

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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



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

D'ingénieur et du master en sciences de la mer

Options : Biotechnologie marine

Thème :

Extraction et valorisation des polyphénols à partir de la spiruline

Présenté par :

LAHRACHE Amira Nour Elhouda

ZAHRA Rania

Soutenu le 07-07-2025 devant le jury :

Mr. KADA Mohamed

MAA

Président

Mme BOUKHEROUBA Aya

MCB

Examinatrice

Mr. BOUGHERIRA Abdelhak

MAA

Promoteur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements et dédicaces

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier الله Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail pour arriver à ce jour-là.

فאלلهم لك الحمد كما ينبغي لجلال وجهك وعظيم سلطانك

Ce travail n'aurait jamais pu atteindre cette richesse ni voir le jour sans l'accompagnement attentif et bienveillant de **Monsieur BOUGHERIRA Abdelhak**. Nous lui adressons nos remerciements les plus sincères pour son encadrement rigoureux, ses conseils avisés, ses remarques pertinentes, sa disponibilité constante, ainsi que pour sa patience et son soutien tout au long de ce projet nous exprimons également notre profonde gratitude à l'ensemble de nos enseignants de l'ENSSMAL qui, tout au long de notre formation, ont su éveiller en nous la curiosité scientifique et nous transmettre les connaissances nécessaires pour franchir cette étape importante. Merci à chacun d'entre vous.

Nos remerciements les plus chaleureux vont à **Madame AMROUCHE Lynda**, pour son soutien moral indéfectible, sa disponibilité, ses remarques constructives et ses réponses précieuses à nos nombreuses questions. Son écoute a grandement facilité notre travail.

Nous souhaitons également remercier **Madame GUEROUMI Houda**, ingénieure de laboratoire à l'ENSSMAL, pour son aide technique précieuse, sa disponibilité et sa gentillesse tout au long de nos manipulations expérimentales.

Nos remerciements vont également à **toute l'équipe de SAIDAL** qui nous a accueillies avec chaleur et professionnalisme. Un grand merci à **Monsieur LAIDI Karim**, **Monsieur BENYAHIA Mohamed**, ainsi qu'à toute l'équipe du laboratoire de microbiologie et du laboratoire d'animalerie pour leur assistance, leur encadrement, leur disponibilité et leurs conseils éclairés.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, nous exprimons ici notre reconnaissance la plus sincère.

Nous tenons enfin à remercier chaleureusement **le jury**, pour avoir accepté d'évaluer notre travail et nous avoir offert l'opportunité de le présenter.

Dédicaces

À **ma chère mère**,

Je te dédie ce travail avec tout mon amour et ma reconnaissance. Merci pour ton soutien, ta patience et tes sacrifices constants. Merci pour chaque prière chuchotée en secret. Ta force tranquille m'a appris la patience et la détermination, ton regard bienveillant m'a rappelé qui je suis, et ton soutien a été ma lumière dans les moments d'incertitude.

À **mon père**. Merci pour ta confiance. Pour ta rigueur, tes conseils, et cette fierté discrète que tu ne montrais pas toujours, mais que je sentais. Ta présence, parfois silencieuse mais toujours solide, a été une base sur laquelle j'ai pu construire mes ambitions.

À **mes frères**, Redha et Zakaria, merci pour votre présence rassurante. Vous avez été, à votre manière, un soutien stable dans cette aventure.

À **mes grands-parents**, véritables symboles d'amour, de simplicité.

Ma reconnaissance va également à **mon oncle Mohamed**, pour ses paroles toujours réconfortantes.

À ma chère **Nesrine**, pour son amitié sincère, sa présence fidèle.

À cette petite fille que j'étais merci pour avoir tenu bon malgré les moments de doute, pour avoir persévéré avec passion, courage et détermination.

L. Amira Nour Elhouda

Je dédie ce travail du fond du cœur à ma mère, mon pilier inébranlable, qui a été à mes côtés à chaque instant, m'offrant un soutien sans faille et un amour inconditionnel

À mon père, qui est décédé, mais dont la présence reste vivante dans mon cœur chaque jour. J'aurais tant souhaité qu'il soit là pour partager avec moi cette étape si précieuse de ma vie.

À mon mari, mon compagnon de vie, qui n'a jamais cessé de croire en moi, m'encourageant avec patience, me donnant la force d'avancer même quand le chemin semblait ardu.

À mes sœurs, à mes frères, ainsi qu'à ma belle-famille, dont le soutien sincère et les encouragements chaleureux ont été un véritable réconfort tout au long de cette aventure.

Merci à vous tous, qui avez contribué à rendre ce parcours possible.

Je tiens également à me remercier pour la persévérance, la patience et la détermination dont j'ai fait preuve tout au long de ce parcours. Ce travail est le fruit de mes efforts, de mon engagement et de ma volonté de toujours avancer, malgré les défis rencontrés.

Z. Rania

Table de matières

REMERCIEMENTS ET DEDICACES	I
TABLE DE MATIERES	V
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX	XI
LISTE DES ABREVIATIONS	XIV
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SPIRULINE	4
1.1 HISTORIQUE DE LA SPIRULINE	5
1.2 BIOLOGIE	6
1.2.1 Présentation de la spiruline	6
1.3 TAXONOMIE	7
1.3.1 Classification	8
1.4 MORPHOLOGIE (STRUCTURE)	8
1.5 REPRODUCTION ET CYCLE BIOLOGIQUE	9
1.6 HABITAT NATUREL ET REPARTITION GEOGRAPHIQUE DE LA SPIRULINE	10
1.6.1 Répartition géographique de la spiruline	10
1.6.2 Distribution mondiale et plasticité écologique	10
1.7 COMPOSITION ET VALEUR NUTRITIONNELLE	11
1.7.1 Les protéines	11
1.7.2 Les lipides	11
1.7.3 Les acides gras	12
1.7.4 Les glucides	12
1.7.5 Les acides nucléiques	12
1.7.6 Les vitamines	13
□ Vitamines liposolubles	13
□ Les vitamines hydrosolubles	13
1.7.7 Les pigments	14
□ Phycocyanine	14
□ La chlorophylle	14
□ Les caroténoïdes	14
1.7.8 Les enzymes	15
1.7.9 Les minéraux et oligo-éléments	15
1.8 APPLICATION	16

1.8.1	En alimentation humaine -----	16
1.8.2	En alimentation animale -----	16
1.8.3	En cosmétique -----	17
1.9	LES EFFETS BIOLOGIQUE DE LA SPIRULINE -----	17
1.9.1	Les effets antioxydants -----	17
1.9.2	Les effets antiviraux -----	17
1.9.3	Les effets anti-inflammatoires -----	18
1.9.4	Les effets anticancéreux -----	18
1.9.5	Les effets probiotiques -----	19
1.9.6	Les effets antitoxiques -----	19
 CHAPITRE 2 : GENERALITES		
	POLYPHENOLS -----	21
2.1	PRESENTATION GENERALE SUR LES POLYPHENOLS -----	22
2.2	ROLES ET INTERETS DES POLYPHENOLS -----	22
2.2.1	Chez les végétaux -----	22
2.2.2	Chez l'humain -----	23
2.3	CLASSIFICATION ET STRUCTURE DES POLYPHENOLS -----	23
2.3.1	Les flavonoïdes -----	24
2.3.1.1	Flavan-3-ols ou flavanols -----	25
2.3.1.2	Flavones -----	25
2.3.1.3	Flavanones -----	26
2.3.1.4	Les anthocyanes -----	26
2.3.1.5	Isoflavones -----	26
2.3.2	Les non-flavonoïdes -----	26
2.3.3	Les acides phénoliques -----	26
2.3.4	Les stilbènes -----	27
2.3.5	Les lignanes -----	27
2.3.6	Les coumarines -----	27
2.3.7	Les tanins -----	28
2.3.7.1	Tanins hydrolysables ou galliques -----	28
2.3.7.2	Les tanins condensés -----	28
2.4	PROPRIETES CHIMIQUES DES POLYPHENOLS -----	28
2.4.1	Nucléophilie -----	29

2.4.2	Propriétés réductrices -----	29
2.4.3	Polarisabilité-----	29
2.4.4	Liaisons hydrogène -----	29
2.4.5	Acidité-----	29
2.4.6	Activité antioxydante des polyphénols -----	30
2.5	PROPRIETE BIOLOGIQUE DES POLYPHENOLS -----	30
2.5.1	Propriétés antimicrobiennes-----	30
2.5.2	Propriétés cardioprotectrices -----	31
2.5.3	Propriétés anticancéreuses-----	31
2.5.4	Propriétés anti-hémolytiques-----	32
2.5.5	Propriétés anti-inflammatoires-----	32
	CHAPITRE 3 : MATERIELS ET METHODES -----	34
3.1	OBJECTIF -----	35
3.2	LIEUX DE TRAVAIL-----	35
3.3	MATERIELS ET PRODUITS UTILISES -----	36
3.3.1	Matériels et produits chimique-----	36
3.3.2	Matériel biologique-----	36
3.4	METHODES D'EXTRACTION DES POLYPHENOLS A PARTIR DE LA MATIERE SECHE	
	ARTHROSPIRA PLATENSIS-----	38
3.4.1	Extraction (solide / liquide) par macération hydro-éthanolique -----	38
3.4.2	Extraction (solide / liquide) par macération hydro-méthanolique -----	39
3.4.3	Extraction (solide / liquide) avec de l'eau chaude -----	40
3.5	LES TESTS PHYTOCHIMIQUES -----	42
3.6	DOSAGE DES POLYPHENOLS TOTAUX-----	43
3.7	EXTRACTION DES FLAVONOÏDES (LIQUIDE / LIQUIDE) -----	44
3.8	CARACTERISATION DES COMPOSEES PHENOLIQUE PAR CHROMATOGRAPHIE SUR	
	COUCHE MINCE (CCM)-----	48
3.9	ÉVALUATION DES ACTIVITES BIOLOGIQUES DES POLYPHENOLS DE LA SPIRULINE -	51
3.9.1	Activité antioxydante-----	51
3.9.1.1	Dosage de l'activité antioxydante par la méthode DPPH -----	52
3.9.2	Evaluation de l'activité antibactérienne et antifongique des extraits obtenus-----	53
3.9.3	Activité anti-inflammatoire : -----	58
3.10	FORMULATION DU GEL NETTOYANT-----	60

3.11	TEST DE TOLERANCE CUTANE	60
3.12	LE TEST MICROBIOLOGIQUE DU PRODUIT FINAL	61
CHAPITRE 4 :RESULTATS ET DISCUSSION		65
4.1	TESTS PHYTO-CHIMIQUES	66
4.2	RENDEMENT D'EXTRACTION DES COMPOSES PHENOLIQUES TOTAUX	67
4.3	DOSAGE DES POLYPHENOLS TOTAUX	67
4.3.1	Droite d'étalonnage de l'acide gallique	67
4.3.2	Evaluation de la teneur en polyphénols totaux	68
4.4	EXTRACTION DES FLAVONOÏDES	69
4.5	CRIBLAGE CHROMATOGRAPHIQUE DES COMPOSES PHENOLIQUES ET FLAVONOÏDES	70
4.6	ÉVALUATION DES ACTIVITES BIOLOGIQUES DES POLYPHENOLS DE LA SPIRULINE	72
4.6.1	Activité antioxydante	72
4.6.2	Évaluation de l'activité anti-inflammatoire	74
4.6.3	Evaluation d'activité antibactérienne et antifongique	75
4.7	MISE EN EVIDENCE QUALITATIVE DES PROTEINES	79
4.8	FORMULATION DU GEL NETTOYANT VALORISANT LES POLYPHENOLS DE SPIRULINE	80
4.9	RESULTATS DU CONTROLE MICROBIOLOGIQUE	80
4.10	RESULTATS DE LA TOLERANCE CUTANEE	82
CONCLUSION		84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		87
RESUME		93
LES ANNEXES		94

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1 : Morphologie de la spiruline. (Ciferri, 1983)

Figure 2 : Les différents aspects de la spiruline. (A) spiralée, (B) ondulée, (C) droite. (Hajati et Zaghari, 2019)

Figure 3: cycle de vie de la spiruline. (Ciferri, O. 1983)

Figure 4: Composition chimique de la spiruline (Lecointre, 2017).

Figure 5: Structure générique d'une molécule de flavonoïdes (Balasundram et al., 2006).

Figure 6 : Les sous classe de flavonoïdes (Archivio et al.,2007)

Figure 7: k MARINE fournisseur de la poudre utiliser

Figure 8: les lapins utilisés pour le test de tolérance cutané

Figure 9: les souris utilisées pour l'évaluation de l'activité anti-inflammatoire des extraits de spiruline (originale).

Figure 10 : souches ATCC (originale).

Figure 11: diagramme de l'extraction hydro-alcoolique.

Figure 12: diagramme d'extraction aqueuse

Figure 13: Une gamme étalon d'acide gallique avec différentes concentrations

Figure 14: diagramme d'extraction liquide / liquide.

Figure 15: Les étapes de la méthode d'extraction liquide-liquide

Figure 16: la plaque en aluminium utilisé pour la CCM

Figure 17: révélation chimique avec l'acide sulfurique.

Figure 18: Réaction d'une molécule antioxydant avec le radical DPPH (Liang &Kitts, 2014)

Figure 19: la gamme d'étalonnage préparées.

Figure 20: les étapes de pré cultures à partir des souches ATCC

Figure 21: Sabouraud

Figure 22: gélose nutritive

Figure 23: les disques d'antibiotique (6mm)

Figure 24: préparation des antibiotiques

Figure 25: lecture spectrophotométrique

Figure 26: préparation d'inoculum

Figure 27: Coulage du milieu Mueller-Hinton (MH) dans les boites à Petri.

Figure 28: prélèvement et l'ensemencement des suspensions microbiennes

Figure 29: lecture des résultats de zone d'inhibition.

Figure 30: mesure de l'œdème de patte avec un pied à coulisse.

Figure 31: *application du produit*

Figure 32: Recherche de la flore totale aérobie mésophile

Figure 33: Recherche des levures et moisissures

Courbe d'étalonnage pour le dosage de polyphénols totaux (PPT) Cette courbe est établie en utilisant l'acide gallique comme référence. La courbe d'étalonnage est établie avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,9946$ (**Figure 34**)

Figure 35: courbe d'étalonnage d'acide gallique

Figure 36: résultat de test de biuret

Figure 37: Histogramme représentant le pourcentage d'inhibition du radical DPPH par l'extrait n-butanol et l'acide ascorbique à différentes concentrations.

Figure 38: Variation du volume d'œdème (mm) au cours du temps après injection de carraghénine

Figure 39: Pourcentage d'inhibition de l'œdème induit par la carraghénine chez la souris

Figure 40: les résultats des diamètres des zones d'inhibition (mm) de la croissance des souches vis-à-vis des deux extraits

Figure 41: Pouvoir antibactérien des extraits (butanolique et éthanolique) antibactérien de l'extrait éthanolique sur : (a) : *Escherichia coli* ; (b) : *Staphylococcus aureus*; c : *Pseudomonas aeruginosa*.

Figure 42: Pouvoir antifongique de l'extrait éthanolique et butanolique sur : (a) *Candida albicans* ; (b) : *Aspergillus brasiliensis*

Figure 43: résultat de la flore totale aérobie mésophile sur milieux PCA

Figure 44: résultat de la flore fongique isolée sur milieux SDCA

Liste des tableaux

Tableau 1 : Confusions liées au terme de spiruline. (Antenna technologies, 2009) 1

Tableau 2: teneur en acides nucléiques de quelques aliments (Flaquet and Hurni, 2006).

Tableau 3: Teneurs en pigments exprimées en mg pour 10g de matière sèche de *S. plantensis* (Pierlovisi, 2007)

Tableau 4: Composition en minéraux de la Spiruline et doses requises (FALQUET, 2006).

Tableau 5: résume le rôle de différents polyphénols dans la santé humaine. (BAHORUN,1997)

Tableau 6: tableau récapitulatif du matériels et produits utilisés en laboratoire.

Tableau 7: les souches microbiennes testées

Tableau 8: Résultats des tests phytochimiques des extraits de spiruline

Tableau 9: Poids d'extrait sec et rendement correspondant des trois méthodes d'extraction des composés phénoliques

Tableau 10: Teneur en polyphénols totaux des extraits de spiruline exprimée en mg EAG/g de matière sèche

Tableau 11: Rendements des extraits secs obtenus par phase d'extraction liquide-liquide

Tableau 12 : Résultats de la chromatographie sur couche mince (CCM) des extraits de spiruline selon trois méthodes d'extraction

Tableau 13: Pourcentage d'inhibition du radical DPPH par l'extrait n-butanol et l'acide ascorbique à différentes concentrations

Tableau 14: Résultats de l'évaluation de l'activité antimicrobienne des extraits de spiruline (éthanolique et butanolique) par la méthode de diffusion sur disque.

Tableau 15: Synthèse des propriétés et tests de qualité du gel nettoyant enrichi en polyphénols de spiruline

Tableau 16 : Tableau récapitulatif des résultats microbiologiques

Tableau 17: Résultats des observations de la tolérance cutanée

Liste des abréviations

- % : Pourcentage
- % **mat. sèche** : Pourcentage sur matière sèche
- **ABTS⁺** : 2,2'-Azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)
- **ADN** : Acide Désoxyribonucléique
- **AGPI** : Acides Gras PolyInsaturés
- **ALP** : Alkaline Phosphatase (Phosphatase Alcaline)
- **ARN** : Acide Ribonucléique
- **ATCC** : American Type Culture Collection
- **BHA** : ButylHydroxyAnisole
- **BUN** : Blood Urea Nitrogen
- **Ca** : Calcium
- **CCM** : Chromatographie sur Couche Mince
- **cm²** : Centimètre carré
- **Cr** : Chrome
- **Cu** : Cuivre
- **Cu²⁺** : Ion cuivre II
- **DPPH•** : 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle
- **DO** : Densité optique
- **EPPO European and Mediterranean Plant Protection Organization**
- **ERO** : Espèces Réactives de l'Oxygène

- **ERN** : Espèces Réactives de l'Azote
- **Fe** : Fer
- **FeCl₃** : Chlorure ferrique
- **γ-linolénique** : Acide gamma-linolénique (GLA)
- **g** : Gramme
- **H₂SO₄** : Acide sulfurique
- **HCl** : Acide chlorhydrique
- **HPLC** : High Performance Liquid Chromatography
- **IC50** : Inhibitory Concentration 50%
- **in vivo** : Dans l'organisme vivant
- **ISO** : International Organization for Standardization
- **ISO 16212 / NA 8285** : Norme levures et moisissures
- **ISO 18416** : Norme Candida albicans
- **ISO 21149 / NA 8287** : Norme germes aérobies mésophiles
- **ISO 21150** : Norme Escherichia coli
- **ISO 22717 / NA 8292** : Norme Pseudomonas aeruginosa
- **ISO 22718 / NA 8293** : Norme Staphylococcus aureus
- **mg** : Milligramme
- **MH** : Mueller-Hinton
- **Mg** : Magnésium

- **mm** : Millimètre
- **mL** : Millilitre
- **Mn** : Manganèse
- **MS** : Matière Sèche
- **Na** : Sodium
- **NA** : Norme Algérienne
- **nm** : Nanomètre
- **OCDE** : Organisation de Coopération et de Développement Économiques
- **OCDE 404** : Norme pour irritation cutanée (lapin)
- **ONU** : Organisation des Nations Unies
- **PCA** : Plate Count Agar
- **PhOH** : Groupe phénol
- **PI** : Potentiel d'Ionisation
- **PPT** : Polyphénols Totaux
- **Rf** : Rapport frontal
- **RLs** : Radicaux libres
- **R²** : Coefficient de détermination
- **SOD** : Superoxyde Dismutase
- **SDCA** : Sabouraud Dextrose Chloramphenicol Agar
- **Se** : Sélénium

- **UFC** : Unité Formant Colonie
- **UV** : Ultra-violet
- **VRBL** : Violet Red Bile Lactose agar
- **Zn** : Zinc
- **+M** : Effet mésomère donneur
- **-M** : Effet mésomère attracteur
- **µg** : Microgramme
- **µL** : Microlitre
- **µm** : Micromètre
- **µm/s** : Micromètre par seconde

Introduction

L'industrie cosmétique contemporaine connaît une transition majeure vers des ingrédients d'origine naturelle, répondant à la fois aux exigences réglementaires et aux attentes des consommateurs pour des produits sûrs et écologiques. Dans ce contexte, les microalgues émergent comme des ressources prometteuses en raison de leur richesse en molécules bioactives aux propriétés dermatologiques bénéfiques (Stoyneva-Gärtner et al., 2020).

Parmi ces microalgues, *Spirulina sp* qui se distingue par sa morphologie filamenteuse hélicoïdale et sa composition biochimique exceptionnellement riche en métabolites secondaires d'intérêt biotechnologique.

Spirulina platensis présente un profil nutritionnel remarquable, avec une teneur protéique atteignant 60-70% du poids sec, complétée par des acides aminés essentiels, des acides gras polyinsaturés (notamment γ -linoléique), des vitamines (complexe B, E) et des oligo-éléments (Fe, Zn, Se) (Soni et al., 2017). Elle contient également des molécules bioactives, telles que les polyphénols qui présentent un fort potentiel thérapeutique, notamment par leurs effets antioxydants, anti-inflammatoires et antimicrobiens. (Kassi et al., 2014 ; El-Baz et al., 2013 ; Barry et al., 2014).

Aujourd'hui, les polyphénols attirent beaucoup d'attention grâce à leurs bienfaits et face aux demandes des produits cosmétiques naturels, efficaces et respectueux de la peau, l'exploitation des microalgues telles que la spiruline représente une opportunité majeure. Toutefois, l'identification, l'extraction, et la caractérisation des polyphénols issue de la spiruline ainsi que leur intégration dans une formulation stable et tolérable pour la peau soulèvent plusieurs défis scientifiques et technologiques. Et donc comment extraire ces polyphénols pour les intégrer dans une formulation cosmétique innovante à visée purifiante et dermo-protectrice ?

L'objectif principal de ce travail est de valoriser les composés polyphénoliques extraits de la spiruline *Arthrospira platensis* dans une perspective cosmétique, à travers :

- L'extraction de ces composés par différentes méthodes (hydroalcoolique, aqueuse, liquide-liquide),
- L'évaluation de leurs activités biologiques (antimicrobienne, anti-inflammatoire),
- La formulation d'un gel nettoyant à base de spiruline,
- Et l'étude de la tolérance cutanée et de l'efficacité microbiologique de ce produit formulé.

Dans ce contexte, l'extraction et la valorisation des polyphénols issus de la spiruline constituent une approche prometteuse pour exploiter durablement cette ressource microalgale. Ce travail s'inscrit ainsi dans une perspective de biovalorisation, en s'appuyant sur les propriétés fonctionnelles de ces composés pour développer des produits à haute valeur ajoutée.

Chapitre 1 : Généralités

Spiruline

1.1 Historique de la spiruline

Historiquement, la spiruline a été exploitée par différentes cultures :

Utilisations traditionnelles anciennes

- **Aztèques (XVI^e siècle – Mexique) :**

Les Aztèques récoltaient la spiruline dans le lac Texcoco, la nommant tecuitlatl (ou tecuitlat). Elle était séchée en galettes et intégrée à leur alimentation quotidienne, notamment pour sa richesse en protéines. Cette pratique a décliné après la colonisation espagnole et l'assèchement progressif des lacs de la région. **(Habib et al., 2008)**

- **Kanembous (XV^e siècle – Lac Tchad) :**

Les populations riveraines du lac Tchad consommaient la spiruline sous le nom de dihé, une pâte séchée vendue sur les marchés locaux. Contrairement à la tradition aztèque, cette utilisation a persisté jusqu'à aujourd'hui. **(Gantar & Svirčev, 2008)**

Premières descriptions scientifiques (XIX^e siècle)

- **1844 : Identification taxonomique initiale**

Les botanistes Wittrock et Nordstedt décrivent une cyanobactérie hélicoïdale sous le nom *Spirulina jenneri* f. *platensis* près de Montevideo (Uruguay). Toutefois, ce travail reste purement taxonomique et ne lie pas encore l'organisme aux traditions aztèques ou africaines. **(Komárek & Anagnostidis, 2005)**

Redécouverte moderne et lien avec les traditions (XX^e siècle)

- **1940 : Pierre Dangeard et le dihé tchadien**

Le pharmacien français Pierre Dangeard documente l'usage du dihé au Tchad, mais sans identifier clairement la spiruline comme cyanobactérie. **(Dangeard, 1940)**

- **1964 : Jean Léonard et la classification scientifique**

Le botaniste belge Jean Léonard identifie formellement le dihé comme une cyanobactérie du genre *Arthrospira* (initialement nommée *Spirulina platensis*) lors d'une mission au Tchad. Ses travaux établissent le lien entre les usages traditionnels et la microbiologie moderne. **(Léonard, 1966)**

- **1967 : Retour au Mexique**

Des chercheurs confirment que le tecuitlatl aztèque correspond à la même espèce (*Arthrospiraplatensis*), relançant l'intérêt pour son potentiel nutritionnel. (**Farrar, 1966**)

Reconnaissance internationale et applications (XX^e–XXI^e siècles)

- **Années 1970 : Validation nutritionnelle**

Des études révèlent sa composition exceptionnelle :

- 60–70 % de protéines (incluant tous les acides aminés essentiels).
- Richesse en fer, bêta-carotène, vitamines B et phycocyanine (**Belay, 1997**).

- **1974 : Promotion par l'ONU**

Lors de la Conférence mondiale sur l'alimentation, la spiruline est désignée comme "aliment du futur" par l'ONU pour lutter contre la malnutrition (FAO, 1974).

- **Années 1980–1990 : Recherche spatiale**

La NASA et l'ESA étudient son utilisation dans les missions spatiales pour son rendement en oxygène et en nutriments (**Hendrickx et al., 2006**).

1.2 Biologie

1.2.1 Présentation de la spiruline

La Spiruline apparaît comme un filament pluricellulaire de couleur bleu-vert et enroulé en spirale. On désigne ce filament sous le nom de trichome ; sa structure en hélice, observable exclusivement en milieu liquide, est spécifique au genre. En outre, contrairement à certains autres types de cyanobactéries comme l'*Anabaena* ou le *Nostoc*, la spiruline ne dispose pas de cellules spécialisées pour la fixation de l'azote atmosphérique (hétérocystes). Le filament a une longueur moyenne de 250 µm avec 7 spires et un diamètre approximatif de 10µm à 12µm. Cependant, les chercheurs qui examinent la Spiruline ne s'accordent pas toujours sur les paramètres de l'hélice (épaisseur, longueur). (**Cruchot, 2008**)

La spiruline, cette microalgue aux multiples bienfaits, est reconnue pour sa richesse nutritionnelle exceptionnelle.

Elle contient :

- Une teneur élevée en protéines (60 à 70 % de son poids), incluant les neuf acides aminés essentiels.
- Des acides gras essentiels, comme l'acide γ -linolénique.

- Une grande variété de minéraux : fer, calcium, potassium, phosphore, manganèse, cuivre, zinc et magnésium.
- Des oligoéléments et des vitamines (A, B1, B2, B6, B12, E, K).
- De la chlorophylle, des fibres et de la phycocyanine (un pigment bleu aux propriétés antioxydantes).

Le terme « spiruline » est souvent source de confusion en raison de son usage pour désigner différentes cyanobactéries apparentées mais distinctes. En effet, la spiruline alimentaire correspond principalement aux espèces du genre *Arthrospira*, notamment *Arthrospira platensis* et *Arthrospira maxima*. En revanche, le terme *Spirulina* désigne un genre différent de cyanobactéries, non comestibles et éloignées d'*Arthrospira*. Les différentes confusions faites par rapport à l'emploi du terme spiruline sont regroupées dans le tableau ci-contre (**Antenna Technologies, 2009**)

Tableau 1 : Confusions liées au terme de spiruline. (**Antenna technologies, 2009**) 1

Spiruline	Spirulina	Arthrospira
-Terme vernaculaire générique regroupant toutes les spirulines en vente sur le marché (<i>Spirulina</i> non comestible et <i>Arthrospira</i> comestible)	-Nom scientifique et taxonomique d'une autre cyanobactérie très éloignée du genre <i>Arthrospira</i> qui n'est pas utilisé dans le cadre de l'alimentation	Nom scientifique et taxonomique d'un groupe de cyanobactéries auxquelles appartient la spiruline utilisée dans le cadre de l'alimentation
-Nom commercial francophone de la cyanobactérie appartenant au genre <i>Arthrospira</i>	-Nom commercial anglophone de la cyanobactérie appartenant au genre <i>Arthrospira</i>	

1.3 Taxonomie

La Spiruline était à l'origine considérée comme une algue. Cependant, en 1960 une claire distinction entre procaryote et eucaryote a été définie, basée sur la différence d'organisation cellulaire. En 1962, Stanier et al., constataient que cette algue bleue verte était dépourvue de compartiments cellulaires, et donc faisait partie des procaryotes ; ils proposaient de désigner ce microorganisme « Cyanobactérie ».

1.3.1 Classification

On la classe selon la classification de **EPPO (2021)**.

Royaume (Kingdom) : Bacteria

Phylum : Cyanobacteria

Classe : Cyanophyceae

Ordre : Oscillatoriales

Famille : Microcoleaceae

Genre : *Arthrospira*

Espèce : *Arthrospira platensis*

1.4 Morphologie (structure)

La spiruline est souvent décrite comme une microalgue filamentaire multicellulaire de couleur bleu-vert, présentant une structure hélicoïdale spiralée, d'où son nom scientifique *Arthrospira platensis*. Sa morphologie varie en fonction de la souche et des conditions de culture. Elle est constituée de cellules végétatives alignées les unes à la suite des autres, formant des filaments ou trichomes visibles. Ces filaments, non ramifiés et mobiles, adoptent une forme hélicoïdale uniquement en milieu liquide. Ils mesurent en moyenne 250 μm de long, avec un diamètre de 10 à 12 μm , et s'enroulent en 6 à 7 spires. Cette structure hélicoïdale caractéristique donne à la spiruline l'apparence d'un minuscule ressort et lui permet de se déplacer dans l'eau en effectuant un mouvement de vis à une vitesse d'environ 5 $\mu\text{m/s}$. (**Charpy et al. 2008**)

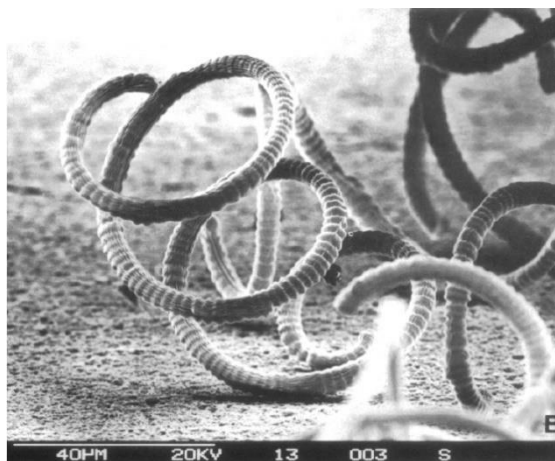


Figure 1 : Morphologie de la spiruline. (**Ciferri, 1983**)

Les facteurs environnementaux, principalement la température, les conditions physiques et le milieu de culture, peuvent affecter la géométrie de l'hélice, par conséquent, cette cyanobactérie montre une grande variété morphologique :

- **Spiralées** : désigne les souches dont les filaments ont la forme du ressort.
- **Ondulées** : désigne les souches dont les filaments sont en spirale étirée.
- **Droites** : désigne les souches dont les filaments sont tellement étirés qu'il donne l'impression d'être presque rectiligne.

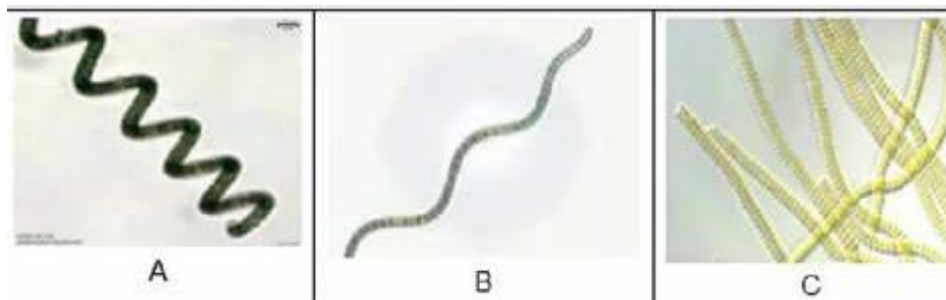


Figure 1 : Les différents aspects de la spiruline. (A) spiralée, (B) ondulée, (C) droite. **(Hajati et Zaghari, 2019)**

1.5 Reproduction et cycle biologique

Reproduction asexuée de la spiruline

À maturité, la spiruline se multiplie de manière végétative asexuée par fragmentation. Ce processus implique :

- **Formation de nécriidies** : Des cellules spécialisées (nécriidies) apparaissent le long du trichome (filament). Ces structures agissent comme des disques de séparation.
- **Fragmentation du trichome** : Les nécriidies provoquent la rupture du filament en segments plus courts, appelés hormogonies (composés de 2 à 4 cellules).
- **Maturation des hormogonies** : Chaque fragment s'allonge et subit une scissiparité (division binaire), générant deux individus génétiquement identiques. **(Théodore, 2017)**

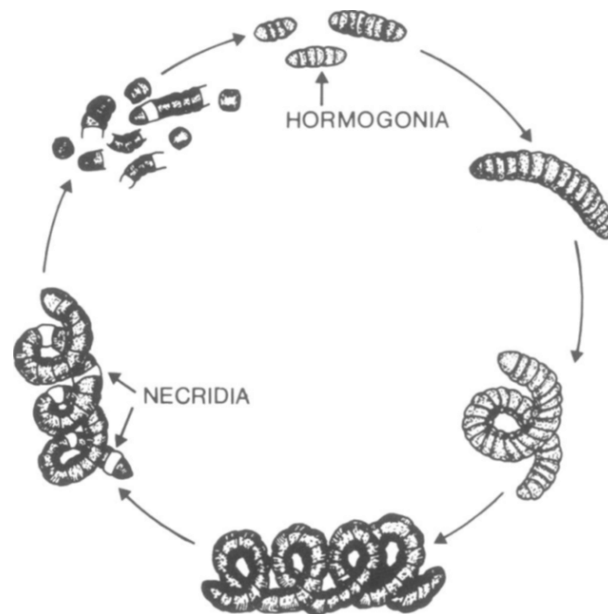


Figure 2: cycle de vie de la spiruline. (Ciferri, O. 1983)

1.6 Habitat naturel et répartition géographique de la spiruline

La spiruline se développe principalement dans des environnements aquatiques chauds, alcalins et fortement minéralisés, riches en nutriments azotés et phosphorés. Ces conditions extrêmes limitent la croissance d'autres micro-organismes, conférant à la spiruline un avantage écologique certain (Goulambasse, 2018). Elle est le plus souvent observée dans les eaux saumâtres ainsi que dans les lacs salés des zones tropicales et subtropicales. On la retrouve notamment dans les lacs alcalins d'Afrique, d'Amérique latine et d'Asie du Sud. Bien qu'elle soit considérée comme un organisme cosmopolite, sa présence reste beaucoup plus limitée en Amérique du Nord et en Europe (Ahouou, 2018).

1.6.1 Répartition géographique de la spiruline

La spiruline se développe idéalement dans des eaux chaudes, alcalines, et riches en nutriments azotés et phosphorés. Elle est fréquemment observée dans les eaux saumâtres et les lacs salins des régions tropicales et semi-tropicales. Son caractère thermophile et ses besoins importants en lumière restreignent sa répartition à une zone intertropicale, approximativement entre 35° de latitude Nord et 35° de latitude Sud.

1.6.2 Distribution mondiale et plasticité écologique

Grâce à sa forte plasticité écologique, la spiruline est présente à l'état naturel dans divers lacs alcalins en Afrique (Tchad, Ethiopie, Tunisie), en Amérique latine (Mexique, Pérou), et en Asie du Sud (Inde, Sri Lanka, Thaïlande). Bien qu'elle soit considérée comme ubiquiste, elle est moins abondante en Amérique du Nord et en Europe. (charpy.L et al. 2008)

1.7 Composition et valeur nutritionnelle

La spiruline se distingue par une composition nutritionnelle exceptionnelle, révélant ainsi tout le potentiel de cette microalgue encore peu connue. Cette composition peut varier selon plusieurs facteurs tels que l'origine de la souche, les conditions de culture et les procédés de production appliqués. Toutefois, le schéma ci-après présente une composition standard généralement observée pour la spiruline (Falquet & Hurni, 2006).

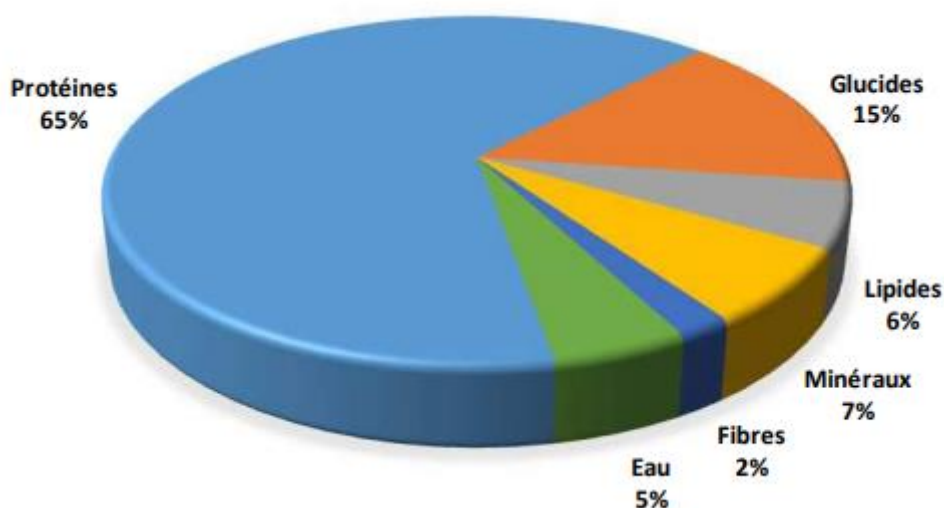


Figure 3: Composition chimique de la spiruline (Lecointre, 2017).

Généralement, la spiruline contient environ 70 % de protéines, entre 15 et 20 % de glucides, et environ 5 % de lipides, ainsi que divers minéraux et une teneur en eau variant de 3 à 6 %. Grâce à cet apport protéique significatif et à une proportion équilibrée de lipides, de glucides, de vitamines, de minéraux et d'oligo-éléments, la spiruline est considérée comme un aliment exceptionnel (Girardin-Andréani, 2005).

1.7.1 Les protéines

La spiruline est particulièrement riche en protéines, représentant entre 50 et 70 % de sa masse sèche. Ce taux exceptionnel dépasse largement celui observé chez la majorité des micro-organismes et des végétaux. À titre comparatif, même les meilleures sources végétales, comme la farine de soja, n'en contiennent qu'environ 35 %. Par ailleurs, il convient de souligner que la spiruline est entièrement consommable, contrairement à de nombreux végétaux dont seule une partie est comestible (Falquet, 2006).

1.7.2 Les lipides

La spiruline est considérée comme un aliment pauvre en lipides, ceux-ci représentant généralement environ 8 % de sa matière sèche. Toutefois, ce taux peut varier et atteindre entre

11 % et 14 %, en fonction des techniques d'extraction employées ou de la souche utilisée. De plus, la composition en acides gras de la spiruline peut également fluctuer selon les conditions de culture (**Lupatini et al., 2017**).

La composition des principaux acides gras révèle la présence d'une forte concentration en acides gras essentiels incluant des oméga-3 et des oméga-6 qui préviendraient l'accumulation de cholestérol (**VON DER WIED, 2011**)

1.7.3 Les acides gras

Elle est majoritairement constituée de monogalactosyl diglycéride et de digalactosyl diglycéride (23 %), de sulfoquinovosyl diglycéride (5 %) ainsi que de phosphatidyl glycérol, qui en constitue environ 25,9 % (**Xue et al., 2002**). En revanche, les triglycérides y sont présents en très faibles quantités (0,3 %). Par ailleurs, certains phospholipides comme la phosphatidyl choline, la phosphatidyl éthanolamine et la phosphatidyl inositol ne sont retrouvés qu'en traces non significatives. Il est à noter que 4,6% de phospholipides sont encore indéfinis. (**Charpy, Langlade, & Alliod, 2008**)

1.7.4 Les glucides

Les glucides représentent 15 à 25% de la matière sèche des spirulines (**Mahavir, 2016**).

L'essentiel des glucides assimilables est constitué de polymères tels que des glucosannes aminés (1,9% du poids sec) et des rhamnosannes aminés (9,7%) ou encore de glycogène (0,5%). Les glucides simples ne sont présents qu'en très faibles quantités (glucose, fructose et saccharose), on trouve aussi des polyols comme le glycérol, le mannitol et le sorbitol (**FLAQUET, 2006**)

1.7.5 Les acides nucléiques

La présence d'acides nucléiques (ADN et ARN) dans l'alimentation revêt une importance nutritionnelle particulière, car la dégradation de leurs bases puriques – l'adénine et la guanine – aboutit à la formation d'acide urique. Un excès de ce dernier dans le sang peut, à long terme, entraîner des troubles tels que des calculs rénaux ou des crises de goutte. Il est généralement admis que la consommation chronique d'acides nucléiques ne devrait pas dépasser 4 g par jour chez un adulte. Or, pour atteindre cette limite avec de la spiruline, il faudrait en consommer environ 80 g sous forme sèche, alors que la consommation quotidienne recommandée reste bien inférieure, autour de 10 g. Ainsi, la quantité d'acides nucléiques apportée par la spiruline ne semble pas poser de risque, même en cas de consommation régulière. Il convient également de noter que l'ARN génère deux fois plus d'acide urique que l'ADN, à teneur équivalente en purines, et que le taux d'acide urique dans l'organisme est aussi influencé par divers facteurs

comme l'âge, le sexe ou le surpoids. Chez *Spirulina platensis*, la teneur totale en acides nucléiques varie de 4,2 à 6 % du poids sec, avec une proportion d'ADN estimée entre un quart et un tiers de la teneur totale en ARN (**Goulamabasse, 2018**).

Tableau 2: teneur en acides nucléiques de quelques aliments (**Flaquet and Hurni, 2006**).

Aliments	Acides nucléiques totaux (% mat. Sèche)
Viande de bœuf	1,5
Foie de bœuf	2,2
Spiruline	4-6
Levure	23

1.7.6 Les vitamines

La spiruline est particulièrement riche en vitamines, ce qui en fait un aliment intéressant sur le plan nutritionnel. Elle constitue notamment la deuxième source naturelle de vitamine B1 après la levure de bière. Elle renferme également des quantités importantes de provitamine A, de vitamine B12 et de β -carotène (**Cruchot, 2008**).

- **Vitamines liposolubles**

Les vitamines A, D, E et K appartiennent au groupe des vitamines liposolubles. Elles sont généralement présentes dans des aliments riches en matières grasses et sont stockées dans l'organisme, notamment dans le foie et les tissus adipeux, ce qui peut exposer à un risque de surdosage en cas d'excès. La vitamine D, en particulier, peut être apportée par l'alimentation (sources exogènes comme les corps gras), mais elle peut également être synthétisée par la peau suite à une exposition solaire (source endogène).

Concernant la spiruline, le β -carotène représente environ 80 % de ses caroténoïdes totaux. Les 20 % restants sont essentiellement constitués de physoxanthine et de cryptoxanthine. Ces deux composés sont convertis en vitamine A uniquement chez les mammifères. La vitamine A, sous forme active de rétinol, est retrouvée dans les produits d'origine animale comme le foie, l'huile de foie de morue, les poissons, les œufs ou les produits laitiers. Dans le règne végétal, on la trouve sous forme de provitamine A (β -carotène), un précurseur que l'organisme transforme selon ses besoins. À titre d'exemple, 4 g de spiruline fournissent une quantité de β -carotène équivalente à celle contenue dans 100 g de légumes colorés (**Goulamabasse, 2018**).

- **Les vitamines hydrosolubles**

Les vitamines hydrosolubles, notamment les vitamines du groupe B (B1, B2, B3, B5, B6, B8, B9, B12) ainsi que la vitamine C, ne sont pas stockées durablement par l'organisme. Elles sont

rapidement éliminées par voie rénale ou par la sueur, ce qui implique que des apports réguliers sont nécessaires pour éviter une carence, car les réserves corporelles s'épuisent rapidement en cas de déficit. Concernant la spiruline, la présence de vitamine C varie selon son origine : elle peut être totalement absente ou présente en quantité très faible (**Goulamabasse, 2018**).

1.7.7 Les pigments

La Spiruline contient des chlorophylles dont la chlorophylle a (typique des végétaux), des caroténoïdes dont le principal est le β -carotène et des phycobiliprotéines telles la phycocyanine et la phycoérythrine (**Charpy, Langlade, & Alliod, 2008**)

Tableau 3: Teneurs en pigments exprimées en mg pour 10g de matière sèche de *S. plantensis* (**Pierlovisi, 2007**)

Pigments	Teneur en mg/10g
Chlorophylles totales	115
Chlorophylle a	61-75
Caroténoïdes (orange)	37
Phycocyanine (bleu)	1500-2000
Phycocyanine (rouge)	2900-10000

- **Phycocyanine**

La phycocyanine est le pigment responsable de la couleur bleue caractéristique de la spiruline. Bien qu'elle soit un composant essentiel, sa concentration peut varier considérablement, allant de 10% (**Charpy, Langlade, & Alliod, 2008**) à 12,6-20% du poids sec (**Patel & Goyal, 2013**), en fonction de divers facteurs tels que les conditions de culture et l'espèce de spiruline

- **La chlorophylle**

La chlorophylle présente dans la spiruline est exclusivement de type **a**, forme caractéristique des cyanobactéries. Il s'agit d'un pigment vert que l'on retrouve également chez les plantes, jouant un rôle essentiel dans la capture de l'énergie lumineuse, notamment au cours des premières étapes de la photosynthèse. La spiruline contient environ 1 % de chlorophylle a sur sa matière sèche, ce qui en fait l'une des sources naturelles les plus concentrées en ce pigment (**Ahounou, 2018**).

- **Les caroténoïdes**

Les caroténoïdes sont des pigments dépourvus d'azote, dont la couleur varie du jaune au rouge. Comme l'organisme ne les synthétise pas, ils doivent être apportés exclusivement par l'alimentation (**Laurent, 2019**).

Les teneurs en bêta-carotène de la spiruline varient en fonction des conditions de culture l'exposition à la lumière augmente le taux final car la spiruline le synthétise pour se protéger des rayons du soleil – et des techniques de séchage – sous forte chaleur celui-ci lui ferait perdre près d'un tiers de sa teneur –, mais en moyenne, 10 g de spiruline apportent entre 7 et 20 mg de bêta-carotène, c'est quinze fois plus que les carottes, et cinq fois plus que la citrouille **(Karleskind, 2018)**

1.7.8 Les enzymes

La spiruline renferme de nombreuses enzymes, parmi lesquelles la superoxyde dismutase (SOD) se distingue par son importance. Cette enzyme antioxydante joue un rôle clé dans la protection de l'organisme contre les effets néfastes des radicaux libres **(Laurent, 2019)**.

1.7.9 Les minéraux et oligo-éléments

La différence entre minéraux et oligo-éléments est qu'un minéral excède 1/10 000 du poids du corps alors qu'un oligo-élément est présent dans des quantités 10 fois moindre, ainsi les besoins en minéraux sont de l'ordre du gramme alors que les besoins en oligo-élément sont de l'ordre du milligramme ou microgramme. La spiruline contient tous les minéraux essentiels (7% du poids sec). **(Goulambasse, 2018)**.

Les oligoéléments ou éléments traces présents dans la spiruline sont le fer, le zinc, le cuivre, le sélénium, l'iode, le fluor, le chrome, le calcium et magnésium, les autres éléments, en quantité plus significative, sont considérés comme des minéraux **(Avino et al., 2000)**.

Tableau 4: Composition en minéraux de la Spiruline et doses requises **(FALQUET, 2006)**.

Minéraux	Teneur (mg/kg)	Doses requises (mg/jour)
Calcium (Ca)	1300-1400	1200
Phosphore (P)	6700-9000	1000
Magnésium (Mg)	2000-2900	250-350
Fer	580-1800	18
Zinc	21-40	15
Cuivre	8-10	1,5-3
Chrome	2,8	0,5-2
Manganèse	25-37	5
Sodium	4500	500
Potassium	6400-15400	3500
Sélénium	0,01-50*	0,05

1.8 Application

La spiruline, consommée depuis des siècles par certaines populations en Afrique et en Amérique, a été redécouverte récemment pour ses propriétés nutritionnelles exceptionnelles. Depuis plusieurs décennies, les scientifiques reconnaissent sa richesse en protéines, glucides, lipides, vitamines et minéraux, ainsi que ses substances anti-oxydantes et anti-radicaux comme les caroténoïdes et les polyphénols. Actuellement, elle est étudiée ou utilisée sur tous les continents par des ONG pour lutter contre la malnutrition. Grâce à ses caractéristiques, la culture de la spiruline pourrait améliorer la santé humaine et la nutrition, notamment dans les pays en développement. Elle représente une solution prometteuse pour la production simple de compléments alimentaires de haute qualité, ce qui a incité de grandes entreprises à se lancer dans sa culture à grande échelle. (Sguera S., 2008)

1.8.1 En alimentation humaine

Grâce à son excellent profil nutritionnel, la spiruline offre plusieurs avantages significatifs :

- **Lutte contre la malnutrition**

Les humanitaires et les médecins utilisent la spiruline sous forme de poudre, qu'ils mélangent à des céréales ou à de l'eau pour traiter la malnutrition sévère chez les enfants. Elle s'avère plus efficace que les médicaments pour combler les carences et traiter les maladies liées à la famine, telles que le marasme ou la kwashiorkor.

- **Amélioration des performances sportives :**

La consommation de spiruline facilite l'effort physique et améliore la récupération des sportifs.

- **Avantages pour les femmes enceintes :**

En tant que riche source de vitamines B9 et B12 ainsi que de fer, la spiruline est particulièrement bénéfique pour les femmes enceintes. La phycocyanine qu'elle contient augmente l'oxygénation musculaire et réduit les crampes utérines, aidant ainsi ces femmes à se préparer mieux à l'accouchement et à récupérer après l'allaitement. (Bougoffa, S., & Hamidi, A. 2020)

1.8.2 En alimentation animale

Tout comme chez l'humain, la spiruline contribue au renforcement des défenses naturelles chez l'animal. Elle joue un rôle essentiel dans le maintien de son système immunitaire, favorise la résistance à certaines pathologies et aide à lutter contre le vieillissement et la fatigue. La spiruline est couramment utilisée chez plusieurs espèces, notamment les chiens, les chats, les

poissons et les chevaux. Chez ces derniers, elle est particulièrement recommandée lors des phases de croissance, de compétition ou de convalescence. Par ailleurs, certains éleveurs de volailles intègrent également la spiruline à l'alimentation des poules, une pratique reconnue pour améliorer significativement la qualité des œufs produits (**Casal, A. 2019**).

1.8.3 En cosmétique

L'analyse des composants de la spiruline a révélé une richesse en actifs naturels (acides aminés, oligoéléments, antioxydants, minéraux, vitamines, acides nucléiques, protéines, acides gras essentiels, etc.). Ces actifs bénéficient à la fois aux consommateurs de spiruline dans leur alimentation et sont exploités par certains laboratoires cosmétiques dans des crèmes, shampoings et sérums (**Banks, 2007**). Grâce à ses propriétés antioxydantes, la spiruline aide à maintenir la souplesse et l'élasticité de la peau, contribuant ainsi à retarder son vieillissement. Elle apporte également brillance et résistance aux ongles et aux cheveux grâce à sa concentration en nutriments et oligoéléments (**Banks, 2007**). Considérée comme un "aliment beauté" d'exception, la spiruline est aujourd'hui utilisée dans divers soins : soins anti-âge à connotation marine, produits de soins en spa et thalasso (masques visage, enveloppements corporels), soins réparateurs et fortifiants pour les cheveux et les ongles, cataplasmes et enveloppements marins, ainsi que soins revitalisants pour le corps et masques minéralisants pour le visage (**Casal, A. 2019**).

1.9 Les Effets biologique de la spiruline

1.9.1 Les effets antioxydants

La spiruline possède un fort potentiel antioxydant, confirmé par plusieurs études expérimentales. Ses extraits alcooliques et aqueux ont montré une efficacité supérieure à celle de nombreux antioxydants de synthèse, comme l' α -tocophérol ou le BHA. Ces propriétés sont attribuées à la présence de composés actifs tels que la phycocyanine, le β -carotène, les tocophérols et les polyphénols. Des recherches ont également mis en évidence la capacité de la spiruline à neutraliser divers radicaux libres, notamment les radicaux hydroxyles et lipidiques, ainsi qu'à protéger le foie contre des substances toxiques. La phycocyanine, en particulier, joue un rôle clé grâce à son activité antioxydante et anti-inflammatoire. (**Belay, A. 2002**)

1.9.2 Les effets antiviraux

Les effets antiviraux de la spiruline ont suscité un intérêt croissant après des découvertes concernant des composés antiviraux puissants extraits des algues bleu-vert, en particulier ceux isolés de *Lyngbya lagerheimii* et *Phormidium tenue*, qui ont montré une activité contre le VIH-1. Des études ont également démontré que l'extrait aqueux de *Spirulina platensis* inhibait la

réplication du virus de l'herpès simplex de type 1 (HSV-1) dans des cellules HeLa en interférant avec l'adsorption et la pénétration du virus dans les cellules hôtes. De plus, un polysaccharide sulfaté isolé de *Spirulina platensis*, le calcium spirulan (Ca-SP), a montré une inhibition de plusieurs virus enveloppés, dont le HSV-1, le VIH-1 et le virus de la grippe. Le Ca-SP s'est révélé plus efficace que le sulfate de dextran dans l'inhibition du VIH-1 et du HSV-1. Des recherches récentes ont également montré que l'extrait aqueux de *Spirulina* inhibait la réplication du VIH-1 dans différentes lignées cellulaires humaines, offrant ainsi un potentiel clinique pour le traitement de l'infection par le VIH. (Belay, A. 2002)

1.9.3 Les effets anti-inflammatoires

La spiruline possède une activité anti-inflammatoire notable, principalement attribuée à deux de ses composés bioactifs : la phycocyanine et le β -carotène. La phycocyanine, pigment-protéine spécifique de la spiruline, joue un rôle clé en inhibant la formation de cytokines pro-inflammatoires telles que le TNF- α , en supprimant l'expression de la cyclooxygénase-2 (COX-2) et en réduisant la production de prostaglandine E2. Elle agit également en bloquant l'activation du facteur de transcription NF- κ B, par la prévention de la dégradation de l'I κ B- α cytosolique, ce qui empêche la translocation du complexe actif dans le noyau. Par ailleurs, elle module plusieurs voies de signalisation intracellulaire impliquées dans l'inflammation, notamment les MAPK (p38, JNK, ERK1/2). Le β -carotène, autre composant actif de la spiruline, renforce cet effet anti-inflammatoire en inhibant à son tour la production d'oxyde nitrique (NO) et de prostaglandine E2, tout en supprimant l'expression d'iNOS, de COX-2, du TNF- α , de l'IL-1 β , de l'IL-6 et de l'IL-12. Cette inhibition résulte notamment de sa capacité à bloquer la translocation nucléaire de la sous-unité p65 du complexe NF- κ B. Ainsi, par l'action synergique de ses composés, la spiruline représente une source naturelle prometteuse dans la modulation des processus inflammatoires. (Deng, R., & Chow, T. 2010)

1.9.4 Les effets anticancéreux

Les effets anticancéreux de la spiruline se manifestent à travers plusieurs études ciblées. Une étude humaine menée par (Mathew et al. 2002) a montré que la supplémentation en spiruline à raison de 1 g/jour pendant un an induit une régression complète des lésions précancéreuses dans 45 % des sujets traités, contre seulement 7 % dans le groupe témoin. Les résultats sont particulièrement intéressants dans le cas des lésions homogènes, suggérant l'efficacité de la spiruline dans la prévention du cancer oral, un domaine lié à la consommation de tabac.

Dans des études expérimentales sur des hamsters, l'extrait de spiruline, administré localement sur des tumeurs induites par le DMBA, a montré une régression tumorale significative,

supérieur à l'effet du bêta-carotène seul. La spiruline a également démontré une activité cytotoxique et cytostatique contre les carcinomes squameux, suggérant un effet synergique avec d'autres composants de l'algue. Des observations indiquent que la spiruline stimule une réponse immunitaire, éliminant ainsi les foyers initiaux de cellules malignes.

D'autres recherches ont montré que des extraits polysaccharides de spiruline inhibent la prolifération des cellules de carcinome hépatomateux ascitique chez la souris. Une réduction significative de la progression tumorale a été observée, en particulier lorsque le polysaccharide était administré avant l'injection des cellules tumorales. De plus, une étude sur les rats a révélé que la spiruline réduisait les cryptes aberrantes formées dans le colon, un marqueur de cancer colorectal.

Enfin, la spiruline contenant du calcium spirulan (Ca-SP) a montré des résultats prometteurs pour inhiber l'invasion tumorale et les métastases, réduisant significativement la colonisation tumorale dans les poumons des souris, indiquant ainsi son potentiel dans la prévention du cancer et de ses métastases. **(Mathew, B., al 1995)**

1.9.5 Les effets probiotiques

La spiruline exerce des effets probiotiques notables, favorisant la croissance des bactéries bénéfiques pour l'intestin. **(Tsuchihashi et al. 1994)** ont observé qu'un régime contenant 5 % de spiruline augmentait de trois fois la population de *Lactobacillus* dans le cæcum de rats par rapport à un groupe témoin. Des résultats similaires ont été obtenus in vitro par de Mule (1996) avec *Lactobacillus lactis* et *Candida albicans*. **(Parada et al. 1998)** ont également rapporté que des produits extracellulaires issus d'algues stimulent la croissance de bactéries lactiques telles que *Lactococcus lactis*, *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus casei*, *L. acidophilus* et *L. bulgaricus*. Chez l'humain, les *Lactobacillus* contribuent à la digestion, à la protection contre les infections et à la stimulation du système immunitaire. Dans le cas du SIDA, où des infections opportunistes comme *Candida albicans* aggravent la malabsorption des nutriments, la spiruline pourrait représenter une stratégie nutritionnelle et thérapeutique complémentaire. **(Archer, D. L., & Glinsmarm, W. H. 1985)**

1.9.6 Les effets antitoxiques

L'effet de la spiruline contre les toxicités causées par les métaux lourds et autres composés a été largement étudié. Selon **(Yamane et al. 1998)**, des rats exposés à des doses élevées de mercure ont montré une élévation du taux d'urée sanguine (BUN) et de créatinine sérique, indicatifs d'une néphrite aiguë. L'ajout de 30 % de spiruline dans leur alimentation a entraîné

une réduction significative des niveaux de ces indicateurs. Des études similaires ont également observé des effets bénéfiques sur la toxicité rénale induite par des médicaments comme le para-aminophénol, la gentamicine et le cis-diaminoplatine (**Fukino et al, 1990**). La spiruline a également montré des effets protecteurs contre la toxicité rénale en réduisant l'excrétion urinaire de la phosphatase alcaline (ALP) et de la transaminase glutamique oxaloacétique (GOT), des marqueurs supplémentaires de la fonction rénale. Les composants efficaces se trouvent principalement dans la fraction soluble dans l'eau de l'extrait de spiruline, avec des substances de poids moléculaire supérieur à 100 000, dont la phycocyanine pourrait être responsable de la suppression de la toxicité rénale. En outre, (**Shastri et al. 1999**) ont observé que la spiruline protégeait contre la toxicité du plomb chez les souris albinos suisses, en augmentant la survie et en réduisant les effets toxiques, comme le poids des testicules, du corps et du diamètre tubulaire.

Chapitre 2 : Généralités

Polyphénols

2.1 Présentation générale sur les polyphénols

Les polyphénols, ou composés phénoliques, sont des molécules caractéristiques du règne végétal issues du métabolisme secondaire des plantes. On les retrouve dans l'ensemble des organes végétaux, des racines jusqu'aux fruits. Bien qu'ils ne soient pas essentiels au fonctionnement vital de la plante, ces composés jouent un rôle important dans ses interactions avec l'environnement, participant ainsi à son adaptation et à sa protection au sein de son écosystème. Le terme « phénol » regroupe près de 10 000 composés naturels déjà identifiés (**Achat, 2013**).

Les polyphénols sont des métabolites végétaux secondaires principalement connus pour leurs propriétés antioxydantes. Leur utilisation en tant qu'additifs alimentaires dans la nutrition des animaux d'élevage est de plus en plus répandue, car ces derniers sont particulièrement exposés au stress oxydatif qui se traduit par une lipoperoxydation du produit final. C'est pourquoi il est essentiel de préserver la qualité et la sécurité des produits carnés et laitiers en atténuant la détérioration oxydative.

De plus, les polyphénols présentent l'avantage d'être plus acceptables pour les consommateurs que leurs homologues synthétiques, car ils sont considérés comme « non toxiques ». Dans une revue sur plusieurs études axées sur l'alimentation et la supplémentation en polyphénols des monogastriques et des ruminants, ainsi que leur adjonction directe aux viandes et produits laitiers, un accent particulier a été émis sur leurs effets antioxydants sur le produit final (**Serra et Salvatori, 2021**).

2.2 Rôles et intérêts des polyphénols

2.2.1 Chez les végétaux

La biosynthèse des polyphénols constitue un mécanisme essentiel d'adaptation des plantes aux stress abiotiques et biotiques. Les facteurs abiotiques tels que la sécheresse, les rayonnements ultraviolets, les variations de température, la salinité des sols ou encore la présence de métaux lourds provoquent une production accrue d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), compromettant la croissance et le rendement végétal. En tant qu'antioxydants naturels, les polyphénols participent à la régulation de ces stress en neutralisant les ERO (**Stiller et al., 2021**).

2.2.2 Chez l'humain

Outre leurs fonctions physiologiques chez les plantes, les polyphénols jouent un rôle majeur dans la santé humaine. Grâce à leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires, antimicrobiennes et cardioprotectrices, ils sont considérés comme des composés bioactifs d'intérêt dans la prévention et le traitement de nombreuses maladies (Stiller et al., 2021).

Les composés phénoliques, notamment les flavonoïdes, suscitent un intérêt croissant en recherche en raison de la diversité de leurs effets physiologiques. Ils présentent des activités variées telles qu'antiallergiques, anti-athérogènes, anti-inflammatoires, hépatoprotectrices, antimicrobiennes, antivirales, antibactériennes, anticarcinogéniques, antithrombotiques, cardioprotectrices et vasodilatatrices (Ksouri et al., 2007).

Tableau 5: résume le rôle de différents polyphénols dans la santé humaine. (BAHORUN,1997)

Polyphénols	Activités biologiques
Acides phénols (cinnamiques et benzoïques)	Antibactérienne Antifongique Antioxydante.
Coumarines	Protectrice vasculaire antioedémateuse.
Flavonoïdes	Anti-tumorale Anticarcéno-gène Anti inflammatoire Hypotenseur et diurétique Antioxydante.
Anthocyanes	Protectrice capillaro-veineux.
Tanins galliques et catéchi-ques	Antioxydante.

2.3 Classification et structure des polyphénols

Dans la nature, les polyphénols sont généralement conjugués à des sucres et à des acides organiques et, en fonction du nombre d'anneaux aromatiques et de leur affinité pour différents composés, ils peuvent être répartis en trois classes : les flavonoïdes, les non-flavonoïdes et les tanins. (Serra et Salvatori, 2021).

2.3.1 Les flavonoïdes

Les flavonoïdes forment une vaste famille de composés naturels, regroupant plus de 6 000 molécules identifiées, que l'on retrouve de manière quasi universelle chez les plantes vasculaires. Ils jouent notamment un rôle de pigments, responsables des teintes jaunes, orangées ou rouges observées dans divers organes végétaux. Sur le plan structural, tous les flavonoïdes partagent une structure commune de base C6-C3-C6, constitué de quinze atomes de carbone. Ce noyau comprend deux cycles aromatiques (A et B), chacun comportant six atomes de carbone, reliés par une chaîne de trois atomes de carbone, qui peut parfois former un troisième cycle (cycle C) (Boubekri, 2014).

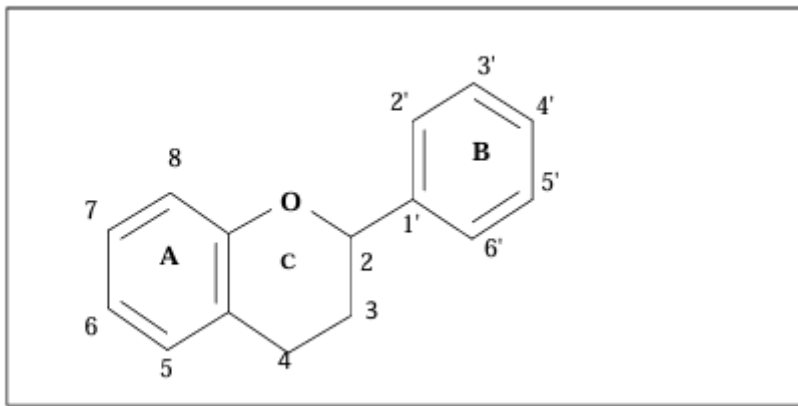


Figure 4: Structure générale d'une molécule de flavonoïdes (Balasundram et al., 2006).

En fonction du type d'hétérocycle, les sous-classes de flavonoïdes suivantes peuvent être distinguées : les flavonols, les flavones, les flavanols, les flavanones, les anthocyanes et les isoflavones (Gessner et al., 2016)

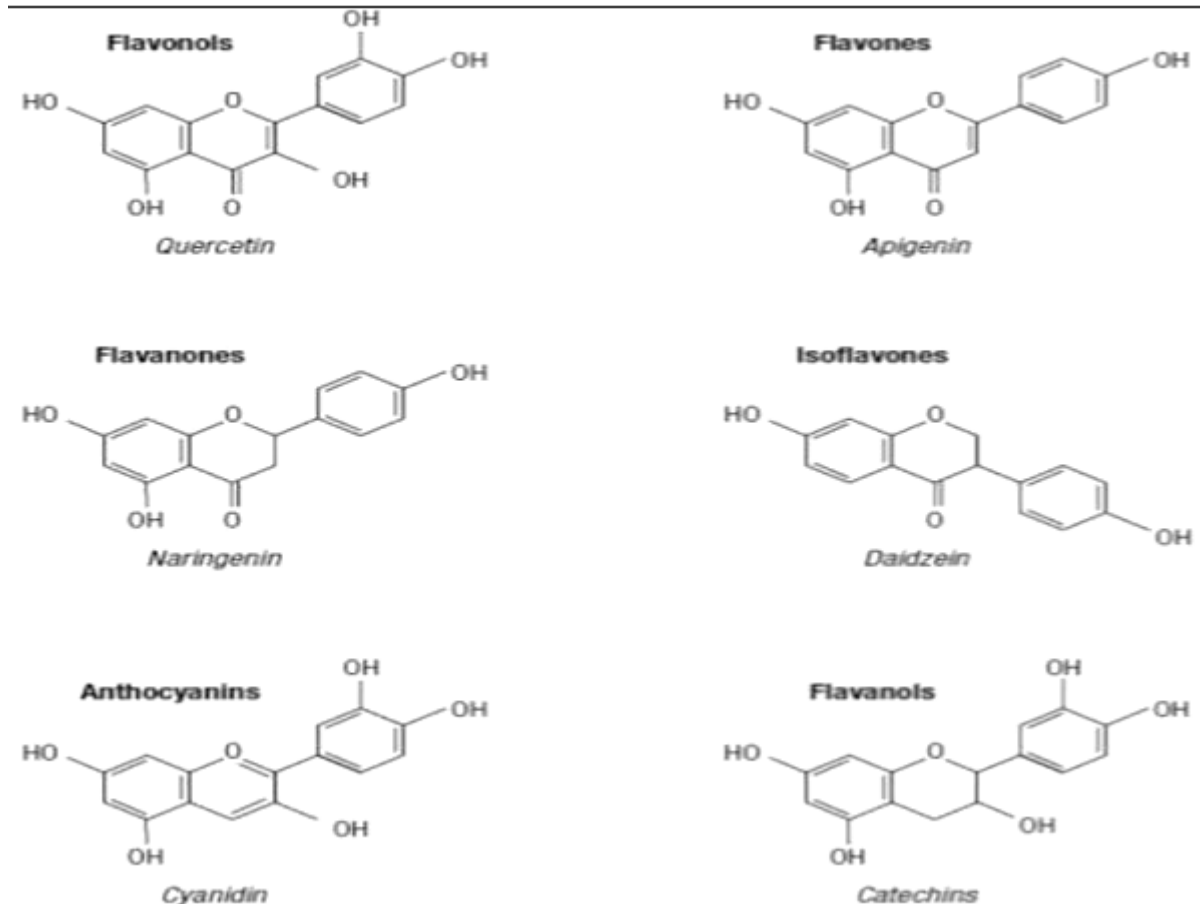


Figure 5 : Les sous classe de flavonoïdes (Archivio et al.,2007)

2.3.1.1 Flavan-3-ols ou flavanols

Les flavanols sont les flavonoïdes les plus omniprésents dans les aliments, représentant, par exemple, la classe la plus abondante dans les pépins des baies de raisin de *Vitis vinifera* (Serra et al., 2021). Les flavanols se distinguent par la présence d'un groupement OH en position C3 et d'une double-liaison en C2-C3. Ils peuvent exister soit sous forme d'aglycones, soit sous forme d'hétérosides (Achat, 2013).

2.3.1.2 Flavones

La flavone est une classe de flavonoïdes basée sur le squelette de la 2-phénylchromène-4-one (2-phényl-1-benzopyran-4-one). La formule moléculaire de la molécule de flavone est C₁₅H₁₀O₂. Elle possède un squelette à trois cycles, C₆-C₃-C₆, et les cycles sont désignés respectivement par les lettres A, C et B. Les flavones ont trois groupes fonctionnels, dont un groupe hydroxyle, un groupe carbonyle et une double liaison conjuguée ; par conséquent, elles donnent les réactions typiques de ces trois groupes fonctionnels. Les flavones sont des

substances cristallines incolores à jaunes, solubles dans l'eau et l'éthanol. Elles donnent une solution de couleur jaune lorsqu'elles sont dissoutes dans un alcali (**Singh et al., 2014**).

2.3.1.3 Flavanones

Cette classe de flavonoïdes peut se présenter sous forme de glycosides O ou C et est abondante dans les agrumes, fruits et pruneaux (**Khan et al., 2004**). Contrairement aux flavonols et aux flavones, qui ont un groupe carbonyle en position C4, les flavanones ont un cycle hétérocyclique saturé avec une chaîne à trois carbones, sans groupe hydroxyle en position C3. Ils sont caractérisés par un grand nombre de substituants dérivés « par exemple, flavanones prénylées et benzylées flavanones » en raison de leurs modèles de substitution uniques (**Reis-Giada, 2014**).

2.3.1.4 Les anthocyanes

Les anthocyanes (du grec anthos=fleur et cyan=bleu) sont des pigments hydrosolubles. Les anthocyanes se retrouvent dans de nombreux aliments car elles sont responsables des couleurs cyan et rouge de plusieurs fruits.

Les anthocyanes sont des hétérosides d'une unité aglycone (anthocyanidine) qui est un dérivé du flavylumion (**VALLS et al., 2009**).

2.3.1.5 Isoflavones

Les isoflavones sont une sous-classe de flavonoïdes qui sont également décrits comme des composés asphytoestrogènes, car ils présentent une activité œstrogénique. La principale caractéristique de la structure des flavonoïdes est leur noyau, composé de deux anneaux benzéniques (A et B) liés à un anneau cyclique hétéro C. La position de l'anneau benzénique B est la base de la catégorisation de la classe des flavonoïdes (position 2) et de la classe des isoflavonoïdes (position 3) (**VALLS et al., 2009**).

2.3.2 Les non-flavonoïdes

Ce groupe comprend plusieurs composés parmi lesquels on distingue les acides phénoliques, les stilbènes, les lignanes, les coumarines et les xanthones.

2.3.3 Les acides phénoliques

Le terme « acides phénoliques » désigne généralement des composés phénoliques contenant un groupe carboxylique. Toutefois, dans le contexte du métabolisme secondaire des plantes, cette appellation fait référence à une catégorie spécifique d'acides organiques (**Robbins, 2003**). Les acides phénoliques sont issus principalement des acides benzoïques et cinnamiques (**Han et al., 2007 ; Tsao, 2010**). On distingue deux grands sous-groupes : les acides hydroxybenzoïques,

dont la structure de base est de type C6–C1, et les acides hydroxycinnamiques, dont la structure est de type C6–C3.

2.3.4 Les stilbènes

Ces composés présentent deux anneaux aromatiques reliés par un pont éthane et existent sous forme monomérique (resvératrol, oxyresvératrol) et oligomérique en tant qu'oligomères de stilbènes (dimères, trimères ou polymères de resvératrol) ou d'autres stilbènes (par exemple, epsilon-viniférine, pallidol, etc.). Le resvératrol, un stilbène important aux propriétés anticancérigènes, est trouvé en faibles quantités dans le vin et se présente sous deux formes isomériques, les isomères trans et cis. (Serra et al., 2021).

2.3.5 Les lignanes

Les lignanes appartiennent à la famille des composés phénoliques bioactifs, caractérisés par une structure de type (C6–C3), chaque unité étant un propylbenzène. Bien qu'ils ne présentent ni valeur nutritive ni apport calorique, ces composés jouent un rôle biologique intéressant. On les retrouve en grande quantité dans les graines de lin et de sésame, alors que leur présence dans les fruits et légumes reste plus limitée. Chimiquement, les lignanes sont définis comme des dimères de phénylpropanoïdes, formés par la liaison de deux unités C6–C3 au niveau de leur carbone 8. Leur biosynthèse débute généralement par la condensation de deux monolignols, tels que l'alcool coniférylique. Ce sont des substances phénoliques apparentées aux lignines, ils n'ont guère de valeur alimentaire humaine. Ils sont présents dans la plante sous forme de glucosides (Boubekri, 2014)

2.3.6 Les coumarines

Les coumarines forment une classe de composés hétérocycliques oxygénés, dont la structure de base correspond au noyau benzo-2-pyrone. Leur découverte remonte à 1820, lorsqu'elles furent isolées pour la première fois par Vogel à partir de l'écorce de *Coumarouna odorata* (Lacy & O'Kennedy, 2004).

Les coumarines exercent des effets variables sur le développement végétal, en fonction de leur concentration et de l'espèce concernée. Dans les cellules végétales, elles se trouvent majoritairement sous forme glycosylée. Cette modification biochimique joue un rôle protecteur, permettant de limiter leur toxicité potentielle sur la cellule et la croissance. Par ailleurs, les coumarines sont classées parmi les phytoalexines, des composés de faible poids moléculaire issus de diverses voies métaboliques, notamment celles des phénylpropanoïdes et des sesquiterpènes (Hoffmann, 2003).

2.3.7 Les tanins

Les tanins, qui constituent un groupe de substances phénoliques de poids moléculaire élevé, ont été signalés comme possédant une grande capacité à neutraliser les radicaux libres (ABTS+), dont l'efficacité dépend du poids moléculaire, du nombre de cycles aromatiques et de la nature de la substitution du groupe hydroxyle (**Annegowda et al., 2013**).

Selon leurs structures biochimiques, on distingue deux classes de tannins : les tannins hydrolysables et les tannins condensés.

2.3.7.1 Tanins hydrolysables ou galliques

Les tanins hydrolysables, également appelés tanins galliques, sont constitués de dimères d'acide gallique fixés sur un noyau glycosylé. Ce groupe comprend notamment l'acide gallique lui-même ainsi que ses produits de condensation tels que l'acide hexahydroxydiphénique. Ces composés sont caractérisés par leur sensibilité à l'hydrolyse, qu'elle soit enzymatique ou provoquée par des agents acides, basiques, ou encore par l'eau chaude (**Muanda, 2010**).

2.3.7.2 Les tanins condensés

Appelés aussi proanthocyanidines ou procyanidines, les tanins condensés sont des polyphénols de masse molaire élevée, insolubles dans divers solvants aqueux et organiques, tels que l'acétone et le méthanol. Ils résultent de la polymérisation auto-oxydative ou enzymatique des unités de flavan-3,4-diol, principalement liées par des liaisons C4-C8 (parfois C4-C6) entre les unités adjacentes, et sont ainsi nommés proanthocyanidines de type B. Lorsque la condensation se produit entre les unités adjacentes par une liaison C4-C8 et par une liaison d'éther additionnelle entre C2 et C7, les proanthocyanidines sont dites de type A. (**Wollgast & Anklam, 2000**).

2.4 Propriétés chimiques des polyphénols

Les propriétés chimiques des polyphénols découlent principalement de la structure de leurs noyaux aromatiques substitués par des groupements hydroxyles. Ces derniers exercent des effets mésomères donateurs d'électrons (+M), tandis que d'autres substituants peuvent présenter un effet mésomère attracteur (-M) (**Laouini, 2014**). L'effet donneur du groupe hydroxyle (+M) s'explique par la délocalisation de l'une des paires d'électrons non liants de l'atome d'oxygène vers le cycle aromatique, ce qui augmente la densité électronique aux positions C2, C4 et C6 (**Nkhili, 2009**).

2.4.1 Nucléophilie

La nucléophilie des polyphénols est liée à la forte densité électronique portée par l'atome d'oxygène du groupe hydroxyle ainsi que par les atomes de carbone en position ortho et para, conséquence de l'effet mésomère (+M). Cette richesse électronique rend les polyphénols particulièrement réactifs dans les réactions d'électrophilie aromatique, telles que l'alkylation ou l'acylation. (Mondal, S. 2023).

2.4.2 Propriétés réductrices

Le pouvoir réducteur des polyphénols dépend de leur potentiel d'ionisation (PI), c'est-à-dire l'énergie minimale requise pour arracher un électron. Ce potentiel diminue avec la présence de substituants donneurs d'électrons, ce qui accroît la capacité réductrice du composé. Par ailleurs, la facilité avec laquelle un phénol peut céder un atome d'hydrogène est quantifiée par l'énergie de dissociation homolytique de la liaison O–H (Nkhili, 2009).

2.4.3 Polarisabilité

La polarisabilité des polyphénols leur confère une aptitude à établir des interactions de dispersion (composante attractive des forces de Van der Waals) avec d'autres molécules polarisables. Ce phénomène repose sur la synchronisation des fluctuations électroniques entre deux espèces moléculaires voisines (Nkhili, 2009).

2.4.4 Liaisons hydrogène

Les polyphénols peuvent jouer un double rôle dans les interactions par liaisons hydrogène : ils agissent comme donneurs grâce au caractère acide du proton du groupe hydroxyle, et comme accepteurs par l'intermédiaire de la paire d'électrons libres de l'oxygène non engagée dans la résonance. Ainsi, un phénol peut à la fois céder et accepter une liaison hydrogène (Nkhili, 2009).

2.4.5 Acidité

La déprotonation du groupe hydroxyle entraîne la formation d'un ion phénate, dans lequel la délocalisation électronique de l'oxygène vers le noyau aromatique est accentuée (effet +M). Cette acidité modérée confère aux phénols une capacité renforcée à établir des liaisons hydrogène. De plus, la formation de l'anion phénate amplifie leurs propriétés chimiques, notamment la nucléophilie, le pouvoir réducteur et la polarisabilité (Nkhili, 2009).

2.4.6 Activité antioxydante des polyphénols

D'après Han, X., Shen, T., & Lou, H. (2007), de nombreuses maladies sont associées au stress oxydatif, un déséquilibre entre la production excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) et de l'azote (ERN), et la capacité des systèmes antioxydants à les neutraliser. Pour se défendre contre cette surproduction de radicaux libres (RLs), l'organisme humain a développé des mécanismes antioxydants endogènes et exogènes visant à maintenir l'équilibre redox. Parmi les composés exogènes, les polyphénols alimentaires jouent un rôle clé grâce à leur puissant potentiel antioxydant. Selon (Falleh et al. 2008), leur efficacité surpasserait même celle des antioxydants synthétiques, tout en présentant une meilleure innocuité.

Les antioxydants agissent comme des agents protecteurs en empêchant les ERO d'endommager les cibles biologiques telles que l'ADN, les lipides et les protéines. Leur efficacité repose principalement sur leur capacité à piéger les radicaux libres. (Gardès-Albert et al, 2003)

En fonction de leur mode d'action, les antioxydants sont classés en deux catégories : les primaires et les secondaires (Ré et al., 2005). Les polyphénols peuvent être considérés comme des antioxydants primaires lorsqu'ils interrompent les réactions en chaîne des radicaux libres en donnant un atome d'hydrogène ou un électron, formant ainsi un radical stable. Ils peuvent aussi agir comme antioxydants secondaires en complexant ou en dégradant des molécules impliquées dans la formation des RLs (telles que l'oxygène, les ions métalliques ou les peroxydes). (Moualek, 2018)

(Balasundram et al. 2006) soulignent que l'activité antioxydante des polyphénols est intimement liée à leur structure chimique. Elle dépend notamment du type de composé, du degré de méthylation, de glycosylation, de polymérisation, ainsi que du nombre et de la position des groupes hydroxyles. Plus le degré d'hydroxylation est élevé, plus l'activité antioxydante augmente ; à l'inverse, elle tend à diminuer avec une méthylation accrue.

2.5 Propriété biologique des polyphénols

2.5.1 Propriétés antimicrobiennes

Les composés phénoliques d'origine végétale regroupent notamment les acides phénoliques, les flavonoïdes et les tanins, produits par les plantes en réponse aux infections microbiennes. (Hatano et al., 2008)

Les polyphénols sont reconnus pour leurs propriétés antibactériennes contre une large variété

de micro-organismes, et plusieurs médicaments efficaces ont été développés à partir de ces composés. **(Hatano et al., 2005 ; Szabo, 2010)**

Ils présentent non seulement une activité antibactérienne propre, mais sont également capables d'inhiber la résistance des agents pathogènes aux antibiotiques, ou encore d'agir en synergie avec les antimicrobiens traditionnels, tels que les antibiotiques. **(Hatano et al., 2005 ; Hatano et al., 2008)**

Par ailleurs, les préparations à base de plantes sont souvent plus accessibles sur le plan économique, induisent généralement moins d'effets secondaires, et peuvent constituer un complément efficace à d'autres traitements médicaux dans la lutte contre les infections microbiennes.

2.5.2 Propriétés cardioprotectrices

Les polyphénols jouent un rôle bénéfique dans la santé cardiovasculaire, notamment grâce à leurs effets directs sur les vaisseaux sanguins, en particulier au niveau de l'endothélium. Des études expérimentales et cliniques ont démontré qu'ils favorisent la production de substances protectrices comme le monoxyde d'azote (NO), qui contribue à la vasodilatation.

De plus, ils agissent en inhibant les réponses inflammatoires et la formation de caillots (thrombose), tout en améliorant la fonction endothéliale et en réduisant le stress oxydatif vasculaire. Ces actions combinées permettent de prévenir ou d'atténuer des pathologies cardiovasculaires majeures, telles que l'hypertension artérielle. **(Auger & Kerth, 2014)**

2.5.3 Propriétés anticancéreuses

Les polyphénols ont la capacité de stimuler les mécanismes naturels de défense de l'organisme contre le développement du cancer. Grâce à leur action précoce, ils peuvent contribuer à bloquer l'apparition de la maladie dès les premières étapes, en favorisant l'élimination des cellules mutées par les tissus ciblés.

Certaines cellules, comme les hépatocytes, produisent des enzymes dites de phase I (notamment les monooxygénases comme le cytochrome P-450), capables d'oxyder des substances mutagènes. Ces dernières deviennent alors les substrats des enzymes de phase II (telles que les glucuronyl-transférases ou les sulfo-transférases), qui les transforment en composés hydrosolubles, facilement éliminés par l'organisme.

Ces enzymes détoxifiantes de phases I et II sont également présentes dans la muqueuse intestinale, où leur activité est induite par la consommation de polyphénols d'origine végétale, notamment ceux présents dans les légumes, ainsi que par les isothiocyanates, des composés dérivés des glucosinolates. (Ames et al., 1995 ; Johnson, 1999)

2.5.4 Propriétés anti-hémolytiques

L'hémolyse chronique constitue l'une des caractéristiques majeures de la drépanocytose, réduisant la durée de vie des globules rouges d'environ 70 % (Singh & Rajini, 2008). En raison de leur richesse en acides gras polyinsaturés, de leur forte teneur en hémoglobine cytoplasmique et en oxygène, les érythrocytes sont particulièrement vulnérables au stress oxydatif. Celui-ci provoque leur destruction, entraînant la libération d'hémoglobine, un puissant catalyseur de l'oxydation lipidique et d'autres réactions conduisant à la dégradation de la structure et des fonctions cellulaires. (Suwalsky et al., 2006 ; Asgary et al., 2005)

Il a été démontré que le déséquilibre entre la production de radicaux libres et la présence d'antioxydants endogènes réduit la durée de vie des érythrocytes dans diverses situations pathologiques comme le diabète, les infections, l'hypoxie, mais aussi sous l'effet d'habitudes telles que le tabagisme ou la consommation chronique d'alcool — toutes caractérisées par une surcharge en radicaux libres. (Cimen, 2008)

De nombreuses recherches ont mis en évidence que certains métabolites secondaires, notamment les polyphénols issus de plantes médicinales et aromatiques, possèdent un fort pouvoir antioxydant grâce à leurs groupements hydroxyles. Ces composés naturels offrent une protection efficace contre diverses maladies liées au stress oxydatif. (Vaya et al., 2003)

2.5.5 Propriétés anti-inflammatoires

Les polyphénols possèdent des propriétés anti-inflammatoires bien établies, principalement grâce à leur capacité à moduler les voies de signalisation impliquées dans la réponse inflammatoire. Selon Gonzalez-Gallego et al. (2010), ces composés agissent en inhibant l'activation du facteur nucléaire kappa B (NF- κ B), un régulateur clé de l'expression des gènes pro-inflammatoires tels que les cytokines (TNF- α , IL-1 β) et les enzymes (COX-2, iNOS). Cette inhibition réduit la production de médiateurs inflammatoires, limitant ainsi la cascade inflammatoire. Par ailleurs, les polyphénols exercent une action antioxydante en neutralisant les espèces réactives de l'oxygène (ROS) qui contribuent à l'inflammation chronique. Ces mécanismes combinés expliquent l'efficacité des polyphénols dans la réduction de

l'inflammation, ce qui en fait des molécules prometteuses pour la prévention et le traitement de maladies inflammatoires chroniques. **(Gonzalez-Gallego et al., 2010)**

Chapitre 3 : Matériels et Méthodes

3.1 Objectif

L'objectif principal de cette étude est de valoriser les composés bioactifs extraits de la spiruline, en particulier les polyphénols et les protéines, à travers la formulation d'un gel nettoyant hydratant destiné à l'usage cosmétique. Cette approche repose sur la richesse fonctionnelle de ces deux classes de molécules, connues pour leurs propriétés antioxydantes, hydratantes, anti-inflammatoires et réparatrices.

En intégrant ces extraits naturels dans une base cosmétique douce, notre objectif est de développer un produit capable de nettoyer la peau en douceur, tout en préservant son équilibre hydrolipidique et en améliorant sa santé globale. Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation de la spiruline en tant qu'ingrédient multifonctionnel à fort potentiel dans le domaine de la cosmétique verte et innovante.

L'objectif de l'étude consiste à :

- Préparer des extraits à partir de la spiruline en utilisant trois solvants : l'éthanol 70 %, le méthanol 70 % et l'eau chaude.
- Déterminer la teneur en polyphénols totaux, et mettre en évidence la présence de flavonoïdes et de protéines dans les extraits.
- Mesurer l'activité antioxydant de l'extrait à l'aide de la méthode de piégeage du radical libre DPPH.
- Évaluer l'activité antibactérienne et antifongique des extraits obtenus vis-à-vis de différentes souches bactériennes et fongiques.
- Évaluer l'activité anti-inflammatoire in vivo des extraits végétaux.
- Test de tolérance cutané du produit final.
- Test microbiologique du produit final.

3.2 Lieux de travail

Les travaux ont été réalisés au sein des laboratoires de l'École Nationale des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL), situés à Dély Ibrahim bois des cars Alger, Algérie, ainsi qu'au laboratoire de microbiologie et au laboratoire d'animalerie du complexe d'antibiotique SAIDAL de Médéa (Algérie).

3.3 Matériels et produits utilisés

3.3.1 Matériels et produits chimique

Tableau 6: tableau récapitulatif du matériel et produits utilisés en laboratoire.

Verreries/ d'autre matériel	Appareillage	Réactifs et produits
Béchers	Balance précise	Eau distillé
Spatule en métal	Agitateur	Ethanol
Boîte de pétri	Centrifugeuse	Méthanol
Entonnoir	Etuve	Le réactif Fiolin-cicalteu
Ballon en verre	Spectrophotomètre UV	Acide galique
Eprouvettes	Réfrigérateur	Carbonate de sodium
Tubes à essai	Rota vapeur	Hydroxyde de sodium NAOH
Fioles jaugées	Lyophilisateur	Ether de pétrol
Micropipettes	Vortex	Ether di-éthylique
Embouts	Plaque chauffante	Acétate di-éthyle
Papier filtre "Whatman"	Autoclave	N-butanol
Papier aluminium	PH-mètre	2,2-Diphenyl-1- picrylhydrazyl (DPPH)
Flacon opaque		Chlorure ferrique FeCl ₃
Une plaque en aluminium		Chloroforme CHCl ₃
		Hydroxyde de sodium HCl

3.3.2 Matériel biologique

- **Matériel végétal**

Nous avons travaillé avec une cyanobactérie du genre *Arthrospira platensis*, fournie par la ferme SARL K-Marine, située à Khraïcia (Alger, Algérie)



Figure 6: k MARINE fournisseur de la poudre utiliser

- **Matériel animal**
 - **Lapins**

Des lapins albinos, mâles et femelles, d'un poids compris entre 2,5 kg et 3 kg, ont été utilisés. Les conditions d'élevage ont été assurées au sein du laboratoire d'animalerie du complexe d'antibiotiques SAIDAL à Médéa (Algérie).



Figure 7: les lapins utilisés pour le test de tolérance cutané.

- **Souris**

Des souris albinos, mâles et femelles, d'un poids compris entre 18 g et 24 g, ont été utilisées.



Figure 8: les souris utilisées pour l'évaluation de l'activité anti-inflammatoire des extraits de spiruline.

- **Souches microbiennes**

Trois souches bactériennes, ainsi que deux espèces fongiques, provenant du laboratoire de microbiologie du complexe d'antibiotique SAIDAL (Médéa, Algérie), ont été utilisées pour l'évaluation de l'activité antibactérienne et antifongique des extraits.

Tableau 7: les souches microbiennes testées.

Micro-organisme	Type biologique	Classification microbiologique	Référence
<i>Escherichia coli</i>	Bactérie	Gram négatif (Gram -)	ATCC 8739
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Bactérie	Gram négatif (Gram -)	ATCC 9027
<i>Staphylococcus aureus</i>	Bactérie	Gram positif (Gram +)	ATCC 6538
<i>Candida albicans</i>	Champignon (levure)	Champignon pathogène	ATCC 10231
<i>Aspergillus brasiliensis</i>	Champignon (moisissure)	Champignon filamentaire	ATCC 16404

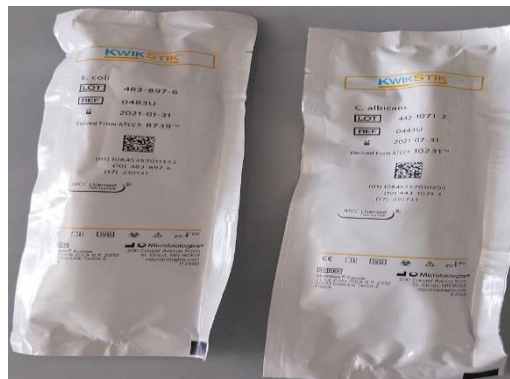


Figure 9 : souches ATCC.

3.4 Méthodes d'extraction des polyphénols à partir de la matière sèche *Arthrospira Platensis*

3.4.1 Extraction (solide / liquide) par macération hydro-éthanolique

Le Principe

La macération, également appelée extraction solide-liquide, est une technique d'extraction qui consiste à immerger la poudre de spiruline (broyat) dans un solvant aqueux, afin d'extraire les

composés bioactifs tels que les polyphénols et les flavonoïdes. Cette méthode permet une diffusion progressive des molécules actives du solide vers le solvant, favorisant ainsi une extraction efficace à température ambiante (**Do et al. 2014**).

Mode opératoire

La préparation des extraits hydro-alcoolique de spiruline a été réalisée en s'inspirant du protocole décrit par **Sultana, B. (2009)** avec quelques modifications. Deux solvants hydro-alcooliques ont été testés : le **méthanol 70 % (v/v)** et l'**éthanol 70 % (v/v)**, reconnus pour leur efficacité dans l'extraction des composés phénoliques.

Dix grammes de poudre de spiruline sèche ont été introduits dans un bécher, puis 100 mL d'éthanol à 70 % (v/v) ont été ajoutés. À l'aide d'un agitateur magnétique, le mélange a été agité à température ambiante pendant 2 à 12 heures, puis filtré.

L'opération a été répétée 3 à 4 fois afin de maximiser la libération des composés phénoliques. Les mélanges ont été filtrés à l'aide de papier filtre Whatman afin de séparer les phases solide et liquide.

Evaporation

Les extraits filtrés ont ensuite été concentrés par évaporation à 45 °C à l'aide d'un rotavapeur. Les extraits secs obtenus ont été récupérés avec de l'éthanol, puis conservés à 4 °C jusqu'aux analyses ultérieures.

3.4.2 Extraction (solide / liquide) par macération hydro-méthanolique

Mode opératoire

Concernant le deuxième solvant, le même processus a été appliqué. Ainsi, 100 mL de méthanol à 70 % ont été ajoutés dans un bécher contenant 10 g de spiruline sèche.

Le mélange a été agité à température ambiante pendant 2 à 12 heures à l'aide d'un agitateur magnétique, en répétant l'opération 3 à 4 fois afin d'optimiser l'extraction.

La suspension a ensuite été filtrée à l'aide d'un papier filtre Whatman afin de séparer les phases solide et liquide.

Evaporation

Les extraits filtrés ont été concentrés par évaporation à 40 °C à l'aide d'un rotavapeur. Les extraits secs obtenus ont été conservés à 4 °C jusqu'aux analyses ultérieures.

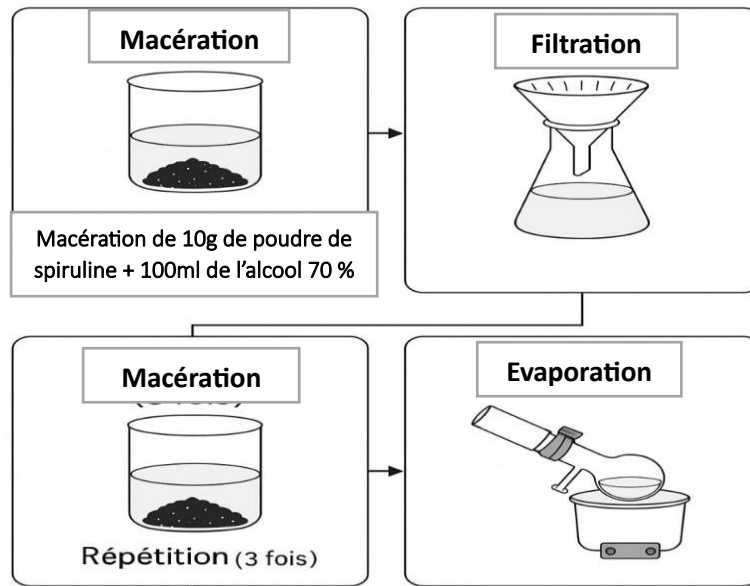


Figure 10: diagramme de l'extraction hydro-alcoolique.

Calcul du rendement

Le calcul du rendement s'effectue en se basant sur la masse de l'extract sec obtenu, exprimée en grammes. Cette valeur correspond à la différence entre le poids du flacon après évaporation et celui du flacon vide. Le rendement est ensuite exprimé en pourcentage selon la formule suivante (Mohammedi, Z. 2005).

$$\text{Rendement (\%)} = \frac{P_1 - P_2}{P_3} \times 100$$

Où :

P1 : Poids du flacon après séchage

P2 : Poids du flacon avant séchage (flacon vide)

P3 : Poids de la matière végétale sèche de départ.

3.4.3 Extraction (solide / liquide) avec de l'eau chaude

Le principe

L'extraction aqueuse des composés phénoliques repose sur l'utilisation de l'eau comme solvant écologique permettant d'isoler efficacement les polyphénols hydrosolubles tout en préservant leur activité antioxydante. Cette méthode s'appuie sur des conditions d'extraction modérées,

notamment une température contrôlée et un temps d'extraction limité, afin de maximiser le rendement sans entraîner la dégradation des composés sensibles. L'agitation favorise le transfert de matière, tandis que la répétition des cycles d'extraction permet d'augmenter l'efficacité d'extraction. Et l'ajustement précis des paramètres tels que le ratio solvant/matière, la température et la durée d'extraction, est essentiel pour obtenir un extrait riche en composés phénoliques, présentant une forte capacité antioxydant (Goldsmith et al. 2014).

Mode opératoire

Cette extraction a été réalisée en s'inspirant du protocole de (Vuong et al. 2013). 7,5 g de poudre de spiruline ont été dispersés dans 100 mL d'eau distillée (rapport massique 100 :7,5 mL/g), conformément aux conditions d'extraction optimales décrites dans l'étude de référence. Le mélange a ensuite été chauffé à 70 °C dans un bain-marie équipé d'un agitateur, et maintenu sous agitation constante pendant 20 minutes.

L'opération d'extraction a été répétée trois fois, en reprenant à chaque cycle la fraction solide retenue par la filtration à l'aide d'un papier filtre Whatman et en la remettant en suspension dans 200 mL d'eau distillée préalablement chauffée.

Lyophilisation

Les trois filtrats ainsi obtenus ont ensuite été combinés dans un récipient unique puis congelés pendant 24h, puis soumis à une lyophilisation pour obtenir une poudre sèche brute, qui a été conservée à 4 °C jusqu'aux analyses ultérieures.

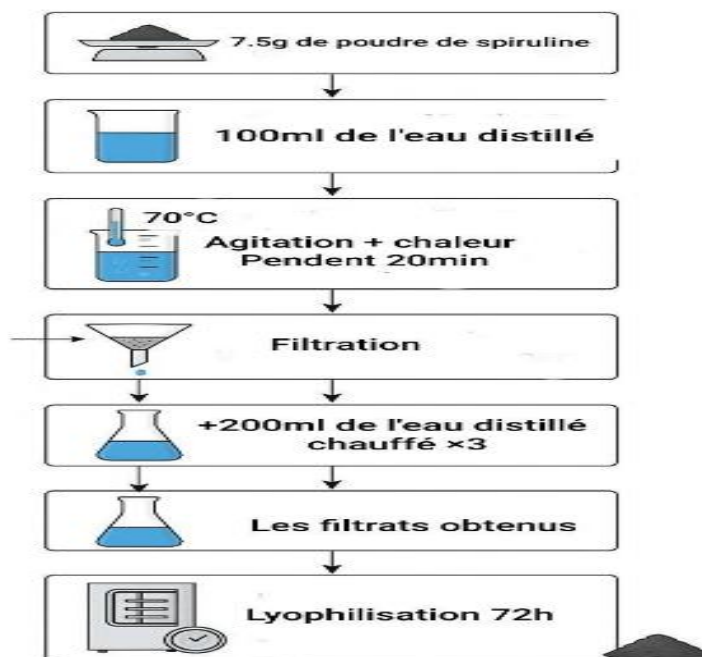


Figure 11: diagramme d'extraction aqueuse

3.5 Les tests phytochimiques

Détection des composés phénoliques (Réaction au FeCl₃)

Placer 2 ml de chaque solution dans un tube à essai et ajouter quelques gouttes de FeCl₃ 10% (BÉKRO et al, 2007)

La présence des composés phénoliques dans les extraits est indiquée par l'apparition de la couleur vert noirâtre.

Tanins

La détection des tanins a été effectuée en ajoutant 2 gouttes de chlorure ferrique (FeCl₃) à 1 % dans 1 mL d'extrait, suivie d'une incubation de 15 minutes à 50 °C. L'apparition d'une coloration bleu-noir indique la présence de tanins galliques, tandis qu'une teinte brun-verdâtre traduit la présence de tanins catéchiqes (Vijayakumari et al., 2013).

Flavonoïdes

Les flavonoïdes ont été mis en évidence en mélangeant 1 mL d'extrait avec 1 mL d'acide chlorhydrique concentré et quelques copeaux de magnésium. Après agitation, une coloration rouge, orange ou rose révèle la présence de ces composés (Karumi et al., 2004).

Coumarines

2 mL d'extrait ont été mélangés à 3 mL d'une solution de soude (NaOH à 10 %), puis agités. L'apparition d'une coloration jaune a été interprétée comme un indicateur positif de la présence de coumarines (Seladji et al., 2013).

Terpénoïdes

2 mL de chloroforme (CHCl₃) ont été ajoutées à 5 mL d'extrait, puis en ajoutant doucement 3 mL d'acide sulfurique concentré. Après agitation, la formation de deux phases distinctes avec une interface brunâtre suggère la présence de terpénoïdes (Karumi et al., 2004).

Les saponosides

Les saponines ont été détectés en agitant vigoureusement 10 mL d'extrait aqueux pendant 15 secondes, puis en laissant reposer le mélange pendant 15 minutes. La formation d'une mousse

persistante de plus de 1 cm d'épaisseur a été considérée comme un test positif (**Karumi et al., 2004**).

3.6 Dosage des polyphénols totaux

Le principe

La teneur totale en polyphénols a été déterminée par la méthode colorimétrique utilisant le réactif de Folin-Ciocalteu, selon le protocole de **Singleton** tel que rapporté par (**Dewanto et al. 2002**). Ce réactif, initialement de couleur jaune, est constitué d'un mélange d'acide phosphomolybdique ($H_3PMO_{12}O_{40}$) et d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_{40}$). Le principe de la méthode repose sur la capacité des groupements phénoliques à réduire ce mélange en milieu alcalin, entraînant la formation d'un complexe d'oxydes métalliques de couleur bleue. Cette coloration bleue résulte de la réduction des oxydes de molybdène et de tungstène par les composés phénoliques oxydables présents dans l'échantillon. L'intensité de cette couleur, mesurée par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 765 nm, est proportionnelle à la concentration en polyphénols totaux (**Georgé et al., 2005**). Cette méthode, simple et sensible, reste l'une des plus couramment utilisées pour l'évaluation globale du contenu phénolique dans les extraits végétaux.

Mode opératoire

La teneur en polyphénols totaux a été déterminée à l'aide de la méthode colorimétrique de Folin-Ciocalteu en suivant le protocole (**Labreche, N., & Younsi, F. Z. 2022**) avec quelques modifications. Une gamme étalon d'acide gallique, allant de 2 à 500 $\mu\text{g/mL}$, a été préparée pour établir la courbe d'étalonnage. Pour chaque échantillon, 0,2 mL d'extrait a été placé dans un tube à essai, puis mélangé à 1 mL de réactif de Folin-Ciocalteu. Après une incubation de 5 minutes à température ambiante, 0,8 mL d'une solution de carbonate de sodium (Na_2CO_3) à 7,5 % a été ajoutée. Les mélanges ont ensuite été incubés pendant 1 heure à l'abri de la lumière. L'absorbance a été mesurée à 765 nm à l'aide d'un spectrophotomètre, ce qui a permis d'établir la courbe d'étalonnage et de calculer la concentration en polyphénols totaux des échantillons.



Figure 12: Une gamme étalon d'acide gallique avec différentes concentrations

3.7 Extraction des flavonoïdes (liquide / liquide)

Le principe

L'extraction liquide-liquide est une méthode de séparation fondée sur la différence de solubilité des composés dans deux phases liquides non miscibles, le plus souvent une phase aqueuse et une phase organique. Lorsqu'un composé est présent dans une solution, il peut être transféré dans une autre phase selon sa polarité et son affinité chimique pour le solvant utilisé. Cette technique permet ainsi de fractionner les extraits bruts en classes de composés plus homogènes, tels que les flavonoïdes, en utilisant une série de solvants de polarité croissante comme l'éther diéthylique, l'acétate d'éthyle et le n-butanol (Treki et al., 2008).

Cette méthode est couramment utilisée pour éliminer les impuretés lipidiques et chlorophylliennes et concentrer les composés d'intérêt dans l'analyse des extraits végétaux ou algaux, selon la méthode décrite par (Treki et al., 2008).

Prétraitement : Dégraissage à l'éther de pétrole

Avant l'extraction des flavonoïdes, les trois extraits aqueux issus des méthodes d'extraction précédentes (hydro-éthanolique, hydro-méthanolique et aqueuse) ont été préalablement débarrassés des composés non phénoliques, notamment les lipides, les cires, les pigments chlorophylliens et les caroténoïdes, par un traitement à l'éther de pétrole. Pour ce faire, un volume d'éther de pétrole équivalent à un tiers du volume de l'extrait aqueux a été ajouté dans

une ampoule à décanter. Le mélange a été vigoureusement agité puis laissé au repos pendant une vingtaine de minutes, afin de permettre la séparation des deux phases : une phase organique (éther de pétrole) en surface, et une phase aqueuse en dessous. La phase organique a été éliminée, et l'opération répétée trois fois. La phase aqueuse ainsi purifiée a ensuite été utilisée pour les extractions suivantes.



Figure 15 : les différentes séparations obtenues par la méthode appliquée aux extraits hydro alcoolique et aqueux.

Extraction différentielle des flavonoïdes

Après dégraissage, 50 mL de chaque extrait ont été soumis à une extraction liquide/liquide par affrontement successif avec trois solvants organiques de polarité croissante : l'éther di-éthylique, l'acétate d'éthyle et le n-butanol. Chaque étape visait à extraire une classe spécifique de flavonoïdes en fonction de leur polarité.

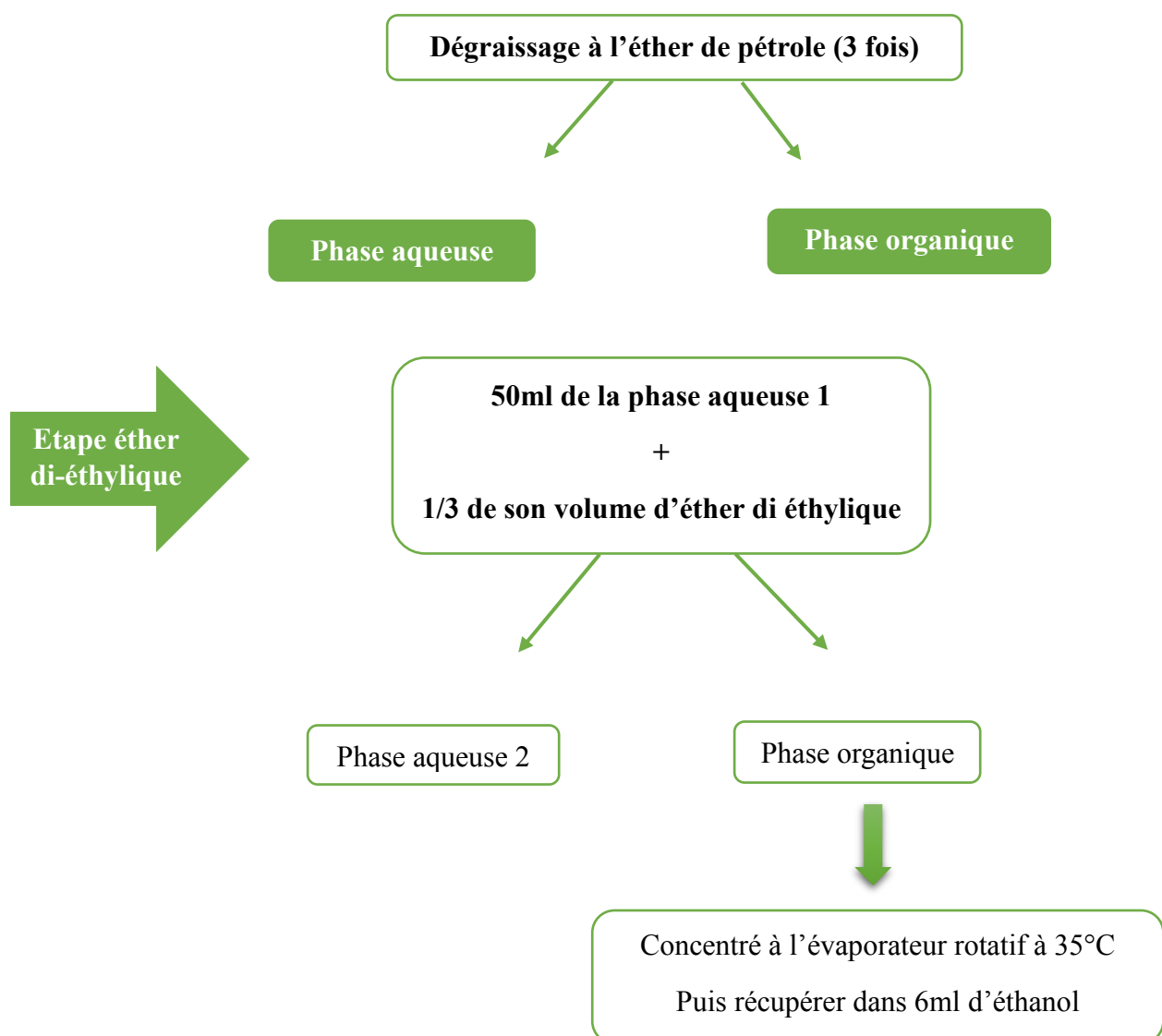
Dans un premier temps, l'affrontement a été réalisé avec l'éther di-éthylique. Celui-ci permet l'extraction des aglycones, principalement des composés phénoliques simples et des flavonoïdes non glycosylés. L'extrait aqueux a été mélangé à 1/3 de son volume d'éther di-éthylique dans une ampoule à décanter, agité puis laissé reposer durant 20 minutes. Après séparation, la phase organique a été récupérée et l'opération répétée trois fois. L'extrait

organique final a été concentré à l'évaporateur rotatif à 35 °C, puis le résidu sec a été récupéré dans 6 mL d'éthanol.

La deuxième étape a consisté à extraire les flavonoïdes monoglycosylés et une partie des diglycosides à l'aide de l'acétate d'éthyle. La phase aqueuse résiduelle issue de l'étape précédente a été confrontée à ce solvant selon la même procédure. La phase organique obtenue a été concentrée au rotavapeur à 35 °C, puis le résidu a été repris dans 6 mL d'éthanol

Enfin, la dernière étape a été réalisée avec le n-butanol, un solvant permettant d'extraire les flavonoïdes restants, principalement les diglycosides et triglycosides. La phase aqueuse issue de l'extraction à l'acétate d'éthyle a été traitée de la même manière, et la phase organique a été évaporée à 35 °C. L'extrait sec a été solubilisé dans 6 mL d'éthanol.

L'ensemble des extraits éthanoliques obtenus à l'issue de ces étapes ont été conservé à température ambiante dans des flacons hermétiques, en vue des analyses ultérieures.



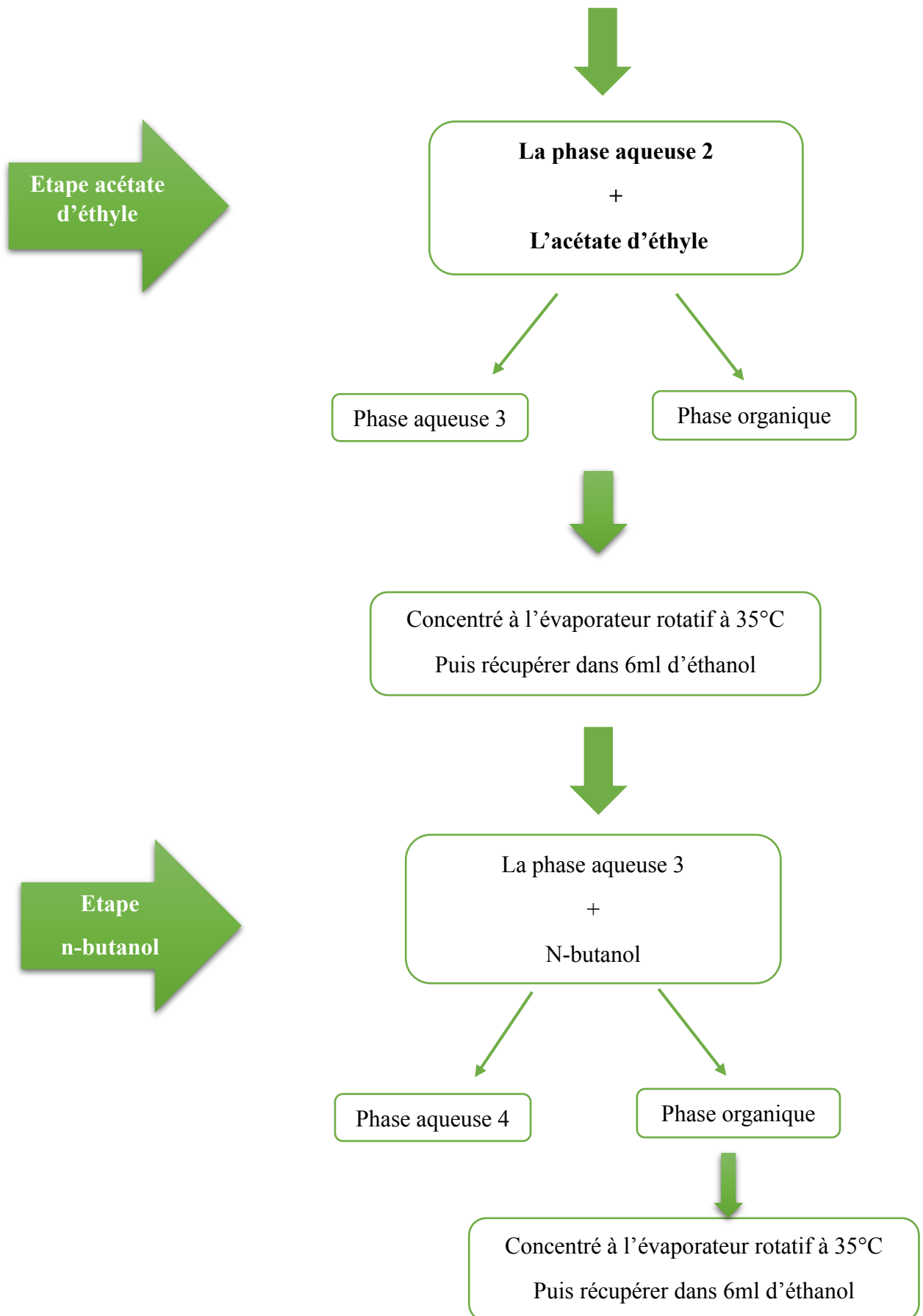


Figure 13: diagramme d'extraction liquide / liquide.

3.8 Caractérisation des composés phénolique par chromatographie sur couche mince (CCM)

Définition :

La chromatographie est une méthode biochimique couramment utilisée en biologie pour séparer et identifier les constituants d'un mélange. Elle repose sur la répartition sélective des composés entre deux phases : une phase mobile et une phase stationnaire. Plus précisément, la chromatographie sur couche mince (CCM) fonctionne selon des phénomènes d'adsorption, où la migration des constituants dépend de la nature de la phase mobile, de la phase stationnaire, ainsi que des propriétés physico-chimiques des molécules à séparer. Dans ce travail, la CCM a été employée pour séparer et mettre en évidence les composés phénoliques et flavonoïdes présents dans les trois extraits obtenus, afin d'évaluer les différences d'efficacité entre les différentes méthodes d'extraction utilisées.

a) Principe

La chromatographie sur couche mince (CCM) repose sur les phénomènes d'adsorption, d'interactions moléculaires et de polarité. Elle consiste à déposer un mélange de composés sur une plaque recouverte d'une phase stationnaire solide (généralement de la silice). Cette plaque est ensuite placée dans une cuve contenant un solvant (phase mobile), qui monte le long de la plaque par capillarité.

Au cours de cette migration, les différents composés du mélange sont entraînés à des hauteurs variables selon leur affinité relative pour la phase stationnaire et la phase mobile. Plus un composé est soluble dans la phase mobile et faiblement adsorbé par la phase stationnaire, plus il migre rapidement. Inversement, les composés fortement retenus par la phase stationnaire migrent lentement.

En général, en CCM, les substances peu polaires migrent plus rapidement que les composés polaires, en raison de leur plus faible interaction avec la phase stationnaire polaire. La séparation repose donc sur un équilibre dynamique entre l'adsorption sur la phase stationnaire et la solubilité dans la phase mobile. (Djafar, I., & Menzri, I. 2017).

Phase mobile (éluant)

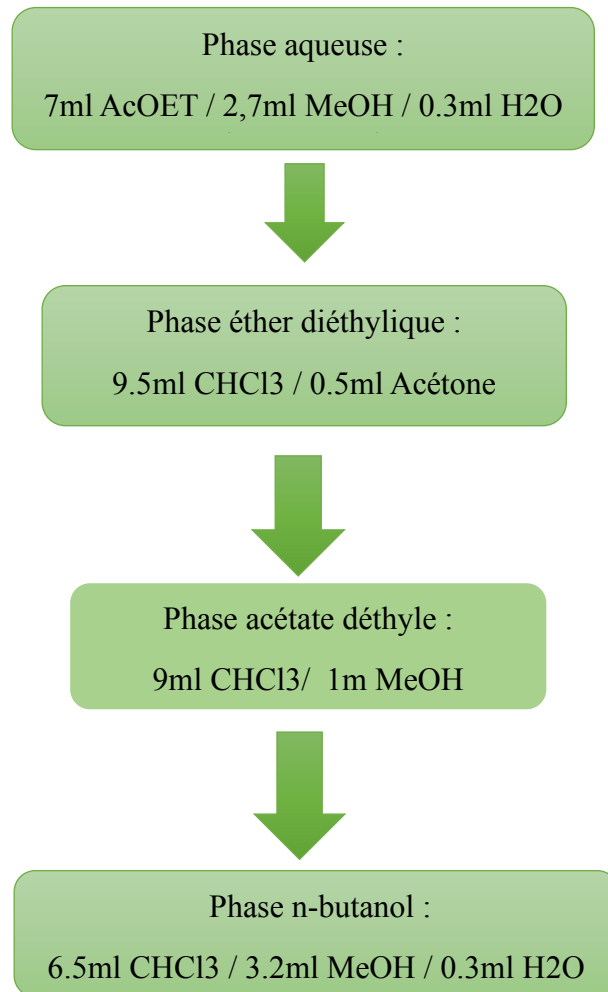


Figure 14: la plaque en aluminium utilisé pour la CCM

Phase stationnaire : Le gel de silice est le support le plus couramment utilisé ; il est appliqué sous forme d'une couche d'environ 0,25 mm d'épaisseur sur une plaque en aluminium.

Echantillons : Les extraits des différentes phases obtenues, la phase éther diéthylique, la phase acétate d'éthyle et la phase n-butanol.

Révéléateur chimique : Solution d'acide sulfurique + chaleur à l'aide d'une étuve.

1. Développement du chromatogramme

Le protocole adopté pour le développement du chromatogramme est basé sur celui décrit par **(Rihane et Benlahreche 2013)**. Dans un premier temps, le système solvant sélectionné est introduit dