

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département de science de la nature et de la vie



**Projet de Fin d'Etudes**  
Pour l'obtention du diplôme de Master en Science Biologique

**Domaine :** Sciences de la Nature et de la Vie  
**Filière :** Sciences Biologiques  
**Spécialité :** Biochimie

### Thème

**Contribution à l'extraction d'alginate à partir des algues brunes marines**

#### Présenté Par :

- 1)BOUMEDINE Sarra
- 2) BOUGUENINA MarwaHadile

#### Devant le jury composé de :

|                         |     |   |               |
|-------------------------|-----|---|---------------|
| Dr. BENNABI Farid       | MCA | UAT.B.B (Ain Temouchent)  | Président     |
| Dr. BENHABIB Ouassila   | MCB | UAT.B.B (Ain Temouchent)  | Examinatrice  |
| Mr. LARBI DOUKARA kamel | MCA | UAT.B.B (Ain Temouchent)  | Encadrant     |
| Dr. ABDELJEBAR Hasna    | MCA | CRAPC (Centre de recherche scientifique et technique en analyses physico-chimiques) | Co-promotrice |

**Année Universitaire:2024/2025**

# Remerciement

Ce modeste mémoire est l'aboutissement d'un travail de recherche rigoureux. Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Dieu, le Tout-Puissant, pour nous avoir guidés et pour nous avoir accordé la force, la patience, la santé et la volonté nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous exprimons notre reconnaissance la plus sincère à notre encadrant, **Dr. LARBI DOUKARA Kamel**, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité constante, ses orientations scientifiques pertinentes et son écoute bienveillante tout au long de cette étude. Son implication, sa patience et sa pédagogie ont été d'un grand soutien pour surmonter les difficultés rencontrées. Ses conseils méthodologiques et sa rigueur académique ont largement contribué à la qualité et à l'aboutissement de ce mémoire.

Nous remercions également notre co-encadrante, **Dr. ABDEL DJEBAR Hasna**, pour son implication précieuse, son suivi attentif, ses conseils constructifs et ses remarques enrichissantes. Sa disponibilité, son soutien moral et scientifique, ainsi que sa capacité à motiver et à nous guider avec bienveillance, ont été essentiels à chaque étape de ce travail. Son accompagnement a grandement facilité l'avancement de cette recherche.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent également aux membres du jury, **Dr. BENNABI Farid**, président du jury, et **Dr. BENHABIB Ouassila**, pour avoir accepté d'évaluer notre travail. Nous leur sommes reconnaissants pour leurs remarques et observations pertinentes, qui ne manqueront pas d'enrichir notre réflexion. Nous remercions également **Dr. BENHABIB Ouassila** pour sa générosité et sa grande patience tout au long du premier semestre, qui nous ont permis de bien assimiler les démarches nécessaires à une rédaction rigoureuse du mémoire.

Nous remercions aussi chaleureusement **toute l'équipe du laboratoire** pour leur aide, leur soutien et leurs encouragements, qui nous ont permis d'effectuer nos travaux dans de bonnes conditions.

Enfin, nous saisissons cette occasion pour adresser nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

# Dédicace

Louange à Allah, le Tout-Puissant, pour Ses innombrables bienfaits, pour nous avoir accordé la force, la patience et la réussite tout au long de ce parcours.

**À mes très chers parents, BOUMEDINE Ahmed et BENDAHMENE Hayet**

Pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices silencieux, votre sagesse, vos prières et votre soutien constant, qui ont été les fondations de mon parcours et de mes réussites. Que Dieu vous protège, vous accorde santé, sérénité et longue vie.

**À ma grand-mère bien-aimée,**

Dont la présence précieuse me touche profondément. Qu'Allah prolonge sa vie, lui accorde santé et bien-être, et m'honore de ses prières et bénédictions.

**À ma sœur Fatima, ainsi qu'à mes frères Akrem et Amine,**

Pour leur affection, leurs encouragements et leur confiance, qui m'ont apporté force et réconfort à chaque étape.

**À toute ma famille Boumedine et Bendahmane,**

Merci pour votre amour, votre soutien moral et votre motivation constante. Vous êtes une source de fierté et d'inspiration.

**À mon encadrant, Dr. LARBI DOUKARA Kamel,**

Avec toute ma reconnaissance pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité, ses conseils précieux et sa bienveillance tout au long de cette recherche.

**À Mme ABDELJEBAR Hasna,**

Je vous adresse mes remerciements les plus sincères pour votre implication, vos conseils constructifs, votre disponibilité et votre soutien généreux.

**À mes chers amis,**

À ceux avec qui j'ai partagé des moments de joie, de doute, de fatigue et de persévérance. Merci pour votre présence sincère, vos encouragements et votre amitié précieuse.

**BOUMEDINE Sarra**

## **Dédicace**

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, Le Tout-Puissant, pour m'avoir guidée, soutenue et accordé la force et la patience tout au long de mon parcours.

Je dédie ce modeste travail à ceux qui occupent la première place dans mon cœur :

**À mes très chers parents, Bouguenina Benameur et Benyoucef Souad,**  
ma source de vie, de force et d'amour inconditionnel,  
pour leurs sacrifices, leur bienveillance, leurs prières et leur soutien indéfectible.  
Aucun mot ne saurait exprimer la reconnaissance que je vous porte. Ce travail est l'aboutissement de tous vos efforts pour m'assurer un avenir meilleur.  
Qu'Allah vous protège, vous accorde la santé, le bonheur et une longue vie.  
**À mes sœurs bien-aimées, Arine et Safa,** ainsi qu'à **mon frère Mouhamed,**  
Merci pour votre présence, vos encouragements, vos mots rassurants et votre amour fraternel.

**À toute ma famille,**  
Pour votre soutien affectueux et vos encouragements constants.

**À mon encadrant Dr. LARBI DOUKARA Kamel**  
Je vous remercie sincèrement pour votre disponibilité, vos conseils précieux et votre accompagnement bienveillant tout au long de ce travail.

Mes sincères remerciements s'adressent également à **Dr. ABDELJEBAR Hasna,** pour sa précieuse collaboration, ses encouragements et ses remarques constructives qui ont enrichi ce mémoire. Merci pour votre gentillesse et votre professionnalisme.

**Enfin, à mes amies,**  
Celles avec qui j'ai partagé des moments inoubliables, les joies comme les difficultés. Merci d'avoir été là, toujours.

**BOUGUENINA MarwaHadile**

## Table des matières

|   |            |
|---|------------|
| <b>Liste des figures</b>                                      | <b>IV</b>  |
| <b>Liste des tableaux</b>                                     | <b>V</b>   |
| <b>Liste des abréviations</b>                                 | <b>VI</b>  |
| <b>Résumé</b>   | <b>VII</b> |
| <b>Introduction.....</b>                                      | <b>1</b>   |
| <b>CHAPITRE I : La partie bibliographique</b>                 |            |
| <b>La 1<sup>ère</sup> partie : Généralités sur les algues</b> |            |
| 1. Définition.....  | 4          |
| 2. Morphologie des algues.....                                | 4          |
| 3. Classification des algues.....                             | 4          |
| 3.1. Microalgues.....   | 4          |
| 3.2. Macroalgues.....   | 5          |
| 3.2.1. Rhodophycées (algues rouges).....                      | 5          |
| 3.2.2. Cyanobactéries (algues bleues).....                    | 6          |
| 3.2.3. Phéophycées (algues brunes).....                       | 6          |
| 3.2.4. Chlorophycées (algues vertes).....                     | 7          |
| 4. Modalités de reproduction des algues.....                  | 7          |
| 5. Facteurs influençant la répartition des algues.....        | 7          |
| 5.1. Lumière.....   | 7          |
| 5.2. Température.....   | 8          |
| 5.3. Substrat.....  | 8          |
| 5.4. Salinité.....  | 8          |
| 6. Mode de nutrition.....                                     | 8          |
| 7. Composition biochimique des algues.....                    | 8          |
| 7.1. Protéines.....   | 8          |
| 7.2. Lipides.....   | 9          |
| 7.3. Vitamines.....   | 9          |
| 7.4. Minéraux.....  | 9          |
| 7.5. Polysaccharides.....                                     | 9          |
| 7.6. Fibres.....  | 10         |
| 7.7. Caroténoïdes.....  | 10         |
| 7.8. Polyphénols.....   | 10         |
| 8. Production mondiale des algues.....                        | 11         |
| 9. Applications industrielles des algues.....                 | 12         |
| 9.1. Applications médicales et pharmaceutiques.....           | 12         |
| 9.2. Applications en cosmétique.....                          | 12         |
| 9.3. Applications agricoles.....                              | 13         |
| 9.4. Applications environnementales.....                      | 13         |
| 9.5. Applications agroalimentaires.....                       | 13         |

## 2<sup>ème</sup> partie : Les alginates à partir des algues brunes

|   |    |
|---|----|
| 1. Caractéristiques des algues brunes.....                    | 14 |
| 1.1. Caractéristiques cytologiques et biochimiques.....       | 14 |
| 1.2. Physiologie.....   | 14 |
| 2. Présentation de l'espèce <i>Rugulopteryxokamurae</i> ..... | 15 |
| 2.1. Classification.....                                      | 15 |
| 2.2. Structure morphologique.....                             | 16 |
| 2.3. Répartition géographique.....                            | 17 |
| 2.4. Composition biochimique.....                             | 18 |
| 3. Alginate .....   | 18 |
| 3.1. Historique.....  | 18 |
| 3.2. Définition.....  | 19 |
| 3.3. Origine des alginates.....                               | 19 |
| 4. Composition chimique de l'alginate.....                    | 19 |
| 5. Propriétés des alginates.....                              | 20 |
| 5.1. Propriétés chimiques.....                                | 20 |
| 5.1.1. Masse molaire moyenne.....                             | 20 |
| 5.1.2. Rapport M/G.....                                       | 21 |
| 5.2. Propriétés physiques.....                                | 21 |
| 5.2.1. Solubilité et viscosité.....                           | 21 |
| 5.2.2. Stabilité.....   | 21 |
| 5.2.3. Gélification.....                                      | 21 |
| 5.3. Propriétés biologiques.....                              | 22 |
| 5.3.1. Biocompatibilité.....                                  | 22 |
| 5.3.2. Capacité d'absorption.....                             | 22 |
| 6. Applications industrielles des alginates.....              | 22 |

## CHAPITRE 2 :Matériel et Méthodes

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 1. Objectif de l'étude.....           | 25 |
| 2. Matériel utilisé.....              | 25 |
| 2.1. Matériel végétal.....            | 25 |
| 2.1.1. Choix de l'algue.....          | 25 |
| 2.1.2. Récolte.....                   | 25 |
| 2.2. Produits chimiques utilisés..... | 26 |
| 2.3. Matériel de laboratoire.....     | 26 |
| 3. Méthodologie.....                  | 27 |
| 3.1. Prétraitement des algues.....    | 27 |
| 3.2. Extraction alcaline.....         | 28 |
| 3.3. Précipitation de l'alginate..... | 29 |
| 3.4. Purification.....                | 30 |
| 3.5. Séchage.....                     | 31 |

## **CHAPITRE III : Résultats et discussion**

|   |    |
|---|----|
| 1. Observations visuelles et aspects organoleptiques..... | 38 |
| 2. Rendement d'extraction.....                            | 39 |
| 2.1. Rendement brut en alginate sec.....                  | 39 |
| 2.2. Rendement en alginate humide.....                    | 39 |
| 3. Comparaison avec la littérature.....                   | 40 |

### **Conclusion générale**

### **Perspectives**

### **Références bibliographiques**

### **Annexe**

## Liste des Figures

| N°        | Figure   | Page      |
|-----------|--|-----------|
| <b>01</b> | Microalgue (Chlorella) sous microscope   | <b>05</b> |
| <b>02</b> | Schéma d'une macro algue   | <b>05</b> |
| <b>03</b> | Algue rouge  | <b>06</b> |
| <b>04</b> | Algue brune  | <b>07</b> |
| <b>05</b> | Structure chimique du $\beta$ -carotène  | <b>12</b> |
| <b>06</b> | Structure chimique de la fucoxanthine  | <b>12</b> |
| <b>07</b> | Structure des phlorotannins  | <b>12</b> |
| <b>08</b> | Répartition géographique de la production mondiale des algues  | <b>13</b> |
| <b>09</b> | Production mondiale de différents types d'algues   | <b>14</b> |
| <b>10</b> | Structure schématique de la paroi des algues brunes  | <b>17</b> |
| <b>11</b> | <i>Rugulopteryx okamurae</i>   | <b>18</b> |
| <b>12</b> | Morphologie de <i>Rugulopteryx okamurae</i>  | <b>20</b> |
| <b>13</b> | Répartition géographique de <i>R. okamurae</i>   | <b>21</b> |
| <b>14</b> | Monomères de l'alginate  | <b>23</b> |
| <b>15</b> | Structure de l'alginate  | <b>24</b> |
| <b>16</b> | Région de récolte  | <b>26</b> |
| <b>17</b> | Lavage de l'algue  | <b>27</b> |
| <b>18</b> | Séchage de l'algue   | <b>28</b> |
| <b>19</b> | Algue séché broyée   | <b>28</b> |
| <b>20</b> | Préparation de la solution alcaline  | <b>29</b> |
| <b>21</b> | Extraction alcaline  | <b>30</b> |
| <b>22</b> | Précipitation de l'alginate  | <b>31</b> |
| <b>23</b> | Étape de lavage de l'acide alginique à l'éthanol   | <b>32</b> |
| <b>24</b> | Séchage de l'acide alginique dans l'étuve  | <b>32</b> |
| <b>25</b> | Résidu d'extraction d'alginate à partir de <i>Rugulopteryx okamurae</i>  | <b>38</b> |
| <b>26</b> | Représentation graphique montre le rendement en alginate sec et humide   | <b>40</b> |
| <b>27</b> | Représentation graphique montre comparaison des rendements bruts en alginate sec (%) de différentes espèces d'algues | <b>43</b> |

## Liste des tableaux

| <b>N°</b> | <b>Tableau</b>  | <b>Page</b> |
|-----------|---|-------------|
| <b>01</b> | Types de polysaccharides solubles selon le phylum des algues            | <b>11</b>   |
| <b>02</b> | Classification de l'espèce <i>Rugulopteryx okamurae</i>                 | <b>18</b>   |
| <b>03</b> | Composition biochimique de <i>R. okamurae</i>                           | <b>21</b>   |
| <b>04</b> | Applications industrielles des alginates et leurs fonctions spécifiques | <b>28</b>   |
| <b>05</b> | Produits chimiques utilisés   | <b>26</b>   |

## Liste des abréviations

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>NaOH</b>                   | Hydroxyde de sodium  |
| <b>Mn</b>                     | Masse molaire moyenne en <b>nombre</b>   |
| <b>Mw</b>                     | Masse molaire moyenne en <b>poids</b>  |
| <b>M/G</b>                    | Rapport entre acide mannuronique (M) et acide guluronique (G)                    |
| <b><math>\omega</math>-3</b>  | Acides gras oméga-3  |
| <b>E401</b>                   | Alginate de sodium (additif alimentaire)   |
| <b>E405</b>                   | Alginate de propylène glycol (additif alimentaire)                               |
| <b>GG</b>                     | Bloc homogène d'acide guluronique  |
| <b>MM</b>                     | Bloc homogène d'acide mannuronique   |
| <b>MG / GM</b>                | Bloc alterné Mannuronate-Guluronate  |
| <b>g/mol</b>                  | Grammes par mole   |
| <b>FAO</b>                    | Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture              |
| <b><math>\beta</math>-1,4</b> | Liaison glycosidique $\beta$ -1,4  |
| <b>1C4 / 4C1</b>              | Conformation en chaise des monosaccharides (structure moléculaire de l'alginate) |

## Résumé

Cette recherche s'inscrit dans la volonté de transformer une contrainte écologique en opportunité : *Rugulopteryx okamurae* (algue brune invasive nouvellement identifiée sur les côtes algériennes) représente aujourd'hui une menace pour les écosystèmes marins. L'objectif de notre démarche a été d'explorer une piste de valorisation consistant à extraire l'un de ses composés à forte valeur ajoutée : l'alginate. Ce polymère naturel est très recherché dans les secteurs alimentaire, pharmaceutique et biomédical pour ses propriétés épaississantes et gélifiantes.

Un protocole classique d'extraction a été mis en œuvre, associant traitement alcalin et précipitation acide, mais les résultats obtenus (faible rendement : 4% et produit final de qualité moyenne) laissent penser que les limites sont notamment dues à la structure dense et particulière de la paroi cellulaire de cette espèce.

Même si ces résultats ne permettent pas d'envisager une exploitation immédiate à l'échelle industrielle, ce travail contribue à une meilleure compréhension de cette biomasse locale, ouvrant de nouvelles perspectives de recherche (amélioration des protocoles, études biochimiques plus fines, mais surtout exploration d'autres molécules actives que contient cette algue).

Dans cette perspective, ce travail constitue une première étape vers la valorisation durable des ressources marines locales, dans la mouvance de la recherche scientifique et de l'innovation utile.

**Mots clés :** *Rugulopteryx okamurae*, alginate, extraction, valorisation, biomasse invasive.

## **Abstract**

This research is part of the desire to transform an ecological constraint into an opportunity: *Rugulopteryx okamurae* (invasive brown algae newly identified on the Algerian coast) now represents a threat to marine ecosystems. The objective of our approach was to explore a valorization path consisting in extracting one of its high value-added compounds: alginate. This natural polymer is highly sought after in the food, pharmaceutical and biomedical sectors for its thickening and gelling properties.

A classic extraction protocol was implemented, combining alkaline treatment and acid precipitation, but the results obtained (low yield: 4% and final product of average quality) suggest that the limits are notably due to the dense and particular structure of the cell wall of this species.

Even if these results do not allow for immediate exploitation on an industrial scale, this work contributes to a better understanding of this local biomass, opening new research perspectives (improvement of protocols, more detailed biochemical studies, but above all exploration of other active molecules contained in this algae).

In this perspective, this work constitutes a first step towards the sustainable valorization of local marine resources, in the context of scientific research and useful innovation.

.

**Key words :** *Rugulopteryx okamurae*, alginate, extraction, valorization, invasive biomass

## التلخيص

يعد هذا البحث جزءاً من الرغبة في تحويل القيد البيئي إلى فرصة: تمثل *Rugulopteryx okamurae* (الطحالب البنية الغازية التي تم تحديدها حديثاً على الساحل الجزائري) الآن تهديداً للنظم البيئية البحرية. كان الهدف من نهجنا هو استكشاف مسار التثمين الذي يتكون من استخلاص أحد مركباته ذات القيمة المضافة العالية: الجينات. يعد هذا البوليمر الطبيعي مطلوباً بشدة في قطاعات الأغذية والأدوية والطب الحيوي لخصائصه في التكتيف والتجلط. تم تنفيذ بروتوكول استخلاص كلاسيكي يجمع بين المعالجة القلوية والترسيب الحمضي، لكن النتائج التي تم الحصول عليها (إنتاجية منخفضة: 4% ومنتج نهائي متوسط الجودة) تشير إلى أن الحدود ترجع بشكل خاص إلى البنية الكثيفة والخاصة لجدار الخلية لهذا النوع. ورغم أن هذه النتائج لا تسمح بالاستغلال الفوري على نطاق صناعي، فإن هذا العمل يساهم في فهم أفضل لهذه الكتلة الحيوية المحلية، وفتح آفاق بحثية جديدة (تحسين البروتوكولات، ودراسات كيميائية حيوية أكثر تفصيلاً، ولكن قبل كل شيء استكشاف الجزيئات النشطة الأخرى الموجودة في هذه الطحالب). ومن هذا المنظور، يشكل هذا العمل خطوة أولى نحو التثمين المستدام للموارد البحرية المحلية، في سياق البحث العلمي والابتكار المفيد.

**الكلمات المفتاحية:** *Rugulopteryx okamurae*، الجينات، الاستخلاص، التثمين، الكتلة الحيوية الغازية

# **INTRODUCTION**

## Introduction

La terre, souvent désignée comme la planète bleue, voit plus de 70% de sa surface couverte par l'eau. Elle possède des organismes marins remplissant de composés aux activités biologiques, présentant un énorme potentiel de nouveaux composés. De nombreux extraits isolés sont obtenus à partir d'organismes marins, illustrent un potentiel pharmacologique largement supérieur à celui des produits naturels dérivés d'organismes terrestres **(El-Gamal, 2010)**.

Parmi ces organismes marins, les algues, en tant que végétaux, constituent un vecteur de croissance nutritionnelle et de succès, offrant des perspectives de recherche et de débouchés économiques pour la filière alimentaire, tout comme pour la santé, les biocarburants (deuxième et troisième générations), l'environnement, l'industrie et la cosmétique **(Elmitili, 2014 ; Mérigout, 2016)**.

Les macroalgues, représentatives de la diversité algale, accueillent chaque jour de nouvelles espèces, se chiffrant à 17% des 200 000 espèces connues **(Radmer, 1996)**.

Parmi les espèces d'algues brunes, la *Rugulopteryx okamurae* a retenu l'attention récemment du fait de son caractère invasif et de son développement affolant dans les écosystèmes marins du bassin méditerranéen occidental et de l'Atlantique nord-est. Cette espèce, originaire de l'Asie de l'Est, a été signalée pour la première fois en Europe au début des années 2000, elle a depuis colonisé de larges étendues côtières, causant d'importants déséquilibres écologiques **(Rincón-Cervera et al., 2023)**. Au niveau de l'Algérie, *R. okamurae* vient d'être confirmée dans son environnement, d'où les répercussions environnementales et économiques inquiétantes.

Parmi les divers nombreux composés d'intérêt contenus dans cette espèce d'algue, l'alginate est un polysaccharide sur lequel la recherche appliquée a beaucoup mis l'accent sur un complexe constitué de deux unités issues du mannose, à savoir l'acide mannuronique et l'acide guluronique. Cet insoluble polysaccharide est très largement utilisé dans les secteurs alimentaires, biomédicaux et pharmaceutiques pour ses propriétés gélifiantes, épaississantes et stabilisantes **(Vauchel, 2007 ; Rincón-Cervera et al., 2023)**.

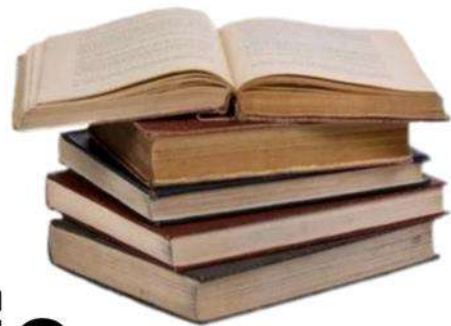
En industrie, il existe deux méthodes couramment utilisées pour l'extraction des alginates : la méthode directe et la méthode indirecte. Les deux méthodes consistent à prétraiter l'algue avec un acide suivi d'une extraction alcaline ; La différence entre les deux réside dans le mode de précipitation utilisé après l'extraction **(Pérez et al., 1992)**.

## Partie bibliographique

---

Ce travail a pour but d'exploiter le potentiel et d'extraire l'alginate à partir de l'algue brune invasive *Rugulopteryxokamurae*, récemment découverte sur les côtes algériennes. Certes, cet organisme est connu pour sa richesse en composés bioactifs, mais cette étude a eu pour enjeu d'expérimenter la présence et la quantité d'alginate dans la biomasse de cette espèce.

L'objectif est ainsi de déterminer la faisabilité et les limites d'extraction de l'alginate à partir de cette macro-algue et de comparer ces résultats avec les données disponibles dans la littérature scientifique. Cela permet de mieux cerner la variabilité inter-spécifique des compositions biochimiques et d'identifier des freins éventuels à la valorisation industrielle de cette biomasse.



# Partie bibliographique



## I. Généralités sur les algues marines

### 1. Définition

Les algues sont des organismes qui possèdent de la chlorophylle, classés comme thallophytes (non vascularisés, sans feuilles, tiges ou racines), et qui résident principalement dans l'eau ou dans des environnements fortement humides (**Oucif, 2018**). Les cellules des algues contiennent les mêmes composants structuraux que celles des plantes plus évoluées.

Ces cellules possèdent une paroi cellulaire partiellement composée de cellulose, de petits noyaux et des plastes colorés ou chromatophores (**Garon-Lardière, 2004**). Elles comprennent 20 000 et 30 000 espèces dans le monde entier, ce qui équivaut à peu près à 18% du règne végétal (**Leclerc, 2010**).

### 2. Morphologie des algues

Les algues présentent une grande diversité de formes. Effectivement, ces organismes peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires, fixes ou en mouvement, microscopiques ou de grande taille (par exemple, une algue brune appelée Varech peut atteindre jusqu'à 65 m de longueur) (**Barralon, 2016**).

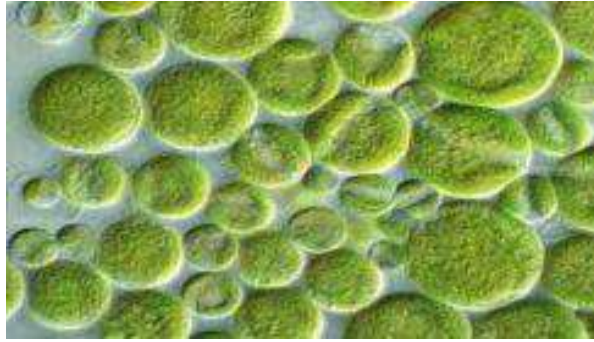
Habituellement, ces organismes sont constitués d'un thalle et d'un pied qui favorise leur adhésion au substrat. Ce pied peut se présenter sous diverses formes telles que rhizoïde, crampon, disque, etc., et la structure du thalle varie considérablement d'une espèce à l'autre. Il est possible que l'organe végétatif soit constitué de lames. Qu'il soit formé de simples tubes, ou qu'il ressemble à des tiges et des feuilles, à des sphères, ou encore qu'il soit cartilagineux ou spongieux, il peut aussi être très rigide ou totalement calcifié (**Barralon, 2016**).

### 3. Classification des algues

Les algues sont classées en deux grandes catégories en fonction de leur taille et de leur organisation cellulaire. Les micro-algues, (unicellulaires) et les macro-algues (multicellulaires).

#### 3.1 Les microalgues

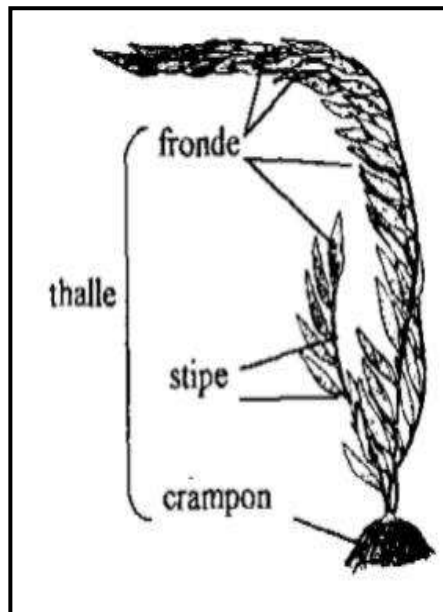
Les microalgues sont définies comme étant des organismes unicellulaires ou multi-cellulaires (des eucaryotes ou des procaryotes) Ils font partie de la sous-catégorie des cyanobactéries. Cette famille comprend 47000 espèces ; Il s'agit de microorganismes aquatiques microscopiques, dont les dimensions sont d'environ Micromètre. On les trouve sous diverses formes : sphériques (la plus commune) (Haematococcus), spiruline (Spirulina) et même Staurastrum. Elles sont souvent connues sous la dénomination de « phytoplancton » (**Figure 1**) (**Berrouane et Bouaissi, 2023**).



**Figure 1:** Microalgue (Chlorella) sous microscope (Salhi et Bouissaha, 2019).

### 3.2. Les macroalgues

Les macroalgues sont essentiellement composées de crampons, qui leur donnent la capacité de s'attacher à une surface. Elles absorbent les nutriments à travers l'ensemble du thalle en contact avec l'eau. Sur les crampons se trouve un pédoncule de longueur et de stipe présente un diamètre variable. L'algue se termine par une fronde qui peut être divisée en filaments, cordons ou lanières (Figure 2) (Faller, 2011).



**Figure 2 :** Schéma d'une macro algue (Daude, 2021).

#### 3.2.1 Rhodophycées (Algues Rouges)

Les algues rouges sont appelées aussi sous le nom de Rhodophycophytes. Ce sont des espèces végétales eucaryotes et forment un taxon très diversifié (Akretch et Mokrani, 2020).

La présence de plastes roses abritant le pigment rouge phycoérythrine associé à plusieurs pigments, dont la chlorophylle est responsable de la couleur des algues. Ces dernières sont approvisionnées sous forme de 3 500 espèces annuelles; les algues les plus consommées sont les dulse, le nori ou les carraghénanes (**Figure 3**) (**Géraldine et al., 2009 ; Zitouni et al., 2015**).



**Figure 3 : Algue Rouge (Photo personnelle).**

### **3.2.2 Cyanobactéries (Algues Bleues)**

Les cyanobactéries ou les algues bleues sont constituées des colonies de taille, de forme et de couleur très variables. En effet, elles possèdent les pigments surnuméraires bleus, et rouges, qui masquent la chlorophylle, bien qu'elles aient longtemps été désignées d'algues bleues, elles sont rarement bleues et plus souvent rouges, vertes avec ornementation bleutée, violettes, brunes, jaunes ou orangées (**Zitouni et al., 2015**). Ce sont des algues microscopiques telles que la spiruline. L'on recense environ 15000 espèces mais elles ne vivent que quelques semaines (**Géraldine et al., 2009**).

### **3.2.3 Phéophycées (Algues Brunnes)**

Les algues brunes, connues sous le nom de Phéophycées, se trouvent principalement dans les environnements marins. La couleur brune de ces algues est due à la majorité du pigment xanthophylle (comme Dictyota, Laminaria et Sargassum), ainsi que la fucoxanthine qui occulte les autres pigments (chlorophylle a et c, et bêta-carotène) (**Zitouni et al., 2015 ; Berrouane et Bouaissi, 2023**).

On dénombre 1500 espèces de ces algues annuelles. Leur taille peut atteindre 50 mètres, parmi lesquelles les plus connues sont les algues Wwakamé, Kombu, Aramé ou Spaghetti de mer (**Figure 4**) (Géraldine et *al.*, 2009).



**Figure 4:** Algue brune (Photo personnelle).

### 3.2.4 Chlorophycées (Algues Vertes)

Les chlorophycées, également appelées algues vertes, Elles existent sous diverses formes, unicellulaires ou multicellulaires. Ils possèdent des plastes colorés en vert grâce à la chlorophylle a et b, associées à des carotènes et xanthophylles (Zitouni et *al.*, 2015).Elles comptent plus de 6500 espèces et sont les algues les plus appréciées, parmi lesquelles la laitue de mer, l'ulve (**Tableau 01**) (Géraldine et *al.*, 2009).

### 4. Modalités de reproduction des algues

Les algues se reproduisent de deux manières : par multiplication végétative (reproduction asexuée) et par reproduction sexuée, qui implique l'union de gamètes mâles et femelles. Au sein de certains groupes, tels que les cyanobactéries, la reproduction asexuée est la seule méthode connue. Dans certaines situations, il coexiste avec la reproduction sexuée, notamment chez les characées (famille d'algue verte) où cette dernière méthode prédomine(Laplace-Treuture,2014).

### 5. Facteurs influençant la répartition des algues

#### 5.1 Lumière

La lumière est essentielle à la vie des algues, qui sont des plantes photosynthétiques. Ce facteur crucial agit de diverses façons : en termes de quantité (intensité lumineuse), de qualité (type de radiations présentes) et de photopériode (durée relative des périodes d'éclairage et d'obscurité) (Boudouresque et *al.*, 1992).

## 5.2 Température

C'est un facteur physique très important pour la reprise d'activité végétative. En général, les réactions au sein des cellules métaboliques impliquent des enzymes qui sont sensibles à la température. Ces protéines augmentent la rapidité des réactions, une température supérieure à 10°C est nécessaire pour que les enzymes de la majorité des algues soient pleinement opérationnelles (**Bekrit et al., 2021**).

## 5.3 Substrat

La plupart des algues multicellulaires ont besoin d'être attachées à un support pour se développer correctement et compléter leur cycle de vie. Contrairement aux plantes terrestres, elles n'ont pas de racines et absorbent leurs nutriments directement à partir de l'eau environnante (**Gayral, 1975 ; Boudouresque et al., 1992**).

## 5.4 Salinité

Les changements de la concentration en sel peuvent se produire soit en diluant, soit en concentrant davantage les sels. Comme la température, les variations de la salinité affectent tous les processus métaboliques. Cette influence se traduit généralement par des perturbations pouvant éventuellement entraîner l'élimination des espèces à long terme (**Boudouresque et al., 1992**).

## 6. Mode de nutrition

Toutes les algues se nourrissent de la même façon, c'est-à-dire par le processus de la photosynthèse. Elles sont donc autotrophes puisqu'elles produisent leur propre matière organique en utilisant la lumière solaire, l'eau et le CO<sub>2</sub>. Les feuilles absorbent les rayons solaires et la réaction du CO<sub>2</sub>, combinée à l'H<sub>2</sub>O, permet de produire des glucides qui sont indispensables à la nutrition des plantes. Ce processus génère de l'oxygène, facilitant la respiration terrestre, tout en favorisant aussi la formation de matière organique, qui est à la base de la chaîne alimentaire (**Barralon, 2016**).

## 7. Composition des algues

### 7.1. Protéines

La quantité de protéines présente dans les algues marines peut fluctuer. Des fractions protéiques ont été identifiées chez certaines variétés d'algues rouges, et on les a également observées chez des algues vertes et brunes (10-47% de matière sèche). En revanche, cette fraction est généralement plus modeste chez les algues brunes (5-24% MS). Ils en constatent des taux élevés de protéines durant les fins d'hiver et le printemps, tandis que les quantités diminuent pendant les mois d'été (**Fleurence, 1999 ; Matanjum et al., 2009**).

## 7.2. Lipides

Les algues peuvent être divisées en différentes catégories de lipides : les stérols, les tri-, di- ou mono-acylglycérols et les phospholipides. Le contenu en lipides peut être très faible : de 1 à 5 % de la MS. Toutefois, sur le plan qualitatif, les lipides algaux contiennent une proportion significative d'acides gras essentiels, à savoir les acides polyinsaturés  $\omega$ -3 (acide  $\alpha$ -linoléique et acide eicosapentaénoïque), qui possèdent une activité antioxydante. Ces acides gras offrent une protection contre les affections cardiovasculaires et cérébrovasculaires, et sont efficaces contre les œdèmes, les inflammations et les érythèmes (**Khotimchenko, 2003 ; Marfaing, 2004 ; Chouikhi et al., 2013**).

## 7.3. Vitamines

La composition en vitamines des algues présente un grand intérêt. Les vitamines principales incluent la vitamine C, que l'on retrouve en grandes quantités dans certaines algues de couleur verte et brune. De plus, les algues brunes contiennent plus de vitamine E que les algues vertes et rouges. En outre, les algues renferment une quantité significative de vitamine B12, contrairement aux plantes terrestres qui n'en contiennent aucune. Les recherches les plus récentes semblent confirmer que la vitamine B12 présente dans les algues est effectivement biodisponible (**Zitouni et al., 2015**).

## 7.4. Minéraux

Les algues extraient de la mer une abondance inégalée d'éléments minéraux variés. Le taux de minéraux peut varier de 8 à 40%. Cette portion minérale présente tout d'abord une vaste diversité : des macroéléments tels que le sodium, le calcium, le magnésium, le potassium, le chlore, le soufre et le phosphore, ainsi que des oligo-éléments comme l'iode, le fer, le zinc, le cuivre et le sélénium (**Zitouni et al., 2015**).

## 7.5. Polysaccharides

Les algues marines sont des organismes qui contiennent des polysaccharides en quantités significatives, allant de 33% à 61% de leur composition. Ces polysaccharides présentent une diversité de structures uniques qui les distinguent des fibres présentes dans les plantes terrestres (**Tableau 01**). Sur le plan nutritionnel, la plupart des polysaccharides contenus dans les algues ne sont pas digestibles, à l'exception de l'amidon présent dans les algues vertes et du floridoside présent dans les algues rouges (**Marfaing, 2004**).

**Tableau 01:** Types de polysaccharides solubles selon le phylum des algues (Zitouni,2015).

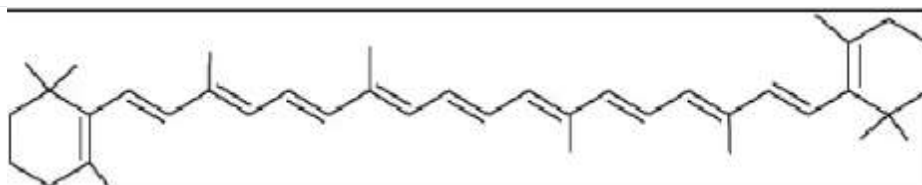
| Phylum des algues             | Principaux polysaccharides solubles |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Rhodophycées (Algues rouges)  | Agars, carraghénanes, xylanes       |
| Phéophycées (Algues brunes)   | Laminaranes, alginates, fucanes     |
| Chlorophycées (Algues vertes) | Ulvanes                             |

### 7.6. Fibres

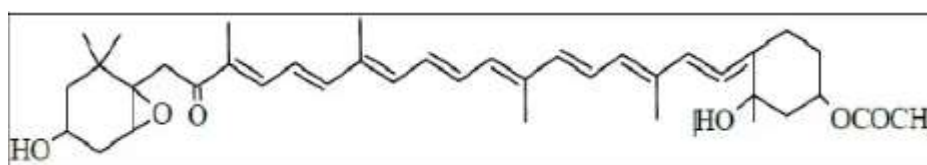
Les algues marines sont riches en fibres alimentaires, importantes pour la régulation du transit intestinal. Les fibres solubles, comme l'agar-agar, le carraghénane, et le fucane, sont particulièrement présentes et jouent un rôle fonctionnel en raison de leurs structures uniques (Chouikhi, 2013).

### 7.7. Caroténoïdes

Les caroténoïdes possèdent de fortes propriétés antioxydantes. Les caroténoïdes majeurs présents dans les algues rouges comprennent le  $\beta$ -carotène (Figure 5), l' $\alpha$ -carotène et leurs dérivés dihydroxylés, à savoir la zéaxanthine et la lutéine (Figure 6). De nombreuses recherches ont prouvé les vertus antioxydantes des caroténoïdes algaux et leur contribution à la prévention de diverses maladies associées au stress oxydatif (Zitouni et al., 2015).



**Figure 5 :** Structure chimique du  $\beta$ -carotène (Alem,2015).



**Figure 6:** Structure chimique de la fucoxanthine (Alem,2015).

### 7.8. Polyphénols

On trouve dans certaines algues marines des polyphénols, également connus sous le nom de phlorotannins (Figure 7). Ce groupe comprend une diversité significative de molécules en fonction de leur structure et de leur niveau de polymérisation, offrant ainsi une

large gamme d'activités biologiques possibles. On retrouve des concentrations plus élevées dans les algues brunes, variant entre 5 et 15% de leur poids (Zitouni *et al.*, 2015) (Figure 7).

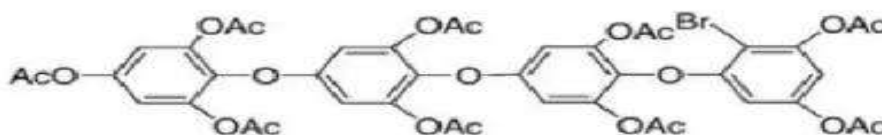


Figure 7 : Structure de phlorotannins(Alam,2015).

### 8. Production mondiale des algues

La production mondiale des algues a augmenté de plusieurs millions de tonnes par an ces dernières décennies. Principalement, l'aquaculture a contribué à cette forte croissance, couvrant actuellement la plupart de la production et éclipsant de loin la récolte sauvage. L'Asie est le principal producteur d'algues, représentant 99 % de la production, notamment la Chine, qui est à la tête de la liste des pays producteurs 52 %, l'Indonésie 26 %, et les Philippines 7 % (Figure 8). Parmi les algues exploitées, les rouges (9 millions de tonnes) et brunes (6,7 millions de tonnes) sont les plus cultivées (Figure 9). Leur utilisation s'étend à l'alimentation, la cosmétique et la pharmaceutique, contribuant à une économie durable (Lesseur et Lucas, 2014).

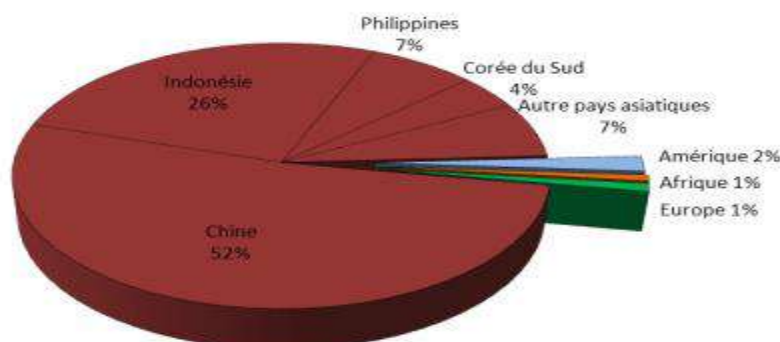


Figure 8 : Répartition géographique de la production mondiale des algues (Lesseur et Lucas, 2014).



Figure 9 : Production mondiale de différents types d'algues (Lesseur et Lucas, 2014).

## 9. L'industrie des algues

### 9.1. Applications médicales et pharmaceutiques

Les études effectuées sur la biomasse algale ont découvert plus de 15000 composés naturels prometteurs grâce à leurs propriétés biologiques, suggérant une utilisation potentielle dans le domaine médical (Naseri, Holdt et Jakobsen, 2016).

Les composés issus des algues présentent une diversité d'activités, telles que l'activité antioxydant, antimutagène, anticoagulante, anti-inflammatoire et anticancéreuse. Selon les archives historiques, les pays maritimes utilisaient des algues pour soigner les blessures. Utilisez-les comme répulsifs, anesthésiques et onguents, ainsi que pour les traitements Toux, plaies, goutte, goitre (Dhargalkar et Pereira, 2005).

Dans l'industrie pharmaceutique, la principale utilisation des composés dérivés des algues marines est l'emploi de phycocolloïdes comme agents texturants et mucoprotecteurs (par exemple, sirop anti-ulcères, pommades contre les hémorroïdes, etc. (Yan, Nagata et Fan, 1998).

### 9.2. Applications en cosmétique

Les algues présentent une source remarquable de composants actifs (acides aminés, sels minéraux, oligo-éléments, vitamines) qui sont essentiels dans les traitements cutanés (nourrissent, protègent, apaisent et ralentissent le vieillissement) (Dhargalkar et Pereira, 2005). Aujourd'hui en cosmétique, les algues sont partout, on les retrouve dans divers produits tels que le maquillage, les rouges à lèvres, les savons, les shampoings, les mousses à raser et les crèmes hydratantes (Kim et al., 2008).

### 9.3. Applications agricoles

Les algues brunes et vertes sont employées comme fertilisant organique naturel pour stimuler la croissance des plantes, améliorer la productivité et renforcer la résistance au stress en raison de leurs caractéristiques antioxydantes. Elles sont aussi utilisées pour améliorer la structure du sol, garantissant ainsi une porosité accrue et, par conséquent, une meilleure rétention d'eau. De plus, elles assurent une meilleure conservation des graines grâce aux concentrations élevées en agar qui a la capacité de les envelopper et de les défendre contre les bactéries et les champignons (Zehlila, 2017).

### 9.4. Applications environnementales

L'usage des populations de macroalgues à grande échelle pourrait offrir des technologies innovantes et économiquement viables pour diminuer la propagation de contaminants d'origine aquatique tels que les métaux lourds, les bactéries pathogènes et les virus (Chouikhi, 2013).

Les algues exercent un rôle majeur dans divers domaines tels que la capture du carbone et la dépollution. Les polysaccharides sulfatés (Ulvanes), dérivés des Ulves, ont des possibilités d'utilisation dans l'assainissement de l'air (Elmtili et al., 2014).

### 9.5. Applications dans l'industrie agroalimentaire

L'emploi des algues en tant qu'alimentation apparaît du XIVe siècle au Japon et du XVIe siècle en Chine. Ces algues, qui contiennent plus de 54 oligo-éléments essentiels à la croissance humaine, constituent une importante source de vitamines A, B1, B12, C, D et E. Riboflavine, acide folique et minéraux tels que le calcium, le phosphore, le sodium et le potassium (Dhargalkar et Pereira, 2005).

Les algues peuvent être consommées directement en étant fraîches, ou transformées par l'industrie de l'agroalimentaire (comme les carraghénanes, les agars et les alginates) pour produire des produits qui sont séchés, congelés ou intégrés dans divers aliments. Les industries de l'alimentation exploitent les carraghénanes dans les produits laitiers comme les crèmes, les flans, les glaces, etc. Ce composé assure également la stabilité des pulpes dans les jus de fruits. L'agar-agar, qui est un agent épaississant et stabilisant, est couramment employé par l'industrie pour les crèmes glacées, les tartes (Alem, 2015).

## II. Les alginates à partir des algues brunes

### 1. Caractéristiques des algues brunes

#### 1.1 Caractéristiques cytologiques et biochimiques

Les algues brunes (Phaeophyceae) représentent une large et variée catégorie d'algues dorées, allant des minuscules formes filamenteuses aux imposantes algues sophistiquées (**Wehr, 2015**). Chlorophylle a, chlorophylle c, caroténoïdes et xanthophylles constituent leurs pigments primordiaux. Ils possèdent de véritables plastes contenant un néoplastide ; les pyrénoides, lorsqu'ils sont présents, se situent généralement en dehors de la zone des thylakoïdes. Les thylakoïdes se rassemblent en groupes de deux ou trois. Dans les vacuoles, le mannitol et la laminarane sont les principaux métabolites caractéristiques, tandis que l'abondance des phlorotannins (physodes) est également représentée. Un élément majeur des parois est l'acide alginique et ses autres dérivés (**Fischer et al., 1987**).

#### 1.2 Physiologie

En plus de la chlorophylle a, les algues brunes possèdent principalement des chlorophylles C1 et C2, du  $\beta$ -carotène, de la fucoxanthine et de la violaxanthine. Les parois cellulaires sont composées de deux types de polysaccharides : une partie fibrillaire, de la cellulose, est baignée dans une matrice amorphe d'alginates (**Figure 10**). Les alginates sont des polymères d'acides L-guluronique et D-mannuronique, liés par des liaisons  $\beta$ -1,4. Les polysaccharides de réserve principal des algues brunes est la chrysolaminarine, polymère hydrosoluble de glucanes liés par des liaisons  $\beta$ -1,3. Les algues brunes ont des cycles de vie qui présentent généralement une alternance entre des individus haploïdes et des individus diploïdes ; Ils peuvent être isomorphes ou hétéromorphes (**Ibouziten et Benmouhoub, 2020**).

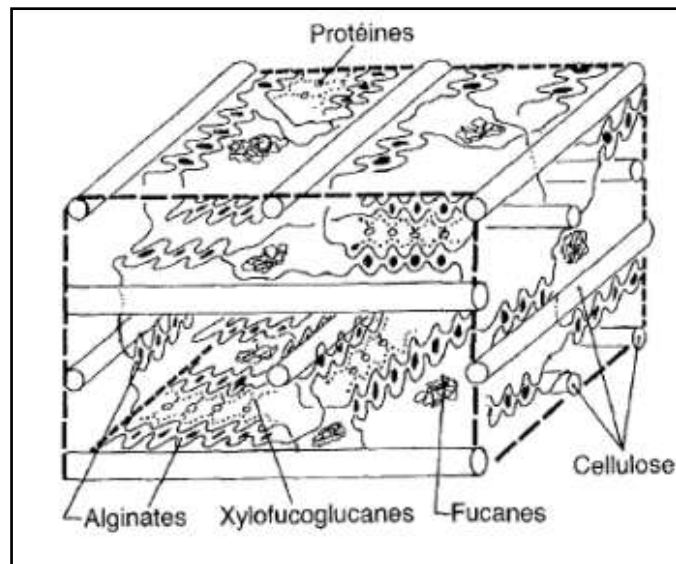


Figure 10: Structure schématique de la paroi des algues brunes (Kloareg&Quatrano, 1988).

## 2. Présentation de l'espèce *Rugulopteryx okamurae*

### 2.1 Classification



Figure 11 : *Rugulopteryx okamurae* (Ruitton et al., 2021).

*Rugulopteryx okamurae* est une espèce d'algue brune appartenant à la famille des Dictyotaceae (Tableau 02).

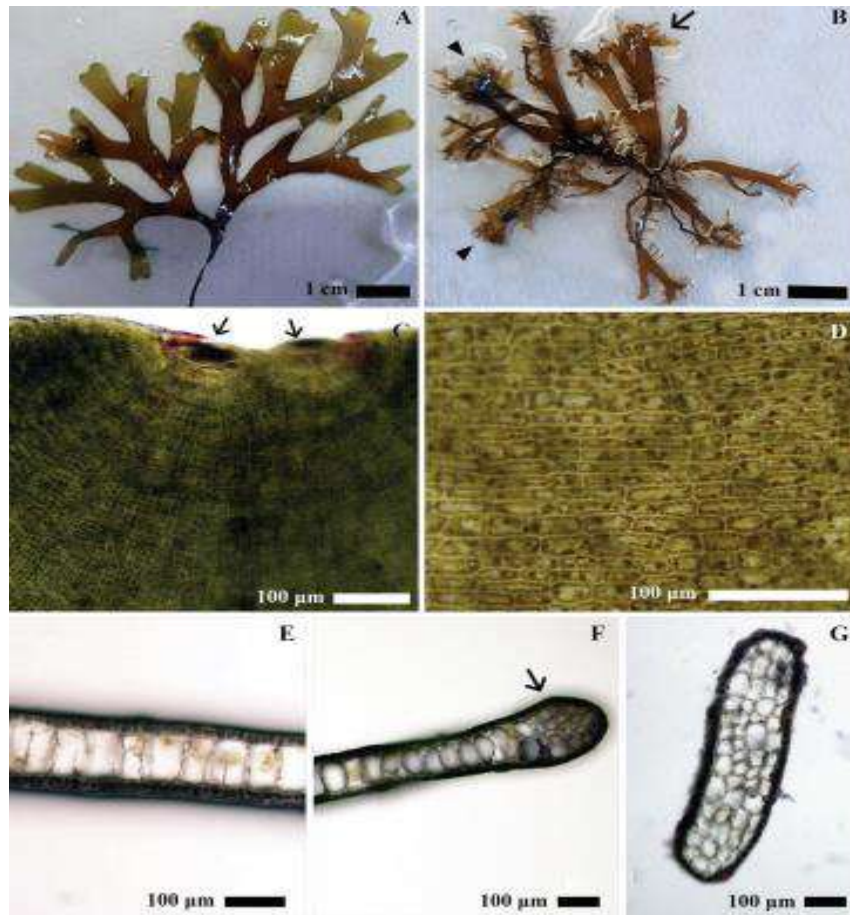
**Tableau 02:** Classification de l'espèce *R. okamurae* (Hwang et al., 2009).

|                |                     |
|----------------|---------------------|
| <b>Règne</b>   | Chromista           |
| <b>Phylum</b>  | Ochrophyta          |
| <b>Classe</b>  | Phaeophyceae        |
| <b>Ordre</b>   | Dictyotales         |
| <b>Famille</b> | Dictyotaceae        |
| <b>Genre</b>   | <i>Rugulopteryx</i> |
| <b>Espèce</b>  | <i>R. okamurae</i>  |

### 2.2 Structure morphologique du *R.okamurae*

*R.okamurae* se définit par un thalle coriace, plat, dressé, de 5 à 15 cm de long, à ramification dichotomique régulière conférant un aspect en éventail, se signale par la présence de rameaux adventifs particulièrement fréquents témoins d'un grand potentiel de régénération végétative. La surface est lisse mais sans excroissances, présentant un cortex en cellules isodiamétriques polygonales disposées régulièrement (Bottalico et al., 2024).

Le sommet présente une cellule apicale proéminente assurant la croissance intercalée. Anatomiquement, la médullaire est unistratifiée dans la zone médiane, pluristratifiée à l'apex (situé au sommet du thalle assurant la souplesse et l'élasticité thalline) et fortement épaissie à la base qui montre 3 à 4 couches de cellules à parois épaissies assurant une rigidité mécanique nécessaire à l'ancrage de l'algue. Cette organisation morfo-anatomique couplée à une reproduction végétative rapide permettrait en partie le succès écologique et invasif de cette espèce dans les écosystèmes méditerranéens (Figure 12) (Bottalico et al., 2024).



**Figure 12:** Morphologie de *Rugulopteryx okamurae* (Bottalico et al., 2024).

### 2.3 Répartition géographique

*R. okamurae* a été accidentellement importée en Europe au début des années 2000, elle est maintenant présente dans le détroit de Gibraltar (Sempere-Valverde et al., 2019), le sud de l'Espagne, l'Italie (Bellissimo et al., 2024), la mer Adriatique (Bottalico et al., 2024), et jusqu'aux côtes atlantiques du nord de l'Espagne (Figure 13) (Alvite et al., 2024).

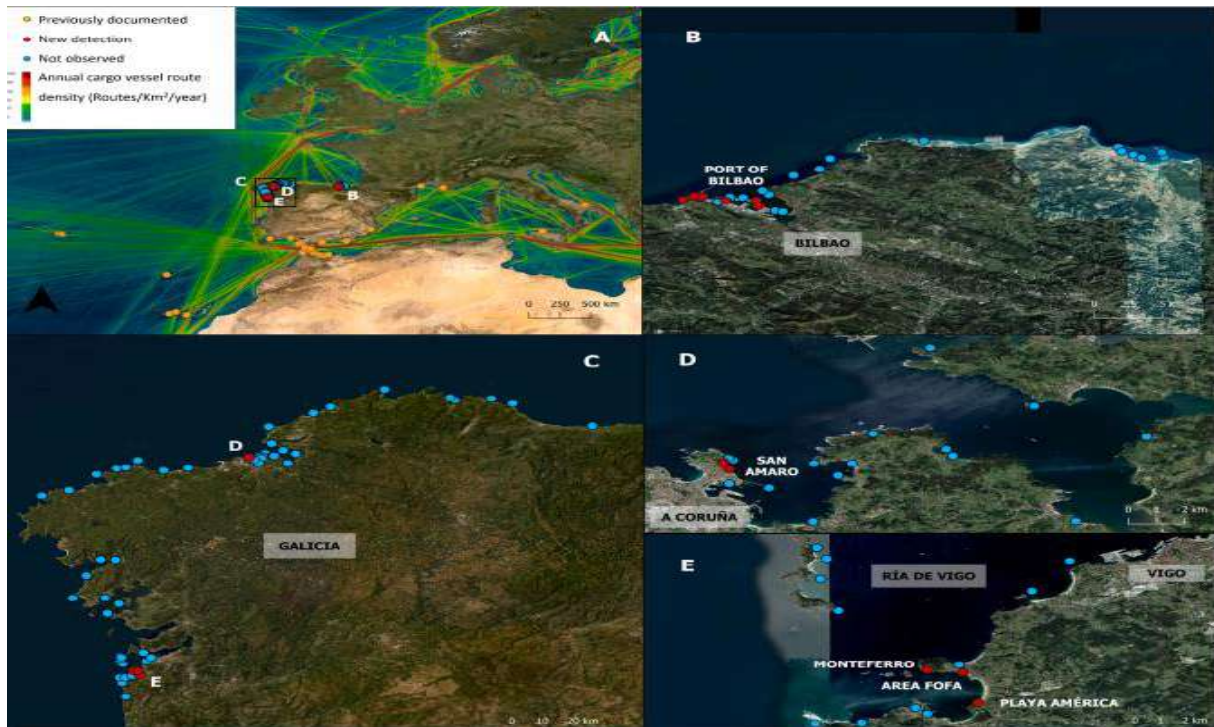


Figure 13 :Répartition géographique de *R.okamurae* (Díaz-Tapia et al., 2023).

### 2.1.4 Composition du *Rugulopteryxokamurae*

La composition biochimique de *R. okamurae* est illustrée dans le (Tableau 03).

Tableau 03: Composition biochimique de *R.okamurae* (Rincón-Cervera et al., 2023).

| Catégories                | Composants   |
|---------------------------|--|
| Polysaccharides           | Alginate, acides mannuroniques et guluroniques, fucose                       |
| Lipides                   | Acides gras saturés, acides gras polyinsaturés oméga-3                       |
| Protéines                 | Protéines totales, acides aminés essentiels (leucine, phénylalanine, valine) |
| Minéraux et Oligoéléments | Magnésium, calcium   |
| Composés bioactifs        | Polyphénols, métaux lourds   |

## 3. Les alginates

### 3.1 Historique

Les premières études sur l'extraction des alginates à partir des algues brunes remontent à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et ont été menées par Edward C. C. Stanford (1837-1899), pharmacien et chimiste britannique (Vincent, 2010). En 1883, il isola pour la première fois une substance gélatineuse à partir de *Laminariadigitata*, qu'il nomma « algine » (Chopin et al., 1995).

## 3.2 Définition

L'alginate est un polysaccharide anionique linéaire composé principalement d'algues brunes, telles que *Macrocystis pyrifera*, *Laminaria hyperborea*, et *Ascophyllum nodosum*, ainsi que par certaines bactéries comme *Azotobacter* et *Pseudomonas* (Szekalska et al., 2016).

En raison de sa tendance à libérer des ions  $H^+$  dans les solutions aqueuses, le polysaccharide est appelé acide alginique. Il est reconnu comme composant clé de la paroi cellulaire des algues brunes marines, qui peut représenter jusqu'à 40% de matière sèche. L'alginate confère aux algues brunes une grande flexibilité et fonctionnalité, joue un rôle important de réservoir d'eau, empêchant ainsi la déshydratation (Donati, 2009).

## 3.3 Origine d'alginate

L'alginate naturel est principalement produit par diverses espèces d'algues brunes, telles que *Laminaria*, *Macrocystis*, *Fucus*, *Phaeophyceae*, *Ascophyllum*, *Ecklonia*, *Nereocystis*, *Durvillea*, *Chnoospora*, *Cystoseira*, et *Turbinaria*. Les algues ont été récoltées dans certaines des eaux les plus froides et les plus pures de la planète, en particulier les océans l'Arctique et le nord Atlantique Nord au large des côtes de la Norvège et du Canada, surtout aux États-Unis, au Royaume-Uni, en France et en Norvège. De plus, certaines bactéries telles que les *Azotobactéries* et plusieurs espèces de *Pseudomonas* peuvent produire de l'alginate par un processus de fermentation microbienne, puis Agrégation (Evans et Linker, 1973).

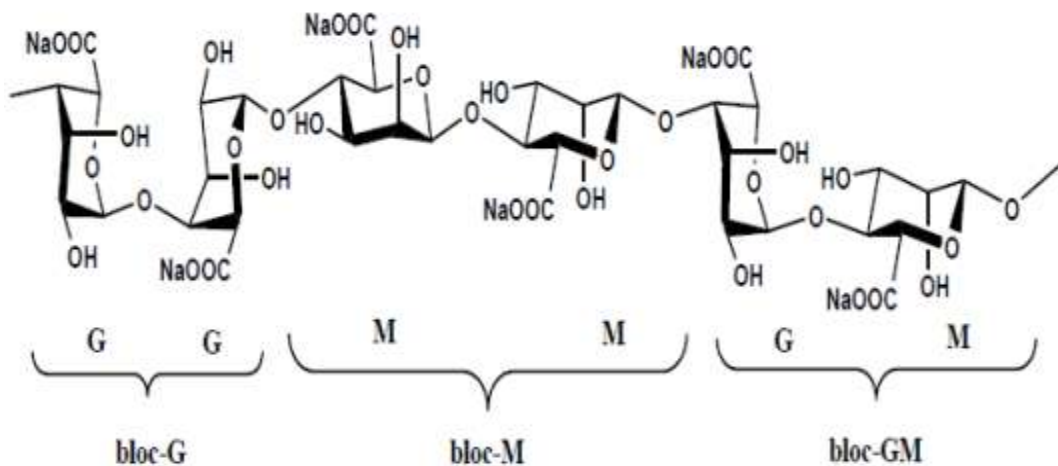
## 3.4 Composition chimique des alginates

L'alginate est une macromolécule naturelle formée de deux monomères principaux, Acide  $\beta$ -D-mannuronique (M) et acide  $\alpha$ -L-guluronique (G), liés par une liaison glycosidique 1  $\rightarrow$  4 (Mirshafiey & Rehm, 2009) (Figure 14). Lors de l'hydrolyse acide partielle, l'alginate est divisé en trois parties : deux constituées d'homopolymères de G et M et la troisième constituée d'homopolymères de G et M Dimères MG alternés (Haug, Larsen & Smidsrod, 1966). Le rôle de ces polysaccharides sous forme de copolymères séquencés, comprenant des segments homogènes (MM, GG) et alternés (MG) (Donati, 2009).



Figure 14 : Monomères de l'alginate (Vincent, 2010).

La structure du monomère a été confirmée par diffraction des rayons X, l'acide guluronique adopte la conformation chaise 1C4 et l'acide mannuronique adopte la conformation Chaise 4C1 (**Figure 15**). Les alginates ont différentes configurations de liaison Glycosides : biéquatoriaux (MM), biaxiaux (GG) et alternés (MG, GM) (**Draget&Smidsrød, 2005**).



**Figure 15** : Structure de l'alginate (**Salisu et al., 2013**).

Les segments de mannuronate, avec des liens diéquatoriaux, ont précisément une structure de type cellulose, grâce à des interactions hydrogène. En revanche, Les segments de guluronate en forme de boucles rigides, grâce à des liaisons complexe hydrogène entre les groupes hydroxyle et carboxyle. Les blocs MG, en raison de leurs variations tactiles, sont plus flexibles que les autres blocs. Les données de viscosité indiquent que la rigidité des blocs suit l'ordre suivant :  $MG < MM < GG$  (**Palluault, 2010;Mokrani, 2013**).

### 3.5 Propriétés des alginates

#### 3.5.1 Propriétés chimiques

##### 3.5.1.1 Masse molaire moyenne

La masse molaire moyenne est un paramètre essentiel pour caractériser les alginates. La masse molaire moyenne en nombre ( $M_n$ ) est définie comme la masse totale de toutes les macromolécules dans un échantillon divisée par le nombre total de macromolécules de l'échantillon, tandis que la masse molaire en poids ( $M_w$ ) reflète l'influence des chaînes de grande taille. Ces valeurs influencent directement des propriétés comme la viscosité et la capacité de gélification de l'alginate (**Benzana, 2018**).

### 3.5.1.2 Rapport M/G

La qualité de l'alginate est appréciée par le rapport M/G. Ce rapport est fonction de l'espèce, de la variation saisonnière, de la partie et de la portion de l'algue brune en étude. Les algues brunes du genre *Sargassum* sont riches en blocs G et pauvres en M, tandis que les *Laminaires* ont une quantité énorme en bloc M, et faible en bloc G. Le rapport M/G des monomères se situe entre 0.25 et 2.25 selon l'espèce, l'organe, ou le tissu considéré. La structure primaire des alginates dépend donc du rapport (Benzana, 2018).

### 3.5.2 Propriétés physiques

#### 3.5.2.1 Solubilité et viscosité

L'acide alginique est insoluble dans l'eau. Les sels de sodium, d'ammonium, et de potassium et d'autres métaux alcalins se dissolvent en des solutions aqueuses, en donnant des solutions à haute viscosité tandis que la gomme arabique en est à moins de 30 centipoises à la même concentration. Les sels de cations polyvalents, tel que  $Ca^{+2}$  sont insolubles en solution aqueuse, à l'exception de celui de  $Mg^{+2}$  (Benzana, 2018).

#### 3.5.2.2 Stabilité

L'alginate de sodium sec, pur et en poudre peut se maintenir stable pendant plusieurs mois et doit être conservé dans un lieu frais et sec, à l'abri de toute exposition au soleil.

Cependant, l'acide alginique anhydre possède une stabilité très restreinte aux températures normales en raison de sa dégradation intramoléculaire. Dans des conditions propices à la décomposition, la viscosité relative d'une solution d'alginate peut considérablement diminuer en peu de temps (Benzana, 2018).

#### 3.5.2.3 Gélification

L'alginate peut gélifier par deux mécanismes :

✓ **Gélification par acidification** : La gélification de l'acide alginique se produit lorsque le pH du milieu est inférieur au pKa de l'alginate. Dans ce contexte, des liaisons intermoléculaires peuvent se produire grâce à des liaisons hydrogène et des interactions hydrophobes (Louni, 2018).

✓ **Gélification ionique** : Le second mécanisme de gélification se produit en présence d'ions multivalents tels que les ions calcium. Dans ce contexte, les chaînes d'alginates se lient à ces ions pour former une structure appelée « boîte à œufs », où un ion divalent est engagé dans une enveloppe d'acide guluronique de l'alginate (Palluault, 2010).

### 3.5.3 Propriétés biologiques

#### 3.5.3.1 Biocompatibilité

Bien que la biocompatibilité de l'alginate ait été largement évaluée *in vitro* et *in vivo*, il existe encore des débats concernant l'impact de la composition de l'alginate. Les alginates riches en mannuronate peuvent être plus immunogènes que ceux riches en guluronate, mais certains travaux ne révèlent aucune réponse immunitaire significative. Comme l'alginate est obtenu à partir de sources naturelles, diverses impuretés telles que les métaux lourds, les endotoxines, les protéines et les composés polyphénoliques pourraient être présentes. Bien qu'un alginate hautement purifié ne provoque pas de réaction inflammatoire notable après implantation chez l'animal (Lee et Mooney, 2012).

#### 3.5.3.2 Agent absorbant

Les alginates, en tant qu'hydrogels, possèdent une capacité d'absorption impressionnante, pouvant retenir jusqu'à 300 fois leur poids en eau. Leur mécanisme d'absorption inclut l'absorption inter-fibres, où le fluide est retenu entre les fibres, et l'absorption intra-fibres, où l'eau est absorbée directement dans la structure fibreuse (Qin, 2004 ; Venkatesan *et al.*, 2015).

### 3.6 L'industrie d'alginate

Les alginates, issus de sources naturelles, sont utilisés dans divers secteurs en raison de leur capacité à gélifier, grâce à l'interaction avec des cations divalents comme le calcium. Leur nature biocompatible, non toxique et non immunogène les rend idéaux pour des applications biomédicales et environnementales (Tableau 4).

Ils sont particulièrement utiles dans des technologies telles que la microencapsulation, permettant de contrôler la libération de substances actives (Figure 16) (Djebri *et al.*, 2018).

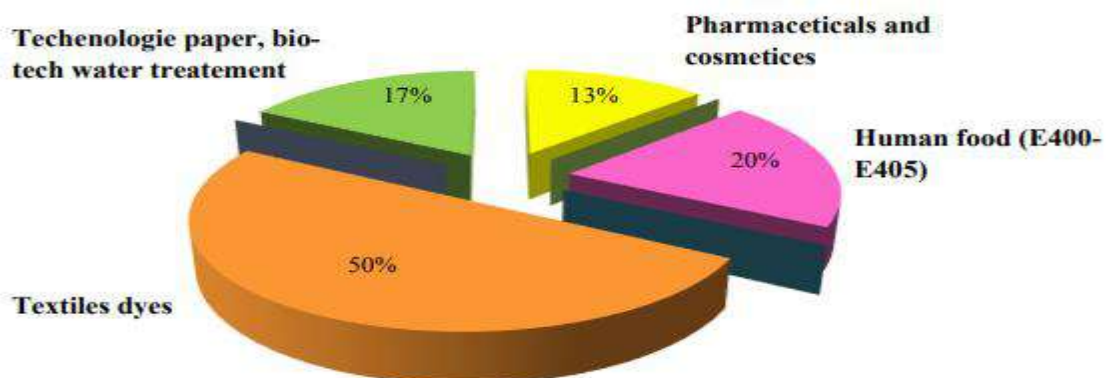


Figure 16 : Marchés d'application des alginates (Person, 2011 modifiée)

## Partie bibliographique

**Tableau 04:** Applications industrielles des alginates et leurs fonctions spécifiques (Vauchel, 2007).

| Secteur industriel  | Propriétés et utilisations  |
|---|---|
| <b>Industrie textile (50%)</b>                                  | Utilisé comme agent épaississant dans les pâtes d'impression et les teintures, conférant une meilleure stabilité. Joue un rôle dans l'imperméabilisation des textiles et agit comme plastifiant et filmogène.   |
| Industrie agroalimentaire (30%)( <i>codes E401 &amp; E405</i> ) | Employé comme agent épaississant, texturant et conservateur dans divers produits alimentaires, tels que les confitures, jus de fruits, sauces (moutarde, mayonnaise), potages et produits laitiers. Sert de clarifiant pour les vins et bières et stabilise les crèmes glacées en empêchant la formation de cristaux. |
| <b>Industrie du papier (5%)</b>                                 | Fonctionne comme agglomérant des fibres et agent d'apprêt de surface. Contribue à la stabilisation et l'épaississement des colles, tout en maintenant les pigments en suspension.   |
| <b>Industrie pharmaceutique (5%)</b>                            | Stabilise les émulsions et formulations médicamenteuses. Utilisé comme épaississant et agent hémostatique dans les pommades, pansements et solutions nasales. Sert également de gélifiant dans les pâtes à empreinte dentaire.  |
| <b>Applications diverses (10%)</b>                              | Intégré dans les produits cosmétiques et dentifrices en tant qu'épaississant. Stabilise les peintures et vernis, joue un rôle de flocculant dans le traitement des eaux. Utilisé comme agglomérant pour les électrodes de soudure et agent absorbant dans les couches pour bébés.                                     |

# Matériel et méthodes



## Matériel et Méthodes

### Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est de participer à l'extraction d'alginate à partir de *Rugulopteryx okamurae* récolté sur la plage de Sassel, située dans la wilaya d'Aïn Témouchent (Algérie), en précisant le rendement ainsi que certaines propriétés physico-chimiques du polymère extrait, mais aussi par la caractérisation structurale et la pureté de l'alginate, pour éclairer ses potentialités fonctionnelles.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation d'une ressource marine locale, dans une perspective d'application industrielle, dans les domaines du biomédical, de l'alimentaire et du pharmaceutique.

## 1. Matériels

### 1.1 Matériel végétale

#### 1.1.1 Le choix de l'algue

*Rugulopteryx okamurae*, une algue brune invasive nouvellement signalée sur les côtes algériennes, représente une première dans la région. Si son implantation ne va pas sans soulever de problématiques écologiques importantes, elle pourrait aussi être une ressource intéressante pour l'extraction d'alginate, un biopolymère d'un large éventail d'applications industrielles. Ce travail propose donc d'étudier cette algue afin de mieux appréhender son impact à l'environnement mais aussi sa valorisation potentielle.

#### 1.1.2 Récolte

Les thalles *Rugulopteryx okamurae* étudiés ont été récoltés le mois de mai 2025 sur la plage de Sassel, située dans la wilaya d'Aïn Témouchent, à l'ouest de l'Algérie (**Figure 16**). Cette zone côtière est connue pour sa richesse en algues brunes. Les échantillons ont ensuite été soigneusement transportés au laboratoire de biologie de la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Aïn Témouchent, en vue de leur traitement et de l'extraction de l'alginate.

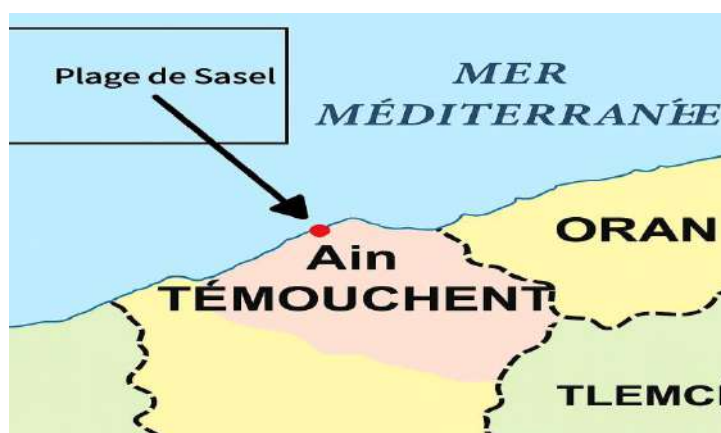


Figure 16 :Zone de récolte des algues.

### 1.2 Produits chimiques utilisés

Les agents chimiques, sans doute, constituent des éléments incontournables des manipulations que nous avons effectuées, leur sélection a été faite en fonction de leur pureté et de leurs propriétés. La liste complète des réactifs utilisés apparaît ci-dessous (**Annexe 01**).

### 1.3 Matériel de laboratoire

Le matériel de laboratoire est indispensable à chaque étape du protocole expérimental et il est composé tant de la verrerie que des matériels. La liste exhaustive de ce matériel est présentée ci-après (**Annexe 02**).

## 2. Méthodologie

### 2.1 Prétraitement des algues

Tout d'abord, laver abondamment les algues à l'eau douce pour éliminer les impuretés (sable, sel, organismes marins) (**Goh et al., 2012**)( **Figure 17**).



**Figure 17** : Lavage des algues.

Ensuite, faire sécher les algues à l'air libre ou à 40–50°C jusqu'à ce qu'elles soient bien déshydratées (Goh *et al.*, 2012) (Figure 18).



**Figure 18**: Séchage des algues

Enfin, Broyer ensuite les algues sèches en petits morceaux (1 à 2 cm) ou en poudre grossière (Goh *et al.*, 2012) (Figure 19).



**Figure 19**: Algue séché broyer.

### 2.2 Extraction alcaline

Tout d'abord, 50 g d'algues broyées ont été placés dans un bécher contenant 1 L de solution NaOH à 1% (préparée en dissolvant 10 g de NaOH solide dans 1000 mL d'eau distillée, ce qui correspond à une concentration de 1 % (m/v)) (Figure 20). Le mélange a été chauffé à 65 °C sous agitation magnétique pendant 3 heures afin de solubiliser l'alginate sous forme d'alginate de sodium. Après extraction, la solution a été filtrée pour séparer le résidu

insoluble (cellulose, débris) du filtrat contenant l'alginate dissous (Figure 21)(McHugh, 2003).



Figure 20 : Préparation de la solution alcaline

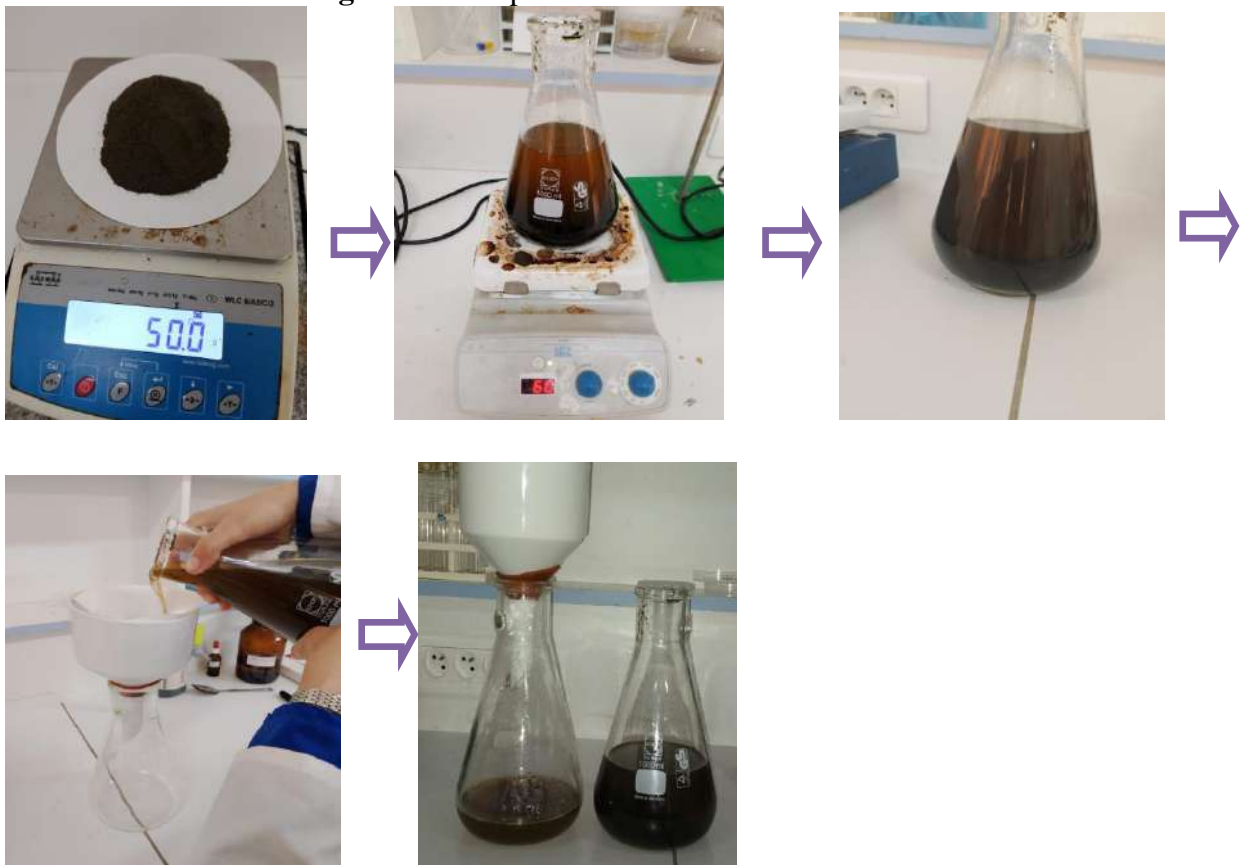
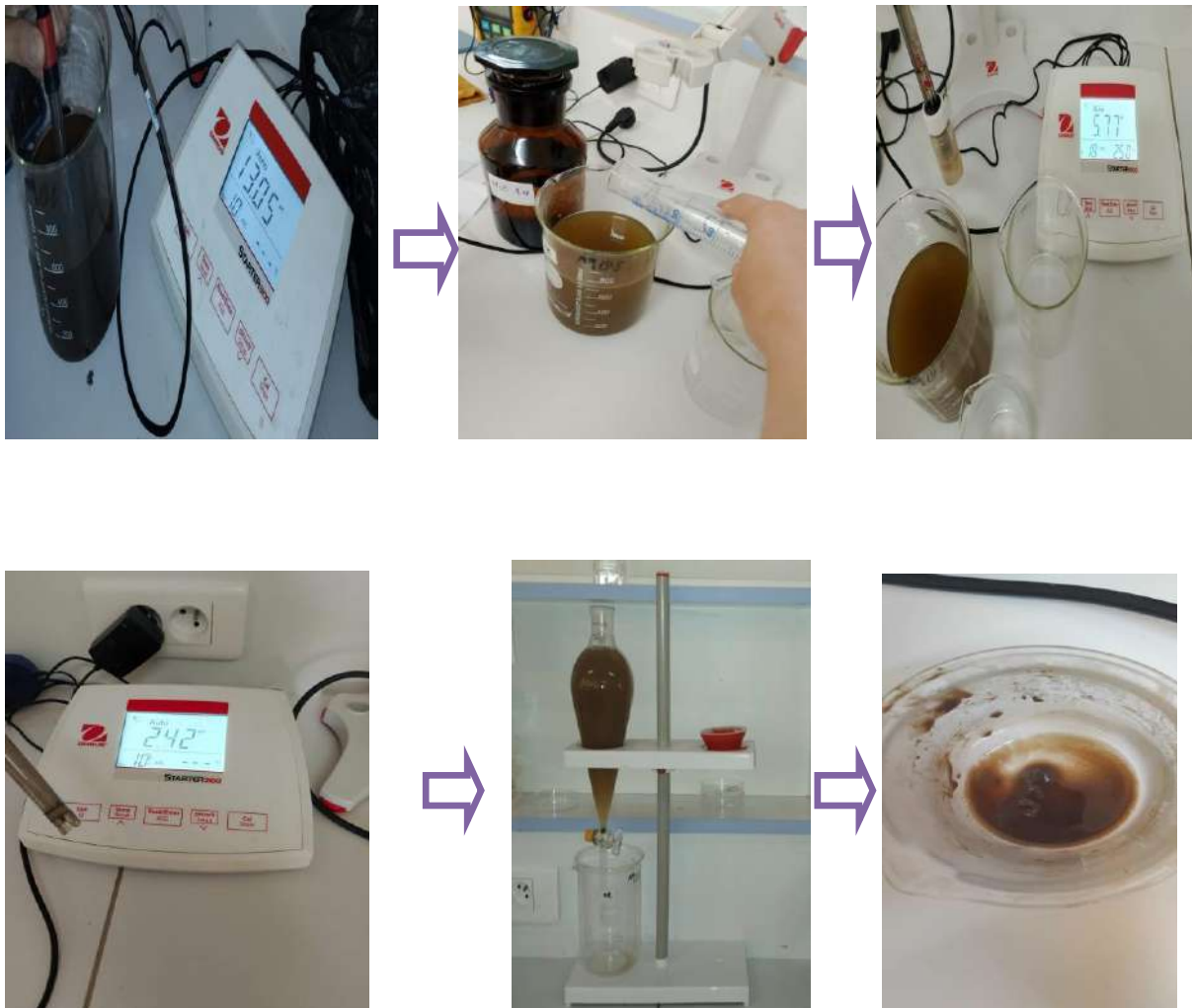


Figure 21 :Extraction alcaline.

## 2.3 Précipitation de l'alginate

Le filtrat contenant l'alginate de sodium a été acidifié avec 180 mL d'HCl dilué jusqu'à atteindre un pH =2,42 , provoquant la précipitation de l'acide alginique sous forme d'un gel brun. Ce gel a été récupéré à l'aide d'une ampoule à décanter, permettant de séparer

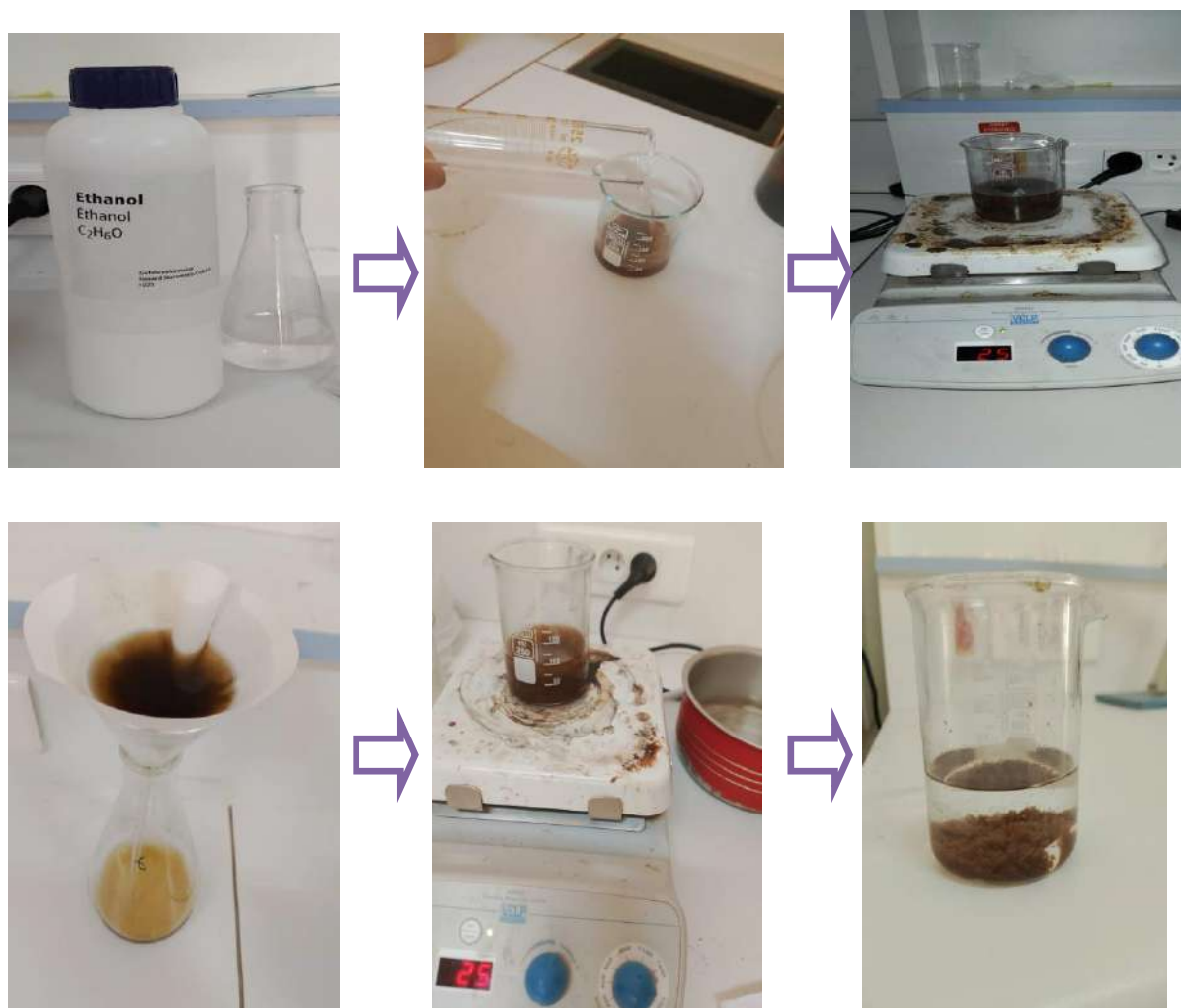
la phase liquide. Le précipité obtenu constitue l'acide alginique brut avant purification (Figure 22)(Chan *et al.*, 2014).



**Figure 22 :** Précipitation de l'alginate.

### 2.4 Purification et conversion en alginate de sodium

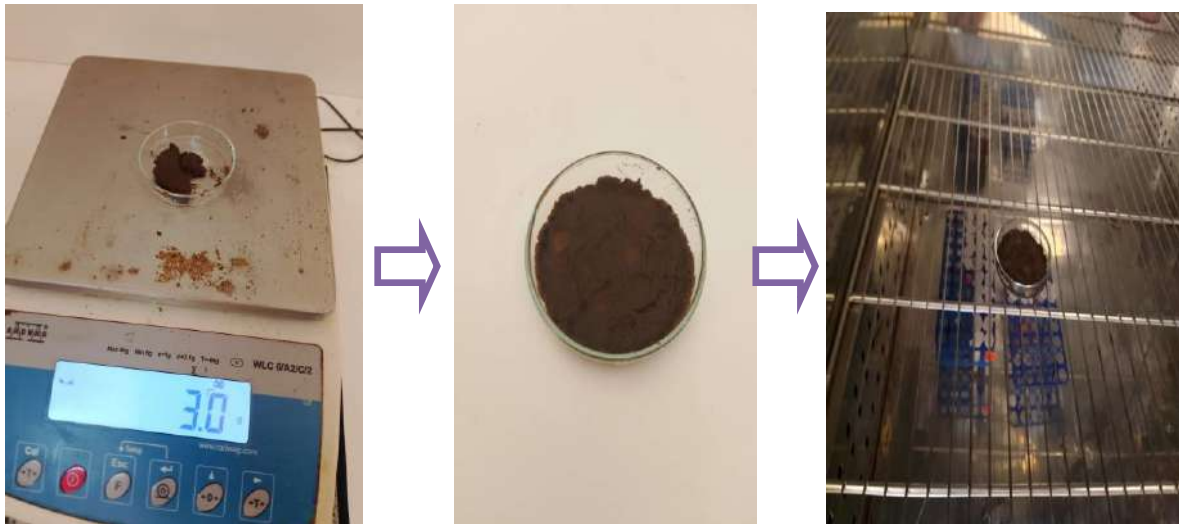
Le précipité obtenu correspondant à l'acide alginique brut, a ensuite été lavé quatre fois avec de l'éthanol à 95 %. Chaque lavage a été effectué sous agitation douce pendant 60 minutes à température ambiante (25 °C), à l'aide d'un agitateur magnétique à faible vitesse, dans le but d'éliminer les pigments et impuretés résiduelles (Figure 23) (Arunkumar *et al.*, 2014).



**Figure 23** : Étape de lavage de l'acide alginique à l'éthanol.

### 2.5 Séchage de l'acide alginique

La pâte purifiée est ensuite étalée en couche fine dans un verre de montre. Elle est placée dans une étuve réglée à 37 °C pour un séchage lent et progressif, permettant d'éviter la dégradation thermique du polymère. Ce séchage peut durer plusieurs heures jusqu'à obtention d'un produit sec, friable ou sous forme de film mince selon l'épaisseur initiale (**Figure 24**) (Arunkumar *et al.*, 2014).



**Figure 24 :** Séchage de l'acide alginique dans l'étuve.



# Résultats et discussions

### 1. Observations visuelles et aspects organoleptiques

L'issue du protocole d'extraction mis en œuvre, témoigne d'un dépôt visqueux de teinte brune, collant aux paroi du bécher. Ce résidu ne prend pas la forme attendue d'un gel d'alginate structuré, tel qu'on pourrait l'attendre après d'une extraction efficace et des traces blanches diffusent probablement dues à des particules de composés résiduels précipités sont également visibles.

Visuellement néanmoins, des morceaux de tissus algaux sont restés intacts laissant penser que la libération d'alginate pariétal n'est pas complète. Ces constats étayent l'idée que *Rugulopteryx okamurae* a une faible teneur en alginate (**Figure 25**).

Ces résultats laissent supposer que *R.okamurae* serait pauvre en alginate ou que sa matrice cellulaire en interdirait l'accéder. Après séchage, le résidu final sous forme non filamentaire amorphe, est une matière brune pâle à beige a priori inodore. Les propriétés de ce produit sont portées au tableau ci-après (**Tableau 07**), confirmant bien les résultats de rendement faible et de structuration non accomplie du gel supposé.



**Figure 25:** Résidu d'extraction d'alginate à partir de *Rugulopteryx okamurae*

**Tableau07:**Caractéristiques organoleptiques de l'alginate extrait de *Rugulopteryxokamurae*.

| Caractères organoleptiques | <i>Rugulopteryxokamurae</i><br>(Présente étude) |
|----------------------------|---|
| Aspect avant séchage       | Gel légèrement à moyennement visqueux           |
| Aspect après séchage       | Poudre amorphe, non filamentaire                |
| Odeur                      | Aucune odeur                                    |
| Couleur après séchage      | Brun pâle à beige                               |

## 2. Rendement d'extraction

L'objectif de cette expérience était de quantifier la production d'alginate par extraction alcaline de *Rugulopteryx okamurae* en fonction du rendement en poids sec puis en poids humide et des caractéristiques visuelles (extrait).

### 2.1. Rendement brut en alginate sec

La masse d'algues sèches utilisée était de 50 g, et la masse d'alginate sec obtenue après séchage est de 2 g, le rendement brut est calculé comme suit :

$$\text{Rendement brut (\%)} = (\text{masse d'alginate sec} / \text{masse d'algues sèches}) \times 100$$

$$\text{Rendement brut (\%)} = (2 / 50) \times 100 = 4 \%$$

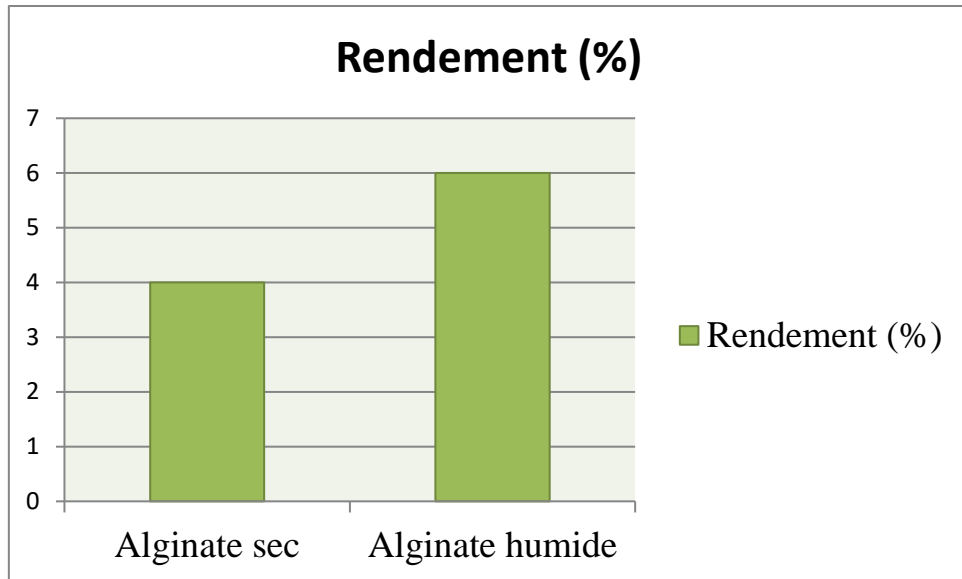
### 2.2 Rendement en alginate humide (Paramètre secondaire)

La masse du gel d'alginate humide obtenue était de 3 g. Le rendement humide peut être estimé de la manière suivante :

$$\text{Rendement humide (\%)} = (\text{masse d'alginate humide} / \text{masse d'algues sèches}) \times 100$$

$$\text{Rendement humide (\%)} = (3 / 50) \times 100 = 6 \%$$

En ce qui concerne la quantité obtenue (**Figure 26**), l'extraction a donné un rendement brut de 4 % en masse sèche (2 g d'alginate sec pour 50 g d'algue sèche), faible au regard des espèces traditionnellement utilisées. Le rendement humide, estimé à 6 %, contient une part non négligeable d'humidité, ne pouvant dès lors servir de référence pour une comparaison au niveau industriel.



**Figure 26:** Représentation graphique montre le rendement en alginate sec et humide.

### 3. Comparaison avec la littérature

Les rendements de *Rugulopteryx okamurae* ont été comparés à ceux d'autres espèces brunes, faisant apparaître une hétérogénéité interspécifique marquée. Le tableau (08) présente quelques valeurs de référence issues de la littérature :

**Tableau08:** Comparaison des teneurs en alginates chez *Rugulopteryx okamurae* par rapport aux principales alginophytes.

| Espèce d'algue               | Rendement brut en alginate sec (%) | Références                |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| <i>Ascophyllum nodosum</i>   | 15 – 20                            | (Perez, 1997)             |
| <i>Fucus serratus</i>        | 18 – 28                            |                           |
| <i>Laminaria digitata</i>    | 22 – 36                            |                           |
| <i>Cystoseira humilis</i>    | 5.43–19.21                         | (Zrid et al.,2016)        |
| <i>Lessonia trabeculata</i>  | 25.67                              | (Chandía et al.,2001)     |
| <i>Sargassum vulgare</i>     | 6.10                               | (Benali et Karali,2006)   |
| <i>Dilophus ligulatus</i>    | 8.8                                | (Belattmania et al.,2015) |
| <i>Saccharina longicuris</i> | 20                                 | (Rioux,2005)              |
| <i>Rugulopteryx okamurae</i> | 4                                  | Notreétude                |

## Résultats et discussion

---

Le tableau comparatif des rendements bruts en alginate sec révèle la diversité des potentialités extractives selon l'espèce d'algues brunes. On note que *Rugulopteryx okamurae* présente un rendement de 4 %, ce qui en fait l'espèce la moins productive, notamment au regard des standards industriels classiquement admis.

Pour certaines algues comme *Laminaria digitata*, dans les sociétés industrielles, on observe des rendements considérés comme bons, c'est-à-dire satisfaisants en matière d'exploitation et se chiffrant entre 22 et 36 % (Pérez, 1997). *Fucus serratus* produit 18 à 28 % et *Ascophyllum nodosum*, 15 à 20 % permettant à ces deux espèces de classer parmi les matières premières de base que l'industrie phycocolloïde tend à privilégier (Pérez, 1997).

En revanche, des espèces comme *Cystoseira humilis* montrent une variabilité marquée selon la méthode d'extraction considérée (elle peut fournir 5,43 % par précipitation à l'éthanol, mais jusqu'à 19,21 % en utilisant du chlorure de calcium, ce qui permet de la considérer comme un candidat prometteur sous condition d'employer la bonne méthode) (Zrid et al., 2016).

Les espèces telles que *Lessonia trabeculata*, déjà mentionnée (25,67 %)(Chandía et al., 2001) ou *Saccharina longicruris* (20 %)(Rioux, 2005) témoignent d'un fort potentiel. À l'inverse, *Sargassum vulgare* (6,10 %)(Benali & Karali, 2006) ou *Dilophus ligulatus* (8,8 %) (Belattmania et al., 2015) se rangent dans une catégorie intermédiaire, presque similaire de celle que l'on a observée ici.

Le rendement en alginate que l'on obtient à partir de *Rugulopteryx okamurae*, évalué à 4 %, confirme que cette espèce ne correspond pas à une algue d'intérêt. Une telle valeur, faible par rapport aux espèces traditionnellement exploitées en industrie, n'est pas seulement liée à une variabilité biologique mais sensiblement à des contraintes structurelles endogènes à l'algue elle-même. Plusieurs signaux d'observation privilégient en effet une faible capacité extractive (Figure 27).

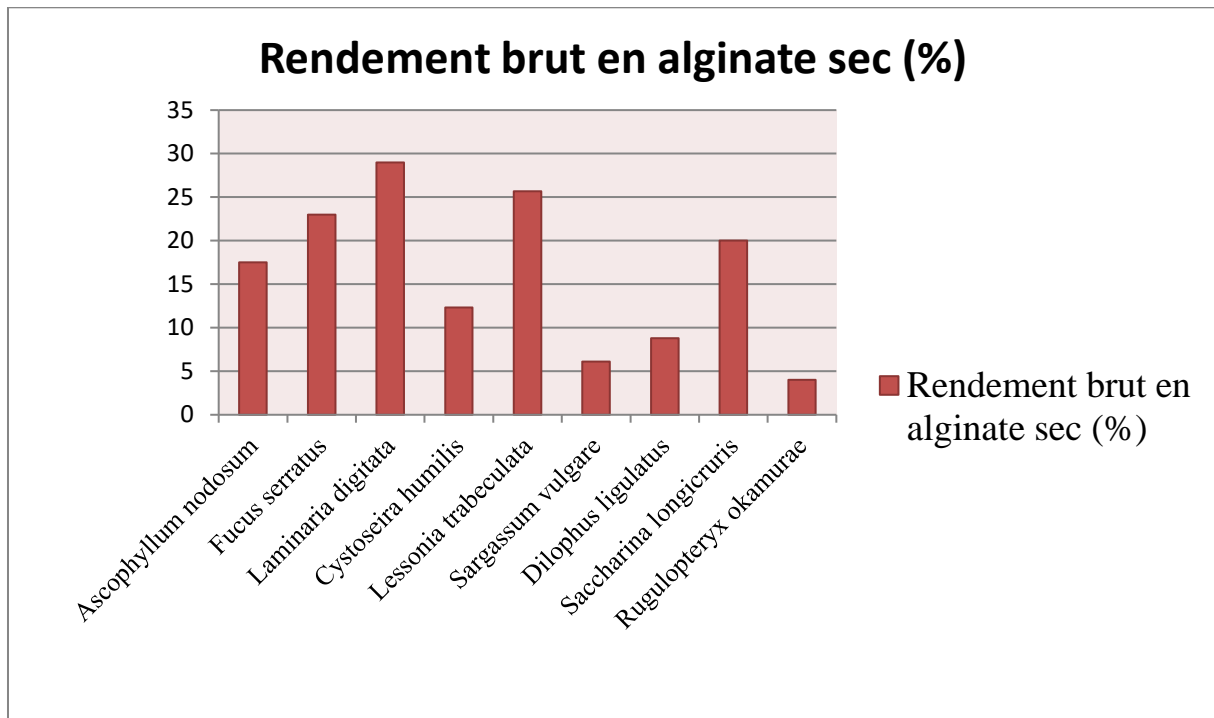
D'un côté, la composition biochimique de la paroi cellulaire de *R.okamurae* pourrait être défavorable à un apport en alginate sous des quantités significatives, ne pouvant être, soit pas très abondant, soit proche d'autres types de structures, donc peu accessible lors du processus d'extraction.

D'un autre côté, la présence à la fin du processus de fragments algaux plus ou moins intacts témoigne d'une extraction plutôt parcellaire du contenu pariétal, à n'en pas douter empêché par une architecture cellulaire particulièrement dense et dure.

## Résultats et discussion

Il est également possible que la structure de la paroi ayant moins de charge en acides uroniques (mannuronique et guluronique) majeurs dans l'alginate soit responsable de la très faible teneur.

A cela s'ajoute la possibilité d'un protocole alcalin conventionnel peu efficace à traiter une telle espèce, entraînant une solubilisation partielle des polymères cibles.



**Figure 27:** Représentation graphique montre Comparaison des rendements bruts en alginate sec (%) de différentes espèces d'algues.

Dans ce qui suit, nous ne procéderons pas à la mesure de la viscosité de l'alginate extrait, tant à cause de sa faible quantité (rendement brut de 4 %) que de la qualité relativement médiocre du produit final, sous forme de poudre amorphe non filamentaire. En allant dans ce sens, la viscosité ne représenterait pas un indicateur digne de foi de ses propriétés fonctionnelles effectives. Par ailleurs, elle nous semble devoir éviter des biais d'interprétation de sorte qu'une masse prélevée trop faible, peu homogène ne permettrait pas l'efficacité de la mesure physico-chimique ainsi présente, ce qui entraînerait également le caractère peu fiable, voire contestable scientifiquement de cette opération.



# Conclusion



### Conclusion

Ce projet de recherche est motivé par une démarche de valorisation des ressources marines locales, présentant notamment l'algue brune invasive *Rugulopteryx okamurae* observée pour la première fois sur les côtes ouest algériennes en 2024. Ce travail s'est focalisé sur la détermination de la faisabilité d'une extraction d'alginate de cette biomasse au moyen d'un protocole classique comportant extraction alcaline, précipitation acide et purification.

Les résultats expérimentaux prouvent que, malgré la grande disponibilité de cette algue dans les zones envahies par son implantation, *Rugulopteryx okamurae* ne semble pas être une matière première adéquate pour la production d'alginate dans ces conditions : le rendement brut ne s'est élevé qu'à 4 % du poids de matière première, soit très inférieure aux valeurs généralement constatées pour les algues industrielles de référence comme *Laminaria digitata* (22–36 %), *Ascophyllum nodosum* (15–20 %), ou *Fucus serratus* (18–28 %). Le gel obtenu en fin de traitement est de surcroît de couleur brune, visqueuse, adhésive, non structurée ; il semble avoir encore conservé des fragments tissulaires algaux visibles, ce qui témoigne d'une extraction incomplète du polymère pariétal.

Différents facteurs pourraient expliquer cette courte distance à l'objectif, que nous ne détaillerons pas ici. D'une part, il est possible que la structure spécifique de la paroi cellulaire de *R. okamurae*, constituée principalement de polysaccharides polyphénoliques et de composants structuraux plus denses, entrave la diffusion des réactifs et empêche l'extraction de l'alginate.

D'autre part, la quantité intrinsèque d'acides uroniques, acide mannuronique et acide guluronique, qui sont les unités constitutives de l'alginate, pourrait être faible ou fortement confinée au sein de structures peu accessibles dans cette espèce.

Une troisième explication pourrait tenir au fait que le protocole d'extraction standard (alcalin) qui est efficace pour les algues mieux connues ne s'applique pas à la spécificité de l'organisation de cette matrice biologique.

Sur le terrain, les propriétés organoleptiques du produit final sous forme de poudre amorphe, inodore, beige à brun clair montrent que l'extrait produit a une qualité modeste, peu conforme aux normes exigées pour ses applications potentielles en secteur industriel agro- alimentaire, biomédical ou cosmétique. Dans l'état actuel, le potentiel de valorisation de *R.okamurae* en matière première pour la fabrication industrielle d'alginate commercial est donc limité.

### Perspectives

Si l'on ne peut déduire de ces résultats que l'alginate de *R.okamurae* ne sera jamais exploitable, on pourra plutôt envisager qu'il sert de point de départ à une meilleure compréhension de la spécificité biochimique de cette algue et de l'optimisation des procédures d'extraction envisagées. Ainsi, plusieurs pistes de recherche se dégagent des travaux présentés ici :

- **A l'épreuve des améliorations du protocole d'extraction envisagées** : traiter les algues avec des enzymes préalablement ou utiliser des solvants alternatifs (chélates, agents complexant...) pourrait permettre de casser plus efficacement la structure pariétale et de libérer plus d'alginate.

- A la caractérisation plus précise de la paroi cellulaire, à travers une analyse fine de sa composition biochimique (cellulose, lignine marine, phlorotannins, etc.) afin mieux cibler les freins à la libération des polysaccharides.

- **Enfin à la recherche d'autres métabolites d'intérêt** : *R. okamurae* est plutôt riche dans les polyphénols, autres métabolites bioactifs même si l'alginate est faiblement extrait. Une valorisation multi filières (biocarburants, antioxydants, compost marin...) pourrait s'avérer économiquement envisageable.

- **Enfin à des études portant sur l'environnement** : l'exploitation contrôlée des biomasses envahissantes pourrait intégrer la valorisation du milieu côtier pour promouvoir une gestion durable et donc du territoire.

## Références bibliographiques

### A

1. **Akretche, D., & Mokrani, S. (2020).** *Etude bibliographique portant sur les activités biologiques des algues marines* [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou].
2. **Alem, M. (2015).** *Les compléments alimentaires à base d'algues* (Thèse de doctorat en Médecine et Pharmacie, Université Mohammed V, Rabat, Maroc).
3. **Ali El-Gamal, A. (2010).** Biological importance of marine algae. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 18(1), 1-25.
4. **Alvite, N., Díaz, P., Bañón, R., Barreiro, R., et al. (2024).** *Multiple introduction events expand the range of the invasive brown alga *Rugulopteryxokamurae* to northern Spain.* *Aquatic Botany*, 193, 103830.
5. **Arunkumar, K. et al. (2014).** Structural characterization of alginate from brown seaweed. *Int. J. Biol. Macromol.*, 65, 542–548.

### B

6. **Barralon, E. (2016).** *Le manuel du plongeur biologiste les végétaux*. Association Flabelline Plongée, 37p.
7. **Bellissimo, G., Altamirano, M., RománMuñoz, A., De la Rosa, J., Hung, T. H., Rizzuto, G., Vizzini, S., & Tomasello, A. (2024).** *The invasive brown seaweed *Rugulopteryxokamurae* (Dictyotales, Ochrophyta) continues to expand: First record in Italy.* Article accepté – en cours de publication.
8. **Benyahia, D., & Dadouche, A. (2019).** *Inventaire préliminaire de la flore algale de la côte Ouest de Bejaia : Cas de Sahel* (Mémoire de fin d'études, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A).
9. **Benzana, K. (2018).** *Synthèse et caractérisation de nouveau gel à base d'alginate pour la dépollution des eaux* (Mémoire de Master, Université de Khemis Miliana - Tiaret).
10. **Berrouane, H. F. Z., & Bouaissi, L. N. (2023).** *Valorisation des bioressources marines dans des formulations pharmaceutiques* [Mémoire de master, Université de Blida 1].
11. **Bottalico, A., Tursi, A., & Mincuzzi, A. (2024).** *Eastward spreading of the invasive *Rugulopteryxokamurae* (Heterokontophyta, Dictyotales) in the Mediterranean: First record in the Adriatic Sea.* *Mediterranean Marine Science*.

## Références bibliographiques

---

12. **Boudouresque, C. F., Meinesz, A., & Verlaque, M. (1992).** *Guide des algues des mers d'Europe*. Ed. Delacaux et Niestlé. France. 23p.

### C

13. **Chouikhi, A. (2013).** *Les applications potentielles des macroalgues marines et les activités pharmacologiques de leurs métabolites : Revue*. USTHB-FBS-4th International Congress of the Populations & Animal Communities —Dynamics & Biodiversity of the Terrestrial & Aquatic Ecosystems "CIPCA4", Taghit (Bechar), Algérie.
14. **Chopin, T., et al. (1995).** *Valorisation des algues pour les industries agro-alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques* [Communication présentée à une conférence, Université du Nouveau-Brun
15. **Chandía, N. P., Matsuhira, B., & Vásquez, A. E. (2001).** Alginates from *Lessoniatrabeculata* and *Lessonianigrescens* (Phaeophyta) from Chilean coasts. *Carbohydrate Polymers*, **46**, 81–87.
16. **Chan, L.L. et al. (2014).** Effect of extraction conditions on yield and gel strength of alginate. *Carbohydrate Polymers*, **99**, 462–469

### D

17. **Daude, L. (2021).** *L'utilisation des algues en pharmacie et parapharmacie* [Mémoire de Master, Université d'Angers]. DUMAS. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-0359745>.
18. **Dhargalkar, V. K., & Pereira, N. (2005).** *Seaweed: Promising plant of the millennium*. Science and Culture.
19. **Díaz-Tapia, P., et al. (2023).** *Invasion of *Rugulopteryx okamurae* in Mediterranean ecosystems: A growing threat*. *Marine Biodiversity Records*, **16**, 123–135.
20. **Djebri, N., Boukhalfa, N., & Boutahala, M. (2018).** *Les alginates et leurs applications en ingénierie: Application à la construction d'un biomatériau*. Laboratoire Matériaux et Systèmes Electroniques (LMSE), Université de Bordj Bou Arreridj; Laboratoire de Génie des Procédés Chimiques (LGPC), Université Ferhat Abbas Sétif-1.
21. **Donati, I. (2009).** Material properties of alginates. In B. H. A. Rehm (Ed.), *Alginates: Biology and Applications* (pp. 23-44).

## Références bibliographiques

---

22. **Draget, K. I., & Smidsrød, O. (2005).** Alginates from algae. In A. Steinbüchel & S. K. Rhee (Eds.), *Polysaccharides and Polyamides in the Food Industry: Properties, Production, and Patents* (pp. 133-130).

### E

23. **Elmtili, N., FakihiKachkach, F. Z., & El Harchi, M. (2014).** *Les algues marines: Nouvelle potentialité économique pour le Maroc. Quelle stratégie biotechnologique.* Cahiers UAE, 8-9-1-7.
24. **Evans, L. R., & Linker, A. (1973).** *Production and characterization of alginates by Pseudomonas aeruginosa.* Journal of Bacteriology, 116(2), 915-924

### F

25. **Faller, H. (2011).** *Les applications et la toxicité des algues marines* (Thèse de doctorat, Université de Limoges, p. 11).
26. **Fleurence, F., & Kaas, R. (1999).** *Les algues marines: Une source méconnue de protéines végétales.* Equinoxe 56: 12-7.

### G

27. **Garon-Lardière, S. (2004).** *Étude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge Asparagopsis armata (Bonnemaisoniales)* (Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale).
28. **Gayral, P. (1975).** *Les algues : morphologie, cytologie, reproduction et écologie.* Ed. Doin, Paris. 166p
29. **Géraldine, D., & Céline, L. (2009).** *Les algues, le trésor de la mer.* Haute École de Santé Genève.
30. **Goh, C.H. et al. (2012).** *Extraction and characterization of alginate from brown seaweed.* Food Hydrocolloids, 27(1), 33-42.

### H

31. Haug, A., Larsen, B., & Smidsrød, O. (1966). *A study of the constitution of alginic acid by partial acid hydrolysis. Acta Chemica Scandinavica*, 20, 1833-190.
32. Hentati, F., Delattre, C., Ursu, A. V., Desbrières, J., Le Cerf, D., Gardarin, C., Abdelkafi, S., Michaud, P., & Pierre, G. (2018). *Structural characterization and antioxidant activity of water-soluble polysaccharides from the Tunisian brown seaweed Cystoseira compressa. Carbohydrate Polymers*, 198, 589–600.
33. Holdt, S. L., & Kraan, S. (2011). *Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. Journal of Applied Phycology*, 23(3), 543–597.
34. Hwang, I.-K., Lee, W. J., Kim, H.-S., & De Clerck, O. (2009). *Taxonomic reappraisal of Dilophusokamurae (Dictyotales, Phaeophyta) from the western Pacific Ocean. Phycologia*, 48(1), 1–12.

### I

35. Ibouzifen, S., et Benmouhoub, W. (2020). *Extraction des alginates de sodium à partir des algues brunes* [Mémoire de master, Université Amira - Béjaïa].

### K

36. Khotimchenko S. V, 2003. *Distribution of glyceroglycolipids in marine algae and grasses. Chem. Nat. Cmpd.* 38(3): 223-229
37. Kim, S.-K., Ravichandran, Y. D., Khan, S. B., & Kim, Y. T. (2008). *Prospective of the cosmeceuticals derived from marine organisms. Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 13(5), 511-5
38. Kloareg, B., & Quatrano, R. S. (1988). *Structure of the cell walls of marine algae and ecophysiological functions of the matrix polysaccharides. Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 26, 259-315.

## Références bibliographiques

---

### L

39. **Laplace-Treyture, C., Peltre, M.-C., Lambert, E., Rodrigue, S., Vergon, J.-P., & Chauvin, C. (2014).** *Guide pratique de détermination des algues*. Ifremer.
40. **Bashford, L. A., Thomas, R. S., & Woodman, F. N. (1950).** *Alginic acid. II. The influence of conditions of extraction on yield and properties. Journal of the Society of Chemical Industry*, 69, 337–343. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010690910>.
41. **Leclerc, V., & Floc'h, J.-Y. (2010).** *Les secrets des algues*. Éditions Quae.
42. **Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012).** Alginate: Properties and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 37(1), 106–126.
43. **Lesueur, M., Lucas, S., & autres auteurs. (2014).** *Étude nationale de la consommation d'algues alimentaires : Contexte et méthodologie* (Programme IDEALG Phase 1). FranceAgriMer.
44. **Louni, S. (2018).** *Déformation plastique dans des empilements de capsules* [Mémoire de Projet de Fin d'Études, École Nationale Polytechnique].

### M

45. **Matanjum P., Mohamed, S., Mustapha, N.-M., & Muhammed, K. (2009).** Nutrient content of tropical edible seaweeds, *Eucheuma cottonii*, *Caulerpa lentillifera* and *Sargassum polycystum*. *Journal of Applied Phycology*, 21(1), 75–80.
46. **Marfaing, H. (2004).** *Les algues dans notre alimentation : Intérêt nutritionnel et utilisations*. CEVA - Centre d'Étude et de Valorisation des Algues.
47. **Mérigout, P. (2006).** *Étude du métabolisme de la plante en réponse à l'apport de différents fertilisants et adjuvants culturaux. Influence des phytohormones sur le métabolisme azoté* [Thèse de doctorat, INRA Paris-Grignon].
48. **Missiaen, V. (2024).** *Fucus vesiculosus : Bienfaits, utilisations et contre-indications*. Herboristerie du Valmont.
49. **Mirshafiey, A., & Rehm, B. H. A. (2009).** Alginate and its comonomer mannuronic acid: Medical relevance as drugs. In B. H. A. Rehm (Ed.), *Alginates: Biology and Applications* (pp. 230–231). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-92679-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92679-5_10)

## Références bibliographiques

---

50. **Mokrani, N. (2013).** *Préparation et étude du comportement de membranes biopolymères alginate de sodium/chitosane* [Thèse de magister en Génie des Polymères, Université Mohamed Bougara Boumerdes].

### N

51. **Naseri, A., Holdt, S. L., & Jacobsen, C. (2016).** *Bioactive compounds in industrial red seaweed used in carrageenan production.* Communication présentée au 22nd International Seaweed Symposium, Copenhague, Danemark.

### O

52. **49. Oucif, H. (2018).** *Valorisation des algues de la côte Ouest algérienne : Potentiel antioxydant et hormonal* [Thèse de doctorat, Université d'Oran Ahmed Ben Bella].

### P

53. **Palluault, V. (2010).** *Nouveaux traitements de surface respectueux de l'environnement par des gels polymères réticulables : Application à la préparation des surfaces d'usage dans le secteur aéronautique* [Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1].
54. **Pérez, R. (1997).** *Ces algues qui nous entourent : Conception actuelle, rôle dans la biosphère, utilisations, culture* (272 p.). Ifremer.
55. **Person, J. (2011).** *Livre turquoise – Algues, filières du futur* (182 p.). Éditions Adebitech.

### Q

56. **Qin, Y. (2004).** *Absorption characteristics of alginate wound dressings.* *Journal of Applied Polymer Science*, 91(2), 953–957. <https://doi.org/10.1002/app.13204>

### R

57. **Radmer, R. (1996).** Algal diversity and commercial algal products: New and valuable products from diverse algae may soon increase the already large market for algal products. *BioScience*, 46(4), 263–270. <https://doi.org/10.2307/1312897>
58. **Raimundo, S. C., Avci, U., Hopper, C., Pattathil, S., Hahn, M. G., & Popper, Z. A. (2015).** Immunolocalization of cell wall carbohydrate epitopes in seaweeds: Presence of land plant epitopes in *Fucus vesiculosus* L. (Phaeophyceae). *Planta*, 242(2), 435–443. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2307-5>
59. **Rioux, L. E. (2005).** *Caractérisation rhéologique des alginates polysaccharides extraits des algues brunes* [Thèse de doctorat, Université Laval].
60. **Pérez, R., Kaas, R., Campello, F., Arbault, S., & Barbaroux, O. (1992).** *Guide de l'utilisateur des algues marines*. Ifremer.

### S

61. **Salhi, A., & Bouissaha, C. (2019).** Valorisation de la biomasse algale de l'Algérie : potentialités pharmacologiques (Mémoire de Master, Université KasdiMerbah Ouargla).
62. **Salisu, A., Naim, A. A., & Sanagi, M. M. (2013).** Chemical modification of marine polysaccharide (alginate) by free-radical graft copolymerization: A short review. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 4(3), 39-44.
63. **Sempere-Valverde, J., García-Gómez, J. C., OstaléValriberas, E., & Espinosa, F. (2019).** *Expansion of the exotic brown algae Rugulopteryxokamurae (E.Y. Dawson) I.K. Hwang, W.J. Lee & H.S. Kim in the Strait of Gibraltar* [Communication scientifique, congrès].
64. **Soler-Vila et al. (2022).** Macroalgae Fact sheets (2nd Edition), Galway, Ireland. 64 pp
65. **Szekalska, M., Pucilowska, A., Szymańska, E., Ciosek, P., & Winnicka, K. (2016).** Pharmaceutical and biomedical applications of alginate. *BioMed Research International*, 2016, Article ID 4047926.

## Références bibliographiques

---

### V

66. **Vauchel, P. (2007).** *Optimisation de procédés innovants pour l'obtention de phyco colloïdes* [Thèse de doctorat en Mécanique, Thermique et Génie Civil, Université de Nantes].
67. **Venkatesan, J., Lowe, B., Anil, S., Manivasagan, P., Kheraif, A. A. A., & Kang, K.-H. (2015).** *Seaweed polysaccharides and their potential biomedical applications.* *Starch – Stärke*, 67(5–6), 381–390. <https://doi.org/10.1002/star.201400328>
68. **Vincent, E. (2010).** *Les alginates et leurs applications en pharmacie et en ingénierie : Application à la construction d'un biomatériau* [Thèse de doctorat en sciences pharmaceutiques, Université de Paris].

### W

69. **Wahl, M., Jormalainen, V., Eriksson, B. K., Coyer, J. A., ... (2011).** Stress Ecology in *Fucus*: Abiotic, Biotic and Genetic Interactions. *Advances in Marine Biology*, 60, 1-136.
70. **Wehr John Robert Sheath J. Patrick Kociolek, (2015).** *Freshwater Algae of North America.* 2nd Edition. Ecology and Classification. University of Colorado, Boulder, USA. 1066 page.
71. **Wilson, K., Skinner, M. A., & Lotze, H. K. (2019).** *Projected 21st-century distribution of canopy-forming seaweeds in the Northwest Atlantic with climate change.* *Diversity and Distributions*, 1 25(7), 1081-1097.

### Y

72. **Yan, X., Nagata, T., & Fan, X. (1998).** Antioxidative activities in some common seaweeds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 52(3), 253–262. <https://doi.org/10.1023/A:1008007711160>.

### Z

73. **Zitouni, H. (2015).** *Valorisation nutritionnelle d'algues marines du littoral algérien chez le ruminant via des méthodes chimiques, biologiques et moléculaires* [Thèse de doctorat, Université de Constantine].
74. **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 Tunis El Manar].
75. **Zrid, R., Bentiss, F., Attoumane Ben Ali, R., Belattmania, Z., Zarrouk, A., Elatouani, S., Eddaoui, A., Reani, A., & Sabour, B. (2016).** Potential uses of the brown seaweed *Cystoseira humilis* biomass: Sodium alginate yield, FT-IR, <sup>1</sup>H NMR and rheological analyses. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(2), 613–620.

# Références bibliographiques

## Annexe 01

**Tableau 05:** Produits chimiques utilisées

| Réactifs et solvants | Formule chimique                   | Pureté (%) | M (g/mol) |
|----------------------|------------------------------------|------------|-----------|
| Eau distillée        | H <sub>2</sub> O                   | N/A        | 18.015    |
| Hydroxyde de sodium  | NaOH                               | 97         | 40        |
| Acide chlorhydrique  | HCl                                | 37         | 36.461    |
| Éthanol              | CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH | 96         | 46        |

## Annexe 02

**Tableau 06:**Matériel de laboratoire utilisé

| Verrerie de laboratoire   | Petit Matériel  |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Bêcher , Entonnoir</li><li>➤ Ballon</li><li>➤ Spatule</li><li>➤ E(enmeyer</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Filtre (papier ou tissu)</li><li>➤ Bain-marie ou plaque chauffante</li><li>➤ Agitateur magnétique ou manuel</li><li>➤ Tamis ou tamis métallique</li><li>➤ Etuve</li></ul> |