzymatiques.

#### 5.2. Caractérisation Biochimique : Profils Complémentaires et Limites

La caractérisation biochimique a révélé des profils métaboliques distincts, influencés par les conditions environnementales et la saisonnalité. Les analyses révèlent des stratégies adaptatives spécifiques à chaque espèce, clairement illustrées par leurs compositions relatives (fig 29).



**Figure 30.** Composition biochimique relative des deux algues étudiées

*Dictyota dichotoma* s'est distinguée par des teneurs élevées en lipides totaux (7,01 %) et en polyphénols totaux (16,76 mg EAG/g MS), avec une activité antioxydante supérieure ( $IC_{50} \approx 800-850$  ppm), cohérente avec la présence de phlorotannins caractéristiques des algues brunes (Li et al., 2011). L'analyse des pigments a confirmé la présence de chlorophylle a, chlorophylle c et probablement de fucoxanthine.

*Sphaerococcus coronopifolius* a montré une richesse notable en protéines totales (21,11 %) et en polysaccharides hydrosolubles (6,06 %), en accord avec la composition typique des algues rouges riches en phycobiliprotéines et carraghénanes (Wells et al., 2017; Campo et al., 2009). L'analyse des pigments a confirmé la présence de chlorophylle a et de phycoérythrine, avec une activité antioxydante des extraits éthanoliques modérée ( $IC_{50} \approx 1200-1300$  ppm).

Ces profils biochimiques complémentaires confirment leur intérêt pour diverses applications industrielles dans les secteurs pharmaceutique, nutraceutique et cosmétique. La présence de phéopigments dans les deux espèces souligne l'adaptation des algues aux conditions environnementales locales et leur résilience face aux stress, tout en soulevant des questions sur la stabilité des biomolécules et l'optimisation des conditions de récolte et de traitement.

### **5.3. Analyse Critique : Freins et Obstacles**

L'approche moléculaire a révélé des obstacles majeurs liés à la présence d'inhibiteurs PCR endogènes (polysaccharides sulfatés, polyphénols, sels) et à l'absence de bases de données génétiques locales. L'exploration du potentiel biochimique présente également ses limites : les méthodes d'extraction conventionnelles et les dosages colorimétriques utilisés, bien que robustes pour un criblage préliminaire, ne permettent pas une caractérisation structurale fine ni une quantification précise de chaque biomolécule. Des analyses complémentaires (RMN, GC-MS, HPLC) sont indispensables mais représentent un obstacle financier et logistique pour les laboratoires en Algérie. De plus, l'évaluation de l'activité antioxydante par le test DPPH ne représente qu'une facette du potentiel bioactif, laissant d'autres activités biologiques inexplorées.

Cette étude a mis en lumière la nécessité d'une approche méthodologique rigoureuse et adaptative pour surmonter ces obstacles et optimiser la valorisation des ressources algales du littoral algérien.

# CONCLUSION

---

## CONCLUSION

---

Ce travail de fin d'études a entrepris une exploration approfondie des macroalgues du littoral algérien, une ressource marine d'une richesse écologique et d'un potentiel biotechnologique considérables, mais encore largement sous-étudiée. L'objectif principal était de caractériser génétiquement et d'identifier ces espèces, ainsi que d'explorer leur potentiel biochimique en vue d'une valorisation durable et d'une contribution à la biotechnologie bleue. Les résultats obtenus, bien que préliminaires, répondent de manière significative à la question scientifique posée en amont.

L'étude a démontré la faisabilité et l'importance de l'identification génétique pour surmonter les limites de la taxonomie morphologique traditionnelle, notamment face à la plasticité phénotypique et aux espèces cryptiques. L'optimisation des protocoles d'extraction d'ADN et l'amplification réussie du gène 18S ARNr pour plusieurs espèces ont permis une identification moléculaire précise grâce au séquençage et la phylogénie, confirmant l'identité de *Dictyota linearis*, *Ulva compressa* et *Caulerpa racemosa*. Cette démarche a posé les premières pierres d'une base de données génétiques locale, essentielle pour la traçabilité, la conservation et la bioprospection ciblée des ressources algales algériennes. Les défis rencontrés, tels que la présence d'inhibiteurs et la nécessité d'une optimisation continue des protocoles, soulignent la complexité inhérente à l'étude de ces matrices biologiques, mais n'invalident pas l'approche, au contraire, ils en précisent les exigences.

Parallèlement, la caractérisation biochimique de *Dictyota dichotoma* et *Sphaerococcus coronopifolius* a révélé des profils métaboliques distincts et complémentaires, confirmant leur intérêt biotechnologique. *D. dichotoma*, algue brune, s'est avérée riche en lipides et polyphénols, démontrant une activité antioxydante supérieure, attribuable notamment aux phlorotannins. *S. coronopifolius*, algue rouge, a montré une richesse notable en protéines et polysaccharides, en accord avec la présence de phycobiliprotéines et de carraghénanes. Ces découvertes ouvrent des perspectives concrètes pour le développement d'ingrédients fonctionnels dans les secteurs pharmaceutique, nutraceutique et cosmétique. La détection de phéopigments dans les deux espèces, bien que signe de dégradation, peut également être interprétée comme un indicateur de l'adaptation des algues aux stress environnementaux locaux, offrant des pistes pour l'étude de leur résilience.

Cependant, cette étude constitue une étape préliminaire. Pour une valorisation optimale, des analyses complémentaires sont nécessaires. Sur le plan génétique, l'utilisation de marqueurs moléculaires additionnels (ex: ITS, Tufa, rbcL) sont cruciales pour une identification plus fine et la résolution des ambiguïtés. Sur le plan biochimique, une caractérisation structurale approfondie des biomolécules par technologies de pointe, ainsi que l'évaluation d'autres activités biologiques, permettraient de cibler précisément la valorisation.

En répondant à la question initiale, ce travail a non seulement contribué à une meilleure connaissance de la biodiversité algale algérienne et de son potentiel, mais il a également mis en lumière les défis méthodologiques et les freins structurels à une valorisation à grande échelle. Il s'agit d'une étape fondamentale qui valide l'approche combinée et constitue une étape fondamentale vers des initiatives de valorisation durable, s'inscrivant pleinement dans la dynamique de l'économie bleue. La richesse inexplorée du littoral algérien en macroalgues représente une opportunité stratégique pour le développement économique et la conservation de la biodiversité marine, transformant cette ressource naturelle en un levier d'innovation scientifique tout en assurant sa conservation pour les générations futures.

### Perspectives de recherche

Pour maximiser le potentiel des macroalgues du littoral algérien et lever les freins identifiés dans cette étude, plusieurs perspectives de recherche et recommandations stratégiques peuvent être formulées :

#### Identification Génétique Avancée

- Marqueurs moléculaires complémentaires : Compléter le séquençage 18S ARNr par de marqueurs plus spécifiques (ITS, rbcL, COI...) pour résoudre les ambiguïtés taxonomiques
- Créer une base collaborative avec GenBank/BOLD pour la traçabilité et l'authentification
- Optimiser les protocoles et améliorer les méthodes pour surmonter les inhibiteurs et la dégradation

#### Caractérisation Biochimique Ciblée

- Utiliser des techniques analytiques de pointe (RMN, LC-MS, GC-MS...) pour identifier les molécules bioactives spécifiques.
- Diversification des activités biologiques : Tester les propriétés anti-inflammatoires, antivirales, anticancéreuses
- Optimisation saisonnière : Étudier l'impact des facteurs environnementaux sur la composition biochimique

#### Recommandations Stratégiques

- **Réglementation spécifique** : Définir quotas, zones de récolte, normes qualité/sécurité.
- **Structuration de la Filière** : Créer un consortium recherche-industrie-pouvoirs publics, développer des mécanismes fiscaux et fonds R&D dédiés et faciliter l'accès aux technologies d'extraction et d'analyse.
- **Développement des Compétences** : Informer décideurs et investisseurs sur le potentiel économique, créer des programmes en phycologie, biotechnologie marine et algoculture.

#### Axes Prioritaires

1. **Court terme** : Optimisation des protocoles d'extraction et caractérisation biochimique ainsi que l'établissement de bases de données de référence locales
2. **Moyen terme** : Développement de l'algoculture locale et structuration réglementaire
3. **Long terme** : Industrialisation et positionnement sur les marchés internationaux

## REFERENCES

## REFERENCES

---

## REFERENCES

- **AFNOR. (1985).** *Recueil de normes françaises et communautaires, aliments des animaux* (2ème édition). Association Française de Normalisation.
- **Ale, M. T., Mikkelsen, L., & Meyer, A. S. (2011).** Important Determinants for Fucoidan Bioactivity: A Critical Review of Structure-Function Relations and Extraction Methods for Fucose-Containing Sulfated Polysaccharides from Brown Seaweeds. *Marine Drugs*, 9(10), 2106–2122. <https://doi.org/10.3390/md9102106>
- **Anteur, A. C., Bahbah, L., Bensari, B., & Seridi, H. (2024).** Evaluation of the ecological quality of the macroalgal communities along the Algerian coast (Algeria, Mediterranean Sea). *Regional Studies in Marine Science*, 78, 103767. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103767>
- **Aouissi, M. (2018).** *Valorisation de la biomasse algale du littoral algérien : Potentialités et perspectives* [Thèse de Doctorat, Université de Annaba].
- **Araújo, R., Vázquez Calderón, F., Sánchez López, J., Azevedo, I. C., & Peteiro, C. (2021).** Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*, 7, 626389. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.626389>
- **Arezi, B., Xing, W., Sorge, J. A., & Hogrefe, H. H. (2003).** Amplification efficiency of thermostable DNA polymerases. *Analytical Biochemistry*, 321(2), p.p. 226–235. [https://doi.org/10.1016/S0003-2697\(03\)00470-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2697(03)00470-X)
- **Assis, J., et al. (2025).** Global intraspecific diversity of marine forests of brown macroalgae. *Nature Communications*, 16, 1234. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-08023-w>

## B

- **Belin, S., & Mauger, S. (s.d.).** Génomique des algues. *LIENSS - Littoral Environnement et Sociétés*. [en ligne]. [consulté le 3 juin 2025]. Disponible sur le web : <https://lienss.univ-larochelle.fr/Genomique-des-algues>
- **Bensouna, K., & Belhadj, M. (2024).** *Contribution à l'étude hydrobiologique et écologique des macroalgues benthiques de la côte ouest algérienne (Cas de la plage de Sidi Yechkour, Ghazaouet)* (Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen). [en ligne]. [consulté le 5 avril 2025]. Disponible sur le web : [http://dspace.univtlemcen.dz/bitstream/112/23085/1/bensouna\\_khadidja\\_hydr obiologie.pdf](http://dspace.univtlemcen.dz/bitstream/112/23085/1/bensouna_khadidja_hydr obiologie.pdf)
- **Benyahia, M., et al. (2019).** *Inventaire des algues sur le littoral de Béni-Saf (Wilaya d'Ain Témouchent)* (Mémoire de Master, Université de Tlemcen). [en ligne]. [consulté le 13 mai 2025]. Disponible sur le web : <https://dspace.univ-temouchent.edu.dz/bitstream/123456789/5400/1/m%C3%A9moire%20final2.pdf>

## REFERENCES

---

- **Bermudez, M., et al. (2024).** Laminaria digitata Supplementation as a Climate-Smart Strategy to Mitigate Marine Heatwave Impacts on Aquaculture. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7), 226. <https://doi.org/10.3390/jmse12070226>
- **Béthoux, J. P., & Gentili, B. (1999).** Functioning of the Mediterranean Sea: past and present changes related to freshwater input and climate changes. *Journal of Marine Systems*, 20(1-4), p.p. 131–149.
- **Biber-Klemm, S., Martinez, S. I., & Wynberg, R. (2017).** Accès et partage des avantages : mise en œuvre du Protocole de Nagoya en droit comparé. In *Biodiversité et savoirs traditionnels*. IRD Éditions. p.p. 143–164.
- **Boudouresque, C. F., Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., de Grissac, A. J., & Pergent, G. (2006).** *Anthropogenic impacts on Mediterranean seagrasses: a review*. Proceedings of the Second International Workshop on Seagrasses in the Mediterranean and Black Seas. [en ligne]. [consulté le 10 mai 2025]. Disponible sur le web : [https://www.mio.osupytheas.fr/~boudouresque/Publications\\_pdf/Boudouresque\\_et\\_al\\_2006\\_Anthropogenic\\_impacts.pdf](https://www.mio.osupytheas.fr/~boudouresque/Publications_pdf/Boudouresque_et_al_2006_Anthropogenic_impacts.pdf)
- **Bourgougnon, N., Gervois, A., & Jégou, C. (2021).** *Les algues marines, Biologie, écologie et utilisation*. Ellipses.
- **Burel, T., Le Duff, M., & Schaal, G. (2020).** *Algues de Roscoff*. Editions Quae.
- **Burel, T., Le Duff, M., & Le Gal, A. (2020).** Small-scale effects of hydrodynamics on the structure of intertidal macroalgal communities: A novel approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 233, 106526. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106526>
- **Burlot, A. S. (2016).** *Valorisation des métabolites d'algues proliférantes par voie enzymatique* (Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale).

## C

- **Cabioc'h, J., Floc'h, J.-Y., Le Toquin, A., Boudouresque, C.-F., Meinesz, A., & Guiry, M. D. (2006).** *Guide des algues des mers d'Europe*. Delachaux et Niestlé.
- **Campo, V. L., Kawano, D. F., da Silva, D. B., & Carvalho, I. (2009).** Carrageenans: Biological properties, chemical modifications and structural analysis – A review. *Carbohydrate Polymers*, 77(2), p.p.167–180. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.01.020>
- **Cardoso, J. C., et al. (2021).** Bioactive Compounds of Marine Algae and Their Potential Health Benefits. *Marine Drugs*, 19(12), 699. <https://doi.org/10.3390/md19120699>

## D

## REFERENCES

---

- **Demeke, T., & Jenkins, G. R. (2010).** Influence of DNA extraction methods, PCR inhibitors and quantification methods on real-time PCR assay of biotechnology-derived traits. *Journal of AOAC International*, 93(4), p.p.1133–1141.
- **Dobrinčić, A., Balbino, S., Zorić, Z., Pedisić, S., & Vujić, L. (2020).** Advanced Technologies for the Extraction of Marine Brown Algal Polysaccharides. *Marine Drugs*, 18(3), 168. <https://doi.org/10.3390/md18030168>
- **DORIS. (2025).** *Données d'Observations pour la Reconnaissance et l'Identification de la faune et la flore Subaquatiques*. [en ligne]. [consulté le 10 avril 2025]. Disponible sur le web : <https://doris.ffesmm.fr/>
- **Doyle, J. J., & Doyle, J. L. (1987).** A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical Bulletin*, 19, p.p.11–15.

## E

- **Ewing, B., & Green, P. (1998).** Base-calling of automated sequencer traces using phred. II. Error probabilities. *Genome Research*, 8(3), 186–194. <https://doi.org/10.1101/gr.8.3.186>
- **Expertise France. (2024).** *Appui au développement des biotechnologies bleues en Algérie*.
- **Expertise France. (2024).** *France unveils roadmap to boost seaweed and algae industry*. We Are Aquaculture. [en ligne]. [consulté le 10 juin 2025]. Disponible sur le web : <https://weareaquaculture.com/species/seaweed/france-unveils-roadmap-to-boost-seaweed-and-algae-industry>

## F

- **Faller, H. (2011).** *Les applications et la toxicité des algues marines* [Mémoire de - doctorat, Université de Limoges].
- **Falkowski, P. G., & Raven, J. A. (2007).** *Aquatic photosynthesis* (2nd ed.). Princeton University Press.
- **FAO. (2020).** *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020*. Rome, FAO.
- **FAO. (2020).** *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2020. La durabilité en action*. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229fr>
- **Fernandes, A. C., et al. (2014).** Peripheral antinociception and anti-inflammatory effects of sulphated polysaccharides from the green marine alga *Caulerpa mexicana* (Cm-SPs) in nociceptive and inflammatory models. *Journal of Ethnopharmacology*, 153(1), p.p. 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.02.010>

## REFERENCES

---

- **Fischer, W., Scheider, M., & Bauchot, M. L. (1987).** *Fiches FAO d'identification des espèces pour les besoins de la pêche. Méditerranée et mer Noire. Zone de pêche 37. Révision 1. Végétaux et invertébrés.* FAO.
- **Fleurence, J. (1999).** Seaweed proteins: biochemical, nutritional aspects and potential uses. *Trends in Food Science & Technology*, 10(1), 25–28. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(99\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(99)00015-1)
- **Fournière, M. (2021).** *Extraction et évaluation des propriétés biologiques des ulvanes et carraghénanes extraits d'algues marines* [Thèse de Doctorat, Université de Nantes].

## G

- **Gager, L. (2019).** *Composés phénoliques d'algues brunes bretonnes : de la ressource algale à leur extraction éco-responsable et caractérisation chimique jusqu'à leur formulation en cosmétique* [Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale].
- **Ganesan, A. R., Shanmugam, M., & Sivaraman, G. (2020).** Recent trends in freeze-drying of food and biological materials – a review. *Food Reviews International*, 36(8), p.p. 816–838. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1655602>
- **Gattuso, J.-P., & Hansson, L. (Eds.). (2010).** *Ocean acidification.* Oxford University Press.
- **Glasel, J. A. (1995).** Validity of nucleic acid purities monitored by 260nm/280nm absorbance ratios. *Biotechniques*, 18(1), p.p. 62–63.
- **Global Market Insights. (2023).** *Seaweed Market Size, Share & Trends Analysis Report.*
- **Global Market Insights. (2023).** *Algae Protein Market Size & Share, Industry Analysis p.p.2024-2032.* [en ligne]. [consulté le 1 mai 2025]. Disponible sur le web : <https://www.gminsights.com/industry-analysis/algae-protein-market>
- **Goodwin, S., McPherson, J. D., & McCombie, W. R. (2016).** Coming of age: ten years of next-generation sequencing technologies. *Nature Reviews Genetics*, 17(6), p.p.333–351. <https://doi.org/10.1038/nrg.2016.49>
- **Grimes, S. (Ed.). (2004).** *Biodiversité marine et littorale algérienne.* Sonatrach; Diwan.
- **Grimes, S., et al. (2018).** Biodiversity changes along the Algerian coast (Southwest Mediterranean basin) from 1834 to 2017: First assessment of introduced species. *Mediterranean Marine Science*, 19(1), p.p.156-179. [en ligne]. [consulté le 10 juin 2025]. Disponible sur le web : <https://ejournals.epublishing.ekt.gr/index.php/hcmr-med-mar-sc/article/view/13824>
- **Guiry, M. D., & Guiry, G. M. (2025).** *AlgaeBase.* World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. [en ligne]. [consulté le 1 juin 2025]. Disponible sur le web : <https://www.algaebase.org>

## REFERENCES

---

- **Guschina, I. A., & Harwood, J. L. (2006).** Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research*, 45(2), p.p.160–186. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2006.01.001>

### H

- **Hajibabaei, M., Singer, G. A., Hebert, P. D., & Hickey, D. A. (2007).** DNA barcoding: how it complements taxonomy, molecular phylogenetics and population genetics. *Trends in Genetics*, 23(4), p.p. 167-172. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2007.02.001>
- **Hebert, P. D. N., et al. (2023).** The devil is in the details: Problems in DNA barcoding practices. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1149839. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1149839>
- **Herrero, M., Cifuentes, A., & Ibáñez, E. (2010).** Supercritical fluid extraction of bioactive compounds from marine algae: A review. *Journal of Supercritical Fluids*, 55(1), p.p. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.07.009>
- **Holdt, S. L., & Kraan, S. (2011).** Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*, 23(3), p.p. 543-597. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5>
- **Hong, Y., & Kim, S.-K. (2021).** Algae: Study of Edible and Biologically Active Fractions, Their Health Benefits, and Potential Applications. *Marine Drugs*, 19(11), 605. <https://doi.org/10.3390/md19110605>

### I

- **IDEALG. (2017).** *Rapport final du projet ANR-10-BTBR-04 IDEALG*. [en ligne]. [consulté le 10 mars 2025]. Disponible sur le web : [https://idealgalgae.com/wp-content/uploads/2017/09/IDEALG\\_rapport-final-web.pdf](https://idealgalgae.com/wp-content/uploads/2017/09/IDEALG_rapport-final-web.pdf)

### J

- **Jueterbock, A., et al. (2021).** Priming of Marine Macrophytes for Enhanced Restoration Success and Food Security in Future Oceans. *Frontiers in Marine Science*, 8, 658485. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.658485>

### K

- **Kalasariya, H. S., Patel, A. K., Suthar, R. J., & Pereira, L. (2023).** Exploring the Skin Cosmetic Benefits of Phenolic Compounds and Pigments from Marine Macroalgae: A Novel Green Approach for Sustainable Beauty Solutions. *Preprints*.
- **Kowalska, K., Rybak, A., Skrzypczyk, A., & Herman-Antosiewicz, A. (2019).** DNA Barcoding for Identification of Green Macroalgae from the Gulf

## REFERENCES

---

- of Gdansk (Southern Baltic Sea). *Oceanologia*, 61(4), p.p. 518-527.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.04.002>
- **Krause-Jensen, D., & Duarte, C. M. (2016).** Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, 9(10), p.p. 737–742.  
<https://doi.org/10.1038/ngeo2790>
  - **Kumar, V., et al. (2018).** An Interplay between Marine Algae and Potentially Toxic Elements: A Review. *Marine Drugs*, 16(2), 65.  
<https://doi.org/10.3390/md16020065>
  - **Kumari, P., Kumar, M., Gupta, V., Reddy, C. R. K., & Jha, B. (2013).** Tropical marine macroalgae as potential sources of nutritionally important PUFAs. *Food Chemistry*, 139(1-4), p.p. 44–56.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.074>

## L

- **Lafarga, T., Acién-Fernández, F. G., & Garcia-Vaquero, M. (2020).** Bioactive peptides and carbohydrates from seaweed for food applications: Natural occurrence, isolation, purification, and identification. *Trends in Food Science & Technology*, 100, p.p. 1–12.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.007>
- **Lagourgue, L. (2015).** *Caractérisation morphologique et moléculaire d'espèces de macroalgues rouges et brunes d'intérêt économique des côtes bretonnes* [Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale]. [en ligne]. [consulté le 2 juin 2025]. Disponible sur le web : <https://theses.hal.science/tel-01248641>
- **Lahaye, M., & Robic, A. (2007).** Structure and functional properties of ulvan, a polysaccharide from green seaweeds. *Biomacromolecules*, 8(6), p.p. 1765–1774. <https://doi.org/10.1021/bm061185q>
- **Lauret, M., Ribera Siguan, M. A., & Gómez Garreta, A. (2011).** *Clé d'identification des algues marines benthiques de Méditerranée*. CIESM Publisher.
- **Lauret, M., Oheix, J., Derolez, V., & Laugier, T. (2011).** *Guide de reconnaissance et de suivi des macrophytes des lagunes du Languedoc-Roussillon*. Ifremer.
- **Laurienzo, P. (2010).** Marine polysaccharides in pharmaceutical applications: an overview. *Marine Drugs*, 8(9), p.p. 2435–2465.  
<https://doi.org/10.3390/md8092435>
- **Le Gall, L., & Saunders, G. W. (2007).** A nuclear phylogeny of the Florideophyceae (Rhodophyta) inferred from combined EF2, small subunit and large subunit ribosomal DNA: establishing the new red algal subclass Corallinophycidae. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 43(3), p.p. 1105–1118. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2006.11.022>

## REFERENCES

- **-Le Gall, L., Rousseau, F., De Reviers, B., Silberfeld, T., & Payri, C. (2022).** *Algues*. Belin.
- **Li, Y., Wijesekara, I., Li, Y., & Kim, S.-K. (2011).** Phlorotannins as bioactive agents from brown algae. *Process Biochemistry*, 46(12), p.p. 2219–2224. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.09.006>
- **Lin, S., Zhang, H., & Cai, L. (2014).** Characterization of the 18S rRNA gene for designing universal eukaryotic primers. *PLoS ONE*, 9(2), e87624. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087624>
- **Lomartire, S., Marques, J. C., & Gonçalves, A. M. M. (2021).** An overview of the potential of seaweeds from sustainable cultivation for prebiotic and antioxidant compounds. *Antioxidants*, 10(3), 366. <https://doi.org/10.3390/antiox10030366>

## M

- **Mannino, A. M., et al. (2021).** Tracking Marine Alien Macroalgae in the Mediterranean Sea: The Contribution of Citizen Science and Remote Sensing. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 288. <https://doi.org/10.3390/jmse9030288>
- **Mansouri, A., & Kerfouf, A. (2025).** Biodiversity of marine macroalgae in Oran coast (Algerian west coast – Mediterranean Sea). *Aquatic Research*, 7(1), p.p. 16–26.
- **Mansouri, A., Baaloudj, A., Toumi, F., Bouzidi, M. A., & Kerfouf, A. (2021).** Checklist of Benthic Marine Macroalgae in Western Algeria. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(3), p.p. 269-275. [en ligne]. [consulté le 11 avril 2025]. Disponible sur le web : <https://www.ujecology.com/articles/checklist-of-benthic-marine-macroalgae-in-western-algeria-77910.html>
- **Mardis, E. R. (2008).** Next-Generation DNA Sequencing Methods. *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, 9, p.p. 387–402. <https://doi.org/10.1146/annurev.genom.9.081307.164359>
- **Martins, A., et al. (2023).** Global estimates of the extent and production of macroalgal forests. *Global Ecology and Biogeography*, 32(1), p.p. 1–15. <https://doi.org/10.1111/geb.13515>
- **Milledge, J. J., Smith, B., Dyer, P. W., & Harvey, P. (2014).** Macroalgae-Derived Biofuel: A Review of Methods of Energy Extraction from Seaweed Biomass. *Energies*, 7(11), p.p. 7194–7222. <https://doi.org/10.3390/en7117194>
- **Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables & INCT. (2023).** Mise à jour de la longueur du littoral algérien à 2 148 km par analyse satellitaire. *APS*. [en ligne]. [consulté le 16 juin 2025]. Disponible sur le web : <https://www.aps.dz/sante-science-technologie/157493-une-nouvelle-etude-porte-la-longueur-du-littoral-algerien-a-2-148-km>
- **Mishra, S., Singh, N., & Jha, B. (2015).** Analytical techniques for bioactives from seaweed. In B. Jha, S. S. Sharma, & S. C. Singh (Eds.), *Bioactive*

## REFERENCES

---

*Compounds from Marine Organisms: Applications in Food, Pharmaceutical and Cosmetic Industries*. Academic Press. p.p. 207–226.

- **Muséum National d'Histoire Naturelle. (2025).** *Activités et recherches sur la biodiversité marine*. [en ligne]. [consulté le 16 mai 2025]. Disponible sur le web : <https://www.mnhn.fr/>

### N

- **Nagahawatta, D. P., Ryu, B., & Jeon, Y.-J. (2024).** Marine Polyphenols in Cardiovascular Health: Unraveling Structure, Bioactivity, and Therapeutic Potential. *Marine Drugs*, 22(4), 152. <https://doi.org/10.3390/md22040152>
- **Necas, J., & Bartosikova, L. (2013).** Carrageenan: a review. *Veterinarni Medicina*, 58(4), p.p. 187–205.
- **Not, F., del Campo, J., Balagué, V., De Vargas, C., & Massana, R. (2009).** New Insights into the Diversity of Marine Picoeukaryotes. *PLoS ONE*, 4(9), e7143. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007143>

### O

- **Opel, T., et al. (2010).** A simple method of genomic DNA extraction suitable for analysis of bulk fungal strains. *Letters in Applied Microbiology*, 51(1), p.p. 114–118. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2010.02863.x>

### P

- **Pangestuti, R., & Kim, S.-K. (2021).** An Overview to the Health Benefits of Seaweeds Consumption. *Marine Drugs*, 19(6), 349. <https://doi.org/10.3390/md19060349>
- **-Payri, C. E., N'Yeurt, A. D. R., & Orempuller, J. (2000).** *Algues de Polynésie Française / algae of French Polynesia*. Au Vent des Îles.
- **Peng, J., Yuan, J. P., Wu, C. F., & Wang, J. H. (2011).** Fucoxanthin, a marine carotenoid present in brown seaweeds and diatoms: metabolism and bioactivities relevant to human health. *Marine Drugs*, 9(10), p.p. 1806–1828. <https://doi.org/10.3390/md9101806>
- **-Pereira, L. (2009).** *Guia Ilustrado das Macroalgas—Conhecer e Reconhecer Algumas Espécies da Flora Portuguesa*. Coimbra University Press.
- **Pereira, L. (2021).** *Macroalgae*. ResearchGate. [en ligne]. [consulté le 10 juin 2025]. Disponible sur le web : [https://www.researchgate.net/publication/349098777\\_Macroalgae](https://www.researchgate.net/publication/349098777_Macroalgae)
- **Pereira, L., & Valado, A. (2023).** Harnessing the power of seaweed: unveiling the potential of marine algae in drug discovery. *Exploration of Drug Science*, 1, p.p. 475–475.

## REFERENCES

---

- **Perret-Boudouresque, M., & Seridi, H. (1989).** *Inventaire des algues marines benthiques d'Algérie*. GIS Posidonie.
- **Pimentel, F. B., Alves, R. C., Rodrigues, F., & Oliveira, M. B. P. P. (2018).** Macroalgae-Derived Ingredients for Cosmetic Industry—An Update. *Cosmetics*, 5(1), 2.
- **Plan Bleu. (2020).** *Rapport sur l'état de l'Environnement et du Développement en Méditerranée*. [en ligne]. [consulté le 09 juin 2025]. Disponible sur le web : <https://planbleu.org/wp-content/uploads/2021/04/RED-2020-Rapport-complet.pdf>

## R

- **Radmer, R. J., & Parker, B. C. (1994).** Commercial applications of algae: opportunities and constraints. *Journal of Applied Phycology*, 6(2), 98.
- **Riani, L., et al. (2021).** Applying Seaweed Compounds in Cosmetics, Cosmeceuticals and Cosmeceuticals. *Marine Drugs*, 19(11), 620.
- **Rioux, L.-E., Beaulieu, L., & Turgeon, S. L. (2017).** Seaweeds: A traditional ingredients for new gastronomic sensation. *Food Hydrocolloids*, 68, p.p. 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.030>
- **Rojas-Herrera, R., Aguilar, C., Reynaud, E., & Cuzin, C. (2019).** Protocols for high-quality DNA extraction from marine macroalgae suitable for next-generation sequencing. *Journal of Applied Phycology*, 31(2), p.p. 1097–1108. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1653-4>
- **Rojas-Herrera, R., et al. (2019).** Chemical and microstructural characterization of three seaweed species from two locations of Veracruz, Mexico. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 39(4), p.p. 967–973. [en ligne]. [consulté le 16 avril 2025]. Disponible sur le web : <https://www.scielo.br/j/cta/a/CLL84RZ3PxNmwsPVnW4JJ6b/>
- **Ruocco, N., Costantini, S., Guariniello, S., & Costantini, M. (2016).** Polysaccharides from the Marine Environment with Pharmacological, Cosmeceutical and Pharmacological Applications. *Molecules*, 21(5), 551. <https://doi.org/10.3390/molecules21050551>

## S

- **Salhi, A. (2017).** *La législation algérienne en matière de protection de l'environnement marin*.
- **Salhi, G. (2017).** *Diversité et valorisation des macroalgues benthiques de la côte méditerranéenne marocaine* [Thèse de Doctorat, Université Abdelmalek Essaâdi].
- **Sambrook, J., & Russell, D. W. (2001).** *Molecular cloning: A laboratory manual* (3rd ed.). Cold Spring Harbor Laboratory Press.

## REFERENCES

---

- **Sanger, F., Nicklen, S., & Coulson, A. R. (1977).** DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74(12), p.p. 5463–5467. <https://doi.org/10.1073/pnas.74.12.5463>
- **Saunders, G. W. (2005).** Applying DNA barcoding to red macroalgae: a preliminary appraisal holds promise for future applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1462), p.p. 1879–1888. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1719>
- **Saunders, G. W., & Kucera, H. (2010).** An evaluation of rbcL, tufA, UPA, LSU and ITS as DNA barcode markers for the marine green macroalgae. *Cryptogamie, Algologie*, 31(4), p.p. 487-528.
- **Saunders, G. W., & McDevit, D. C. (2012).** Methods for DNA barcoding photosynthetic protists emphasizing the macroalgae and diatoms. In *DNA Barcodes: Methods and Protocols*. Humana Press. p.p. 207-224
- **Schmid, M., Guihéneuf, F., & Stengel, D. B. (2014).** Fatty acid contents and profiles of 16 macroalgae collected from the Irish Coast at two seasons. *Journal of Applied Phycology*, 26(1), p.p. 375–387. <https://doi.org/>
- **Schrader, C., Schielke, A., Ellerbroek, L., & Johne, R.(2012).** PCR inhibitors – occurrence, properties and removal. *Journal of Applied Microbiology*, 113(5), p.p. 1014–1026. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05384.x>

### T

- **Teagle, D. A. H., Ildefonse, B., Blum, P., & the Expedition 335 Scientists. (2017).** Deep drilling of intact ocean crust: harnessing past lessons to inform future endeavors. In *Proceedings of the International Ocean Discovery Program, Expedition 335*. International Ocean Discovery Program. [en ligne]. [consulté le 3 juin 2025]. Disponible sur le web : <http://publications.iodp.org/proceedings/335/335bib.htm->
- **Thibaut, T., Blanfuné, A., Boudouresque, C. F., & Verlaque, M. (2023).** Non-Indigenous Species of Macroalgae in French Mediterranean Marine Protected Areas: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), 374. <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/2/374>
- **Thomas, N. V., & Kim, S. K.(2013).** Beneficial Effects of Marine Algal Compounds in Cosmeceuticals. *Marine Drugs*, 11(1), p.p. 146–164. <https://doi.org/10.3390/md11010146>

### U

- **Usov, A. I. (2011).** Polysaccharides of the red algae. In D. Horton (Ed.), *Advances in carbohydrate chemistry and biochemistry*. Vol. 65. Elsevier. p.p. 115-217

### V

## REFERENCES

---

- **Verlaque, M., Ruitton, S., & Boudouresque, C. F. (2015).** Introduced marine macrophytes in the Mediterranean Sea: a historical overview. *Botanica Marina*, 58(5), p.p. 379–398. <https://doi.org/10.1515/bot-2015-0026>

### W

- **Wang, B., Liu, Y., & Tang, X. (2018).** Macroalgal blooms caused by marine nutrient changes resulting from human activities. *Journal of Environmental Management*, 217, p.p. 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.076>
- **Wells, M. L., Potin, P., & Raven, J. A. (2017).** Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding. *Journal of Applied Phycology*, 29(2), p.p. 949–961. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0974-5>
- **Wilfinger, W. W., Mackey, K., & Chomczynski, P. (1997).** Effect of pH and ionic strength on the spectrophotometric assessment of nucleic acid purity. *Biotechniques*, 22(3), p.p. 474–481.
- **Wilson, K. (1997).** Preparation of genomic DNA from bacteria. In F. M. Ausubel, R. Brent, R. E. Kingston, D. D. Moore, J. G. Seidman, J. A. Smith, & K. Struhl (Eds.), *Current protocols in molecular biology* . John Wiley & Sons. (Vol. 1, pp. 2.4.1–2.4.5).

### Z

- **Zehlila, A. (2017).** Caractérisation structurale et fonctionnelle des métabolites de l'algue verte *Ulva rigida* au moyen d'une approche protéomique (Thèse de Doctorat, Université de Blida 1).

## ANNEXES

## ANNEXES

---

## Annexe 1 : Poster scientifique



## Genetic Mapping and Bioactive Potential of Macroalgae from the Algerian Coastline



Guidoum Ibtissem<sup>1</sup>, Boukharouba Aya<sup>1,2</sup>, Grimes Samir<sup>1,2</sup>, Brakna Chaima<sup>3</sup>, Bouzidi Soheir<sup>3</sup>, Bendida Keltoum<sup>3</sup>, Merzoug Mohamed<sup>3</sup>

1. National School of Marine Sciences and Coastal Management (ENSSMAL)  
2. Laboratory for the Conservation and Valorization of Marine Resources (LCVRM), ENSSMAL, Algiers, Algeria  
3. Genomics Technology Platform, Higher School of Biological Sciences of Oran, Oran, Algeria

### Abstract

This pioneering study explores the biotechnological potential of Algerian macroalgae through a dual approach: genetic identification and biochemical valorization. Seven species, sampled from Algiers and Ain Témouchent, underwent morphological and molecular analyses. DNA was successfully extracted and PCR products obtained, pending sequencing and bioinformatic analysis. Two species (*Dictyota* sp. and *Sphaerococcus* sp.) were selected for biochemical profiling with antioxidant assays in progress. Limited access to protocols and data bases with time constraints were major challenges, but this work lays the foundations for genetic mapping and sustainable exploitation of Algerian marine macroalgae.

### Introduction

Marine macroalgae are increasingly recognized as renewable sources of bioactive compounds with applications in health, cosmetics, and food industries (Holdt & Kraan, 2011). Globally, research has focused on their biochemical and genetic potential, yet in Algeria, these resources remain largely untapped (Mouradi-Givernaud et al., 2014). This study addresses two major gaps: the absence of a genetic reference for Algerian macroalgae and the lack of systematic biochemical valorization. The objectives are (i) to genetically map native macroalgae using molecular tools and (ii) to assess their biotechnological potential through extraction and characterization of key biomolecules. As the first integrated initiative in Algeria, this work responds to global sustainability goals (FAO, 2020) and local priorities for marine resource management.

### Results

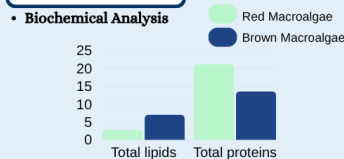


Figure 1: Total Lipid and Protein Content in Red and Brown Macroalgae

| Parameter             | <i>Sphaerococcus</i> sp. | <i>Dictyota</i> sp. |
|-----------------------|--------------------------|---------------------|
| Total polysaccharides | 0.0058 g/g               | 0.0046 g/g          |
| Total polyphenols     | 0.0283 g/g               | 0.0456 g/g          |

Table 1: Quantification of Polysaccharides and Polyphenols in Algal Biomass (g/g dry weight)

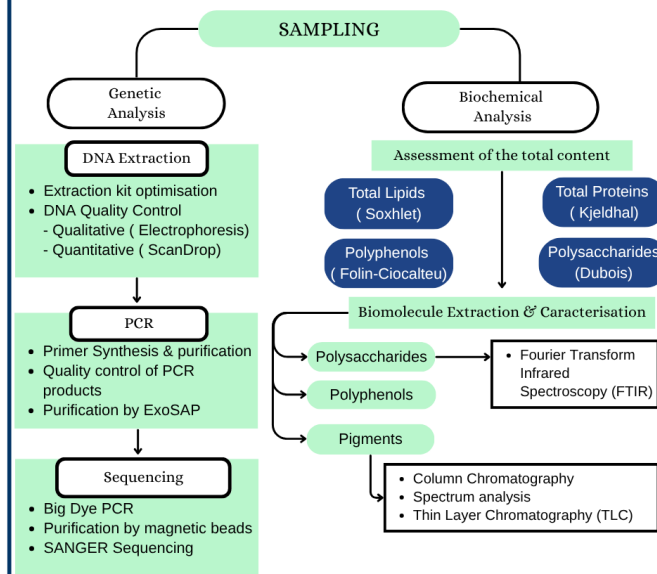
### Genetic Analysis

| DNA Sample ID | DNA Purity* | dsDNA Concentration (ng/μl) |
|---------------|-------------|-----------------------------|
| CRP           | 1.7         | 26.33                       |
| S             | 1.94        | 19.1                        |
| ENT           | 1.8         | 21.83                       |
| M             | 1.92        | 304.1                       |
| V             | 1.8         | 178.9                       |
| B             | 1.3         | 45.3                        |
| E             | 2.27        | 57.2                        |
| G             | 1.4         | 20.28                       |
| D             | 1.5         | 34.09                       |

Table 2: Quantification and Purity of Genomic DNA extracted from the sampled species.

*Sphaerococcus* sp. showed high levels of proteins and polysaccharides, while *Dictyota* sp. was richer in lipids and polyphenols, suggesting promising antioxidant potential to be confirmed through bioassays. On the genetic level, successful DNA extraction was achieved for all samples, with clear PCR products for 5 species, paving the way for molecular identification and the development of a local genetic reference database.

### Methodology



### Conclusion

By integrating biochemical profiling and molecular tools, this pioneering study provides new insights into the biotechnological potential of Algerian macroalgae. Our results confirm the presence of bioactive compounds in selected species and validate the feasibility of genetic identification, despite challenges such as time-consuming protocol optimization, limited access to standardized methods, and technical constraints. Further research should expand into detailed bioassays and complete genomic characterization to strengthen Algeria's capacity for marine biodiversity and database development."

### References

Scan the QR Code





*Cette attestation est dévriée à*

*A participé à la conférence intitulée « Interactions anthropiques avec la mer et le littoral : Perspectives scientifiques et stratégiques » CLAMEL 2025 » qui a eu lieu à l'ENSSMAL le 28 mai 2025 par une communication écrite intitulée :*

«Genetic Mapping and Bioactive Potential of Macroalgae from the Algerian Coastline»,

Co-auteurs: BOUKHAROUBA Aya, GRIMES Samir, BRACENA Chaima, BOUZIDI Soheir, BENDIDA Keloum

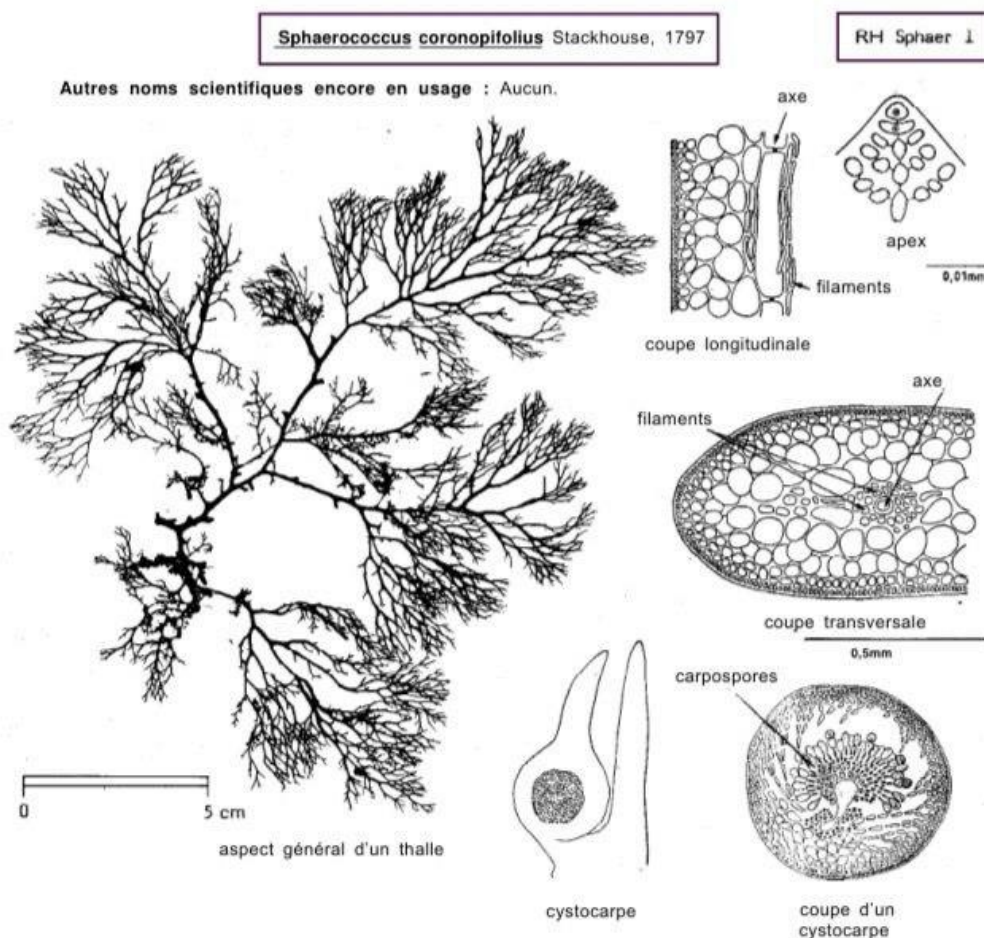
Alger, le 28 mai 2025



Directrice de l'ENSSMAL,

الاستاذة: ليلى بن حاجة  
المؤسسة

Annexe 2 : Clés d'identification des algues *Sphaerococcus coronopifolius* et *Dictyota dichotoma* (Fischer, 1987)



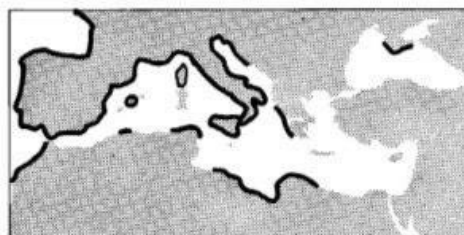
Noms vernaculaires : FAO: An - False gorgon; Es - Tallo chino; Fr - Fausse gorgone. Nationaux:

**Caractères distinctifs :** **Morphologie** - thalle rouge vif, cartilagineux, très ramifié; les axes principaux sont aplatis, ramifiés de façon pseudodichotome à irrégulière; les rameaux de dernier ordre portent de petits ramules épineux. **Structure** - uniaxiale; en coupe transversale, l'axe central est entouré d'hyphes réfringentes abondantes engendrées par les cellules péricentrales peu discernables. **Croissance** - apicale. **Cytologie** - type néoplastidié. **Reproduction** - cycle trigénétique avec gamétophyte et tétrasporophyte isomorphes. Les tétrasporocystes (zonés) sont disséminés dans le cortex du thalle; les cystocarpes, très proéminents, sont portés par de petites proliférations marginales des ramules.

**Taille** : Commune de 20 à 25 cm.

**Habitat et écologie** : Colonise les substrats durs des étages infra- et circalittoral. Profondeur de 1 à 60 m.

**Récolte et utilisation** : Récoltée à la main; utilisation potentielle médicale si on se réfère à son exploitation en Chine.

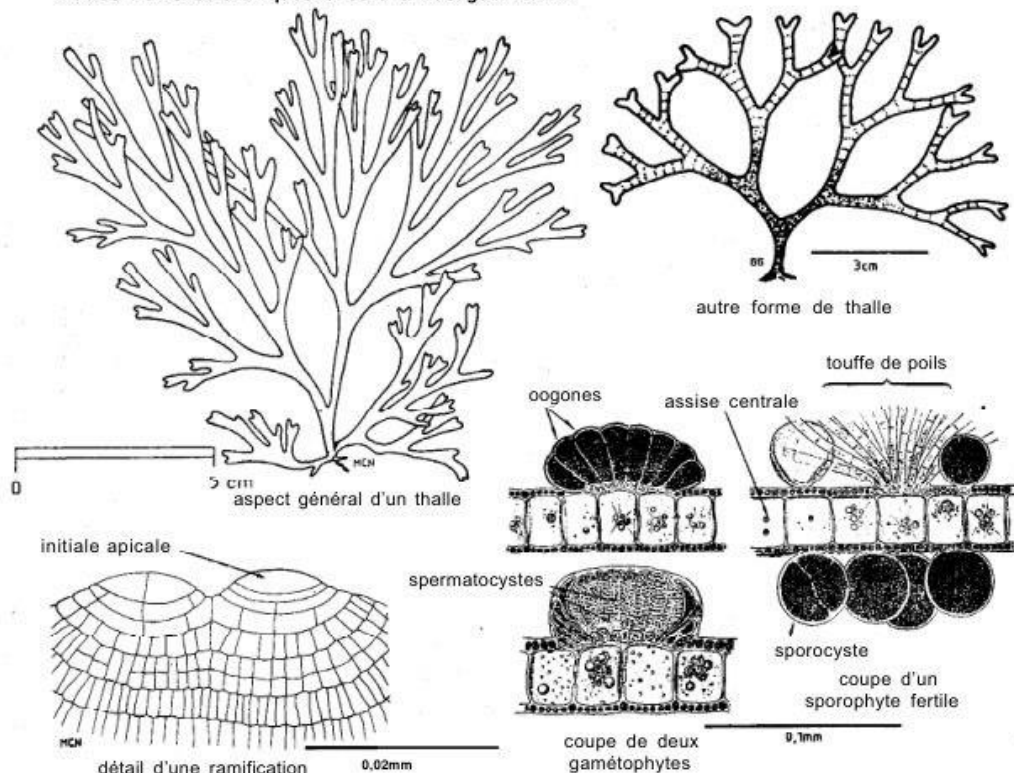


Egalement en Atlantique

**Dictyota dichotoma** (Hudson) Lamouroux, 1809

PH Dictyot 1

Autres noms scientifiques encore en usage : Aucun.



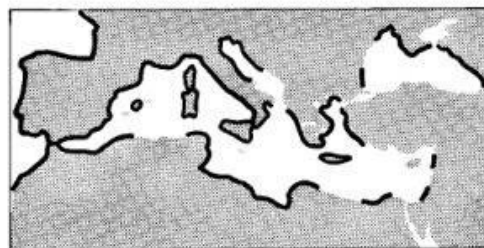
**Noms vernaculaires :** FAO: **An** - Forked ribbons; **Es** - Abanico amarillo; **Fr** - Rubanier céruléen.  
Nationaux:

**Caractères distinctifs :** **Morphologie** - thalle en forme de ruban de couleur brune avec les extrémités plus claires, régulièrement ramifié par dichotomie, dans un plan; fixé au substrat par un disque formé de rhizoïdes. **Structure** - uniaxiale et polystique. En coupe transversale, présence d'une seule assise de cellules internes volumineuses et incolores avec, de chaque côté, une assise de petites cellules corticales superficielles renfermant de nombreux plastes. **Croissance** - terminale par une seule cellule initiale se ramifiant de façon dichotome. **Cytologie** - type néoplastidié avec de nombreux plastes discoïdes sans pyrénoïde; présence abondante de physodes. **Reproduction** - cycle digénétique isomorphe. Les organes reproducteurs (gamétocystes et sporocystes) naissent des cellules corticales.

**Taille :** Commune de 5 à 15 cm.

**Habitat et écologie :** Espèce colonisant les substrats durs des étages infra- et circalittoral.

**Récolte et utilisation :** Récoltée à la main. Utilisation potentielle en alimentation humaine (si on se réfère aux pratiques asiatiques), comme source de phycocolloïdes et en médecine (en raison des actions antibiotiques démontrées).



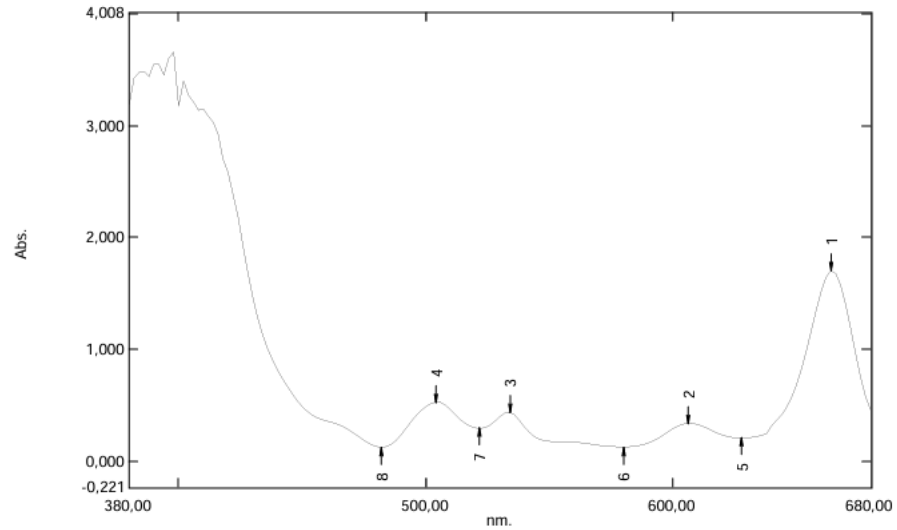
Espèce cosmopolite

**Note** Les espèces de Dictyota sont souvent confondues avec celles de Dilophus

## ANNEXES

### Annexe 3 : Résultats du balayage de spectre UV-vis des extraits chlorophylliens de *Dictyota dichotoma* (AB) et *Sphaerococcus coronopifolius* (AR)

Data Set: BRUTE100\_121350 - Manipulated

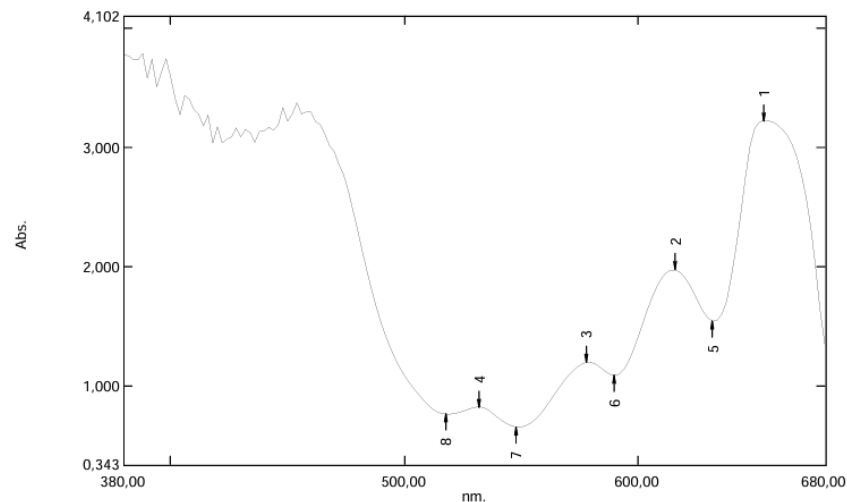


Measurement Properties  
Wavelength Range (nm.): 380,0 to 680,0  
Scan Speed: Fast  
Sampling Interval: 2,0

Instrument Properties  
Instrument Type: UV-1800 Series  
Measuring Mode: Absorbance  
Slit Width: 1,0

| No. | P/V | Wavelength | Abs.  | Description |
|-----|-----|------------|-------|-------------|
| 1   | ●   | 664,00     | 1,705 |             |
| 2   | ●   | 606,00     | 0,346 |             |
| 3   | ●   | 534,00     | 0,445 |             |
| 4   | ●   | 504,00     | 0,535 |             |
| 5   | ●   | 628,00     | 0,214 |             |
| 6   | ●   | 580,00     | 0,134 |             |
| 7   | ●   | 522,00     | 0,300 |             |
| 8   | ●   | 482,00     | 0,131 |             |

Data Set: ARBRUTE\_170948 - Manipulated



Measurement Properties  
Wavelength Range (nm.): 380,0 to 680,0  
Scan Speed: Fast  
Sampling Interval: 2,0

Instrument Properties  
Instrument Type: UV-1800 Series  
Measuring Mode: Absorbance  
Slit Width: 1,0

| No. | P/V | Wavelength | Abs.  | Description |
|-----|-----|------------|-------|-------------|
| 1   | ●   | 654,00     | 3,228 |             |
| 2   | ●   | 616,00     | 1,973 |             |
| 3   | ●   | 578,00     | 1,198 |             |
| 4   | ●   | 532,00     | 0,825 |             |
| 5   | ●   | 632,00     | 1,543 |             |
| 6   | ●   | 590,00     | 1,088 |             |
| 7   | ●   | 548,00     | 0,656 |             |
| 8   | ●   | 518,00     | 0,763 |             |

## **Annexe 4 : Laboratoire BioGenius**

Laboratoire d'analyses génétiques et biochimiques

### **1. Introduction**

BioGenius est un laboratoire privé d'analyses génétiques et biochimiques appliquées à la biodiversité marine et terrestre. Il répond à une forte demande en traçabilité, conformité réglementaire (APA, non-OGM) et valorisation scientifique des ressources biologiques.

### **2. Présentation du projet & valeur ajoutée**

- **Nom** : BioGenius – SARL (Société à responsabilité limitée)
- **Domaine** : Biotechnologies environnementales
- **Valeur ajoutée** : analyses fiables, expertise en génétique marine, accompagnement R&D, conformité au Protocole de Nagoya
- **Lieu d'implantation** : Zone industrielle de Oued Smar (Alger)  
Avantages : proximité académique et industrielle, accès facile aux partenaires et au marché national.

### **3. Objectifs du projet**

- Devenir un référent national en analyses génétiques liées à la biodiversité
- Proposer des services spécialisés et accessibles
- Soutenir la recherche et l'innovation dans la bioéconomie algérienne

### **4. Activités clés & services offerts**

- Extraction ADN/ARN
- PCR classique
- Dosages biochimiques (pigments, protéines...)
- Pré-traitement et conservation des échantillons
- Séquençage
- Chromatographie et spectroscopie
- Rédaction de rapports techniques certifiés
- Formations

## 5. Analyse stratégique du marché

| Élément                  | Détail                                                                   |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>Segments visés</b>    | Universités, centres R&D, ONG, fermes aquacoles, agro-industries         |
| <b>Canaux</b>            | Réseautage pro, site web, réseaux sociaux, conférences                   |
| <b>Relations clients</b> | Contrats annuels, packs personnalisés, formations, conseil réglementaire |

## 6. Plan d'organisation

### Réalisation des services

- Zones séparées (prétraitement, extraction, biochimie, stockage)
- Gestion par logiciel LIMS
- Traçabilité assurée dès la réception des échantillons

### Besoins humains

- 1 technicien supérieur en génie génétique
- 1 agent d'entretien
- 3 fondatrices ( Directrices administrative, commerciale, technique)

### Partenariats

- Universités, fournisseurs labos, sous-traitants (séquençage, chromatographie)

## 7. Plan de financement

| Source           | %           |
|------------------|-------------|
| Apport personnel | 5%          |
| NESDA            | 25%         |
| Banque           | 70%         |
| <b>Total</b>     | <b>100%</b> |

## 8. Résultats financiers

| Indicateur                 | Valeur estimée      |
|----------------------------|---------------------|
| CA Année 1                 | 101 000 000 DA      |
| Charges totales            | 4 219 000 DA        |
| Résultat net               | 96 781 000 DA       |
| VAN (12%)                  | +228 551 632 DA     |
| Délai de récupération (DR) | 0,04 an (≈15 jours) |

## 9. Analyse du marché

### Clients (Segments de clientèle)

- Instituts de recherche et universités : laboratoires universitaires, centres de recherche publics et privés (ENSSMAL, CNRDPA, LEM, ESSBO, CRSP, IPA), chercheurs indépendants.
- Entreprises des secteurs agroalimentaire et pharmaceutique.
- Entreprises agricoles et aquacoles.
- Organismes de conservation et de gestion de l'environnement.

### Proposition de valeur

- Positionnement unique : Premier laboratoire privé en Algérie entièrement dédié à l'analyse génétique et biochimique de la biodiversité marine, en dehors du secteur médical.
- Spécialisation rare en dehors du domaine de la santé humaine.
- Services destinés non seulement à la recherche académique mais aussi à l'industrie et aux besoins appliqués.
- Réponse à des problématiques concrètes pour les entreprises, les chercheurs, les pêcheurs et les agriculteurs.

### Canaux de distribution

- Service direct au laboratoire, plateforme de commande en ligne, téléphone et email dédiés, réseaux sociaux professionnels, campagnes publicitaires ciblées, participation à des salons professionnels et conférences scientifiques.

### **Relations avec les clients**

- Contrats de service personnalisés, cartes d'abonnement et forfaits d'analyses, support technique et scientifique réactif, ateliers et formations spécialisées, communication ciblée avec contenu informatif de valeur et présence active lors d'événements professionnels.

### **Partenaires clés**

- NESDA, banques.
- Fournisseurs (Labomaster, Numidia, Distrilabo Algérie, Thermo Fisher, Qiagen, Eppendorf, Illumina).
- Ministères (MSPRH, MPPH, MESRS), institutions de recherche (ENSSMAL, CNRDPA, CRSP), établissements d'enseignement et organismes de normalisation.

## **10. Conclusion**

Le projet BioGenius présente une rentabilité immédiate, un modèle clair et structuré, et une forte utilité scientifique et environnementale. Il s'inscrit parfaitement dans les axes stratégiques de soutien à la bioéconomie et à la valorisation de la biodiversité en Algérie.

## ANNEXES

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p><b>Principaux partenaires</b></p> <p><b>Financiers :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Partenaires financiers (Apport propre)</li> <li>* NESDA</li> <li>* Banques</li> </ul> <p><b>Fournisseurs :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* D'équipements de Laboratoire</li> <li>* De réactifs</li> <li>* Locaux : (Labomaster, Numidia, Distrilabo Algérie</li> <li>* Importés : (Thermo Fisher Scientific, Qiagen, Eppendorf, Illumina).</li> <li>* Fournisseurs de Services Essentiels (Transport des échantillons)</li> </ul> <p><b>Réglementaires :</b></p> <p>MSPRH, MPPH, ENSSMAL, CNRDPA, CDE, LEM, MESRS, ESSBO, CRSP</p> |  <p><b>Activités principales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Réalisation d'analyses biochimiques avancées</li> <li>* Réalisation d'analyses génétiques spécialisées</li> </ul> |  <p><b>Valeur ajoutée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Expertise spécialisée en biodiversité : Premier laboratoire privé en Algérie entièrement dédié à l'analyse génétique et biochimique de la biodiversité marine, en dehors du secteur médical.</li> <li>* Services ciblés pour l'industrie et la recherche appliquée : Contrairement aux laboratoires étatiques qui effectuent ces analyses principalement à des fins de recherche académique.</li> </ul> | <p><b>Relations clients</b></p> <p>Contrats de Service Personnalisés<br/>Cartes d'Abonnement / Forfaits d'Analyses<br/>Participation Active aux Foires et Salons Professionnels<br/>Support Technique et Scientifique Proactif<br/>Ateliers et Formations Spécialisées<br/>Communication Ciblée et Contenu de Valeur</p> |  <p><b>Segments de clientèle</b></p> <p>Instituts de Recherche et Universités, centres de recherche publics et privés et chercheurs individuels.<br/>Entreprises des Secteurs Agroalimentaire et Pharmaceutique<br/>Entreprises Agricoles et Aquacoles<br/>Organismes de Conservation et de Gestion de l'Environnement</p> | <p><b>Les canaux</b></p> <p>Service Direct<br/>Plateforme de Commande en Ligne<br/>Téléphone et E-mail dédiés<br/>Réseaux Sociaux Professionnels<br/>Campagnes Publicitaires Ciblées<br/>Participation à des Salons Professionnels et Conférences Scientifiques</p> | <p><b>Revenus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Services offerts</li> <li>- Formations payantes</li> </ul> <p><b>101 000 000 DA</b></p> | <p><b>Coûts</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coûts de matériel et produits</li> <li>- Salaires des employés</li> <li>- Autres charges de fonctionnement</li> </ul> <p><b>8 119 000 DA</b></p> | <p><b>Revenus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Services offerts</li> <li>- Formations payantes</li> </ul> <p><b>101 000 000 DA</b></p> | <p><b>Coûts</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coûts de matériel et produits</li> <li>- Salaires des employés</li> <li>- Autres charges de fonctionnement</li> </ul> <p><b>8 119 000 DA</b></p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## Annexe 5 : GLOSSAIRE

### A

- **Acide Gras Polyinsaturé (AGPI)** : Type de lipide (graisse) contenant plusieurs doubles liaisons carbone-carbone. Essentiels pour la santé, ils incluent les oméga-3 et oméga-6, et sont recherchés pour leurs bienfaits cardiovasculaires et neuronaux.
- **Alginate** : Polysaccharide structural principal des algues brunes, utilisé dans l'industrie comme agent gélifiant, épaississant et stabilisant (E401).
- **Amorce (Primer)** : Courte séquence d'ADN simple brin utilisée comme point de départ pour la synthèse d'un nouveau brin d'ADN par l'ADN polymérase lors d'une PCR.
- **Amplicon** : Fragment d'ADN spécifique qui a été amplifié (copié en grand nombre) par la technique de PCR.
- **Analyse Phylogénétique** : Étude des relations de parenté évolutive entre différentes espèces ou populations, souvent représentée sous la forme d'un "arbre phylogénétique".
- **Antioxydant** : Molécule capable de neutraliser les radicaux libres, des composés instables qui peuvent endommager les cellules. Les antioxydants aident à prévenir le stress oxydatif.

### B

- **Barcoding ADN (Code-barres ADN)** : Technique d'identification des espèces basée sur le séquençage d'une courte région standardisée de leur ADN (le "code-barres").
- **Bioéconomie bleue** : Économie basée sur l'utilisation durable des ressources biologiques marines (algues, micro-organismes, etc.) pour développer de nouveaux produits et services.
- **Biomasse** : Matière organique totale d'origine végétale ou animale. Dans ce contexte, il s'agit de la masse totale des algues récoltées.
- **BLAST (Basic Local Alignment Search Tool)** : Outil bioinformatique qui compare une séquence d'ADN ou de protéine à une immense base de données (GenBank) pour trouver des séquences similaires et ainsi identifier une espèce.

### C

- **Caractérisation** : Démarche scientifique qui consiste à identifier, décrire et quantifier les propriétés spécifiques d'un échantillon. Dans le contexte de ce mémoire, elle se divise en :
  - **Caractérisation génétique** : Identification de l'espèce par l'analyse de son ADN (séquençage, phylogénie).
  - **Caractérisation biochimique** : Détermination de la composition chimique (teneur en lipides, protéines, etc.) et de la structure des molécules (par FTIR, par exemple).
- **Carraghénane** : Polysaccharide sulfaté extrait des algues rouges, largement utilisé dans l'industrie alimentaire comme gélifiant et épaississant (E407).
- **Chromatographie sur colonne** : Technique de laboratoire utilisée pour séparer les différents composants d'un mélange (comme les pigments) en les faisant passer à travers une colonne remplie d'une phase stationnaire (gel de silice).
- **Code-barres ADN** : Voir Barcoding ADN.
- **Cryptique (espèce)** : Espèce qui est morphologiquement identique à une autre mais qui est génétiquement distincte. L'identification par ADN est nécessaire pour les différencier.

### D

## ANNEXES

- **DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle)** : Radical libre stable de couleur violette. Il est utilisé en laboratoire pour mesurer l'activité antioxydante d'un extrait : plus l'extrait décolore le DPPH, plus son pouvoir antioxydant est élevé.
- E
- **Électrophorèse sur gel d'agarose** : Technique de laboratoire qui permet de séparer des fragments d'ADN en fonction de leur taille en les faisant migrer à travers un gel sous l'effet d'un champ électrique.
  - **Épiphyte** : Organisme (souvent une autre algue ou un petit animal) qui vit fixé sur une autre plante (ici, une macroalgue) sans la parasiter.
- F
- **Folin-Ciocalteu** (réactif de) : Réactif chimique utilisé pour mesurer la quantité totale de composés phénoliques (polyphénols) dans un extrait.
  - **FTIR** (Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier) : Technique d'analyse qui identifie les groupes fonctionnels chimiques d'une molécule en mesurant l'absorption de la lumière infrarouge. Elle agit comme une "empreinte digitale" chimique.
  - **Fucoïdane** : Polysaccharide sulfaté complexe trouvé principalement dans les algues brunes, étudié pour ses nombreuses activités biologiques (antivirale, antitumorale, anticoagulante).
  - **Fucoxanthine** : Pigment caroténoïde de couleur brune, caractéristique des algues brunes, qui joue un rôle dans la photosynthèse et possède de fortes propriétés antioxydantes.
- G
- **Gène marqueur** : Gène spécifique (comme l'ARNr 18S ou le cox1) dont la séquence est utilisée pour l'identification des espèces ou pour les études phylogénétiques en raison de son bon équilibre entre régions conservées et régions variables.
- I
- **IC50** (Concentration Inhibitrice médiane) : Mesure de l'efficacité d'une substance. C'est la concentration nécessaire pour inhiber 50 % d'un processus biologique ou d'une réaction chimique (par exemple, la concentration d'extrait nécessaire pour neutraliser 50 % des radicaux DPPH).
- K
- **Kjeldahl (méthode de)** : Procédure chimique standard pour déterminer la quantité d'azote dans un échantillon, ce qui permet ensuite de calculer sa teneur en protéines brutes.
- L
- **Lyophilisation** : Procédé de déshydratation à basse température sous vide (séchage par le froid) qui permet de conserver l'intégrité des molécules sensibles à la chaleur.
- M
- **Macroalgue** : Algue pluricellulaire visible à l'œil nu, par opposition aux microalgues qui sont unicellulaires et microscopiques.
  - **Métabolite secondaire** : Composé organique produit par un organisme qui n'est pas directement impliqué dans sa croissance ou sa reproduction, mais qui joue souvent un rôle dans ses mécanismes de défense ou d'adaptation (ex: polyphénols, terpènes).
- P
- **PCR (Polymerase Chain Reaction)** : Technique de biologie moléculaire permettant de copier en très grand nombre (amplifier) un segment spécifique d'ADN à partir d'une très faible quantité initiale.
  - **Phlorotannin** : Type de polyphénol que l'on ne trouve que chez les algues brunes. Ils sont connus pour être de très puissants antioxydants.

## ANNEXES

- **Phycobiliprotéine** : Pigment protéique hydrosoluble (soluble dans l'eau) présent chez les algues rouges et les cyanobactéries, qui capte la lumière pour la photosynthèse. La phycoérythrine (rouge) et la phycocyanine (bleue) en sont des exemples.
- **Plasticité phénotypique** : Capacité d'un organisme à changer son apparence (sa morphologie, sa physiologie) en réponse aux variations de son environnement.
- **Polysaccharide** : Glucide complexe (longue chaîne de sucres) qui joue un rôle structural (paroi cellulaire) ou de réserve énergétique. Les alginates, carraghénanes et fucoïdanes en sont des exemples.

### S

- **Séquençage Sanger** : Méthode classique de détermination de l'ordre exact des nucléotides (A, T, C, G) dans un fragment d'ADN.
- **Soxhlet (extracteur de)** : Appareil de verrerie de laboratoire utilisé pour l'extraction en continu d'un composé à partir d'un solide par un solvant chaud. Il est très efficace pour extraire les lipides.
- **Spectrophotométrie UV-Visible** : Technique d'analyse qui mesure la quantité de lumière absorbée par un échantillon à différentes longueurs d'onde dans le spectre ultraviolet et visible. Elle est utilisée pour identifier et quantifier des composés comme les pigments.

### T

- **Taxonomie** : Science de la classification des êtres vivants en catégories hiérarchiques (règne, embranchement, classe, ordre, famille, genre, espèce).
- **Thalle** : Appareil végétatif simple des algues, qui n'est pas différencié en racines, tiges et feuilles comme chez les plantes supérieures.

## Résumé

Cette présente étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation biotechnologique des macroalgues marines, ressources encore peu exploitées en Algérie malgré leur potentiel bioactif important. Le travail a porté sur plusieurs espèces collectées sur les côtes de Ain Benian et de Rachgoun, avec un double objectif : leur identification taxonomique (morphologique et génétique) et l'évaluation de leur composition biochimique en biomolécules d'intérêt (lipides, protéines, polysaccharides, polyphénols, pigments). L'identification s'est appuyée sur des observations microscopiques et le séquençage du gène 18S rRNA, avec analyses bioinformatiques et phylogénétiques. Parallèlement, les extractions biochimiques ont permis de quantifier les principaux métabolites primaires et secondaires, et d'évaluer l'activité antioxydante des extraits par le test DPPH pour deux algues principales *Dictyota dichotoma* et *Sphaerococcus coronopifolius*. Les résultats montrent des profils biochimiques variables selon les espèces renforçant leur intérêt pour des applications multiples.

## Abstract

This thesis explores the biotechnological potential of marine macroalgae, a largely untapped resource in Algeria despite their richness in bioactive compounds. The study focused on several species collected from the Alger and Rachgoun coasts, with two main objectives: taxonomic identification (morphological and genetic) and biochemical characterization of key biomolecules (lipids, proteins, polysaccharides, polyphenols, pigments). Identification was carried out using microscopic observation and Sanger sequencing of the 18S rRNA gene, followed by bioinformatics analysis (BLAST, ChromasPro, MEGA12). Biochemical extractions were performed to quantify both primary and secondary metabolites, and antioxidant activity was assessed using the DPPH radical scavenging assay. The results revealed significant interspecies variation in biochemical profiles and antioxidant capacity, underlining their potential for pharmaceutical or cosmetic use. This work emphasizes the importance of multidisciplinary approaches to enhance the understanding and sustainable exploitation of local marine biodiversity.

**Keywords:** marine macroalgae, taxonomic identification, 18S rRNA sequencing, biochemical extraction, antioxidant activity, Algeria.

## الملخص

تندرج هذه الدراسة في إطار تثمين الطحالب البحرية الكبيرة من الناحية البيوتكنولوجية، وهي موارد لا تزال غير مستغلة بشكل كافٍ في الجزائر، رغم ما تملكه من إمكانيات بيولوجية نشطة هامة. انصبَّ العمل على عدة أنواع جُمعت من سواحل عين البنيان ورشقون، بهدف مزدوج يتمثل في تحديدها التصنيفي (مورفولوجي وجزيئي)، وتقييم تركيبها الكيميائي الحيوي من حيث الجزيئات ذات الأهمية مثل الدهون، البروتينات، متعددات السكاريد، البوليفينولات والأصبغ. مع إجراء تحاليل rRNA تم الاعتماد في التعريف على الملاحظات المجهرية، بالإضافة إلى تسلسل الجين 18S، مع معلومات حيوية وفيلوجينية. وبالتوازي، أُنجزت عمليات استخلاص كيميائي حيوي مكنت من تحديد كمية الأيضات، مع التركيز على نوعين DPPH الأولية والثانوية، كما تم تقييم النشاط المضاد للأكسدة للمستخلصات باستخدام اختبار *Dictyota dichotoma* و *Sphaerococcus coronopifolius* رئيسيين هما. أظهرت النتائج اختلافات واضحة في التركيب الكيميائي الحيوي حسب النوع، مما يعزز أهميتها في تطبيقات متعددة.

## الكلمات المفتاحية

. التوصيف الكيميائي الحيوي، النشاط المضاد للأكسدة، الجزائر rRNA S الطحالب البحرية الكبيرة، التسلسل الجيني 18S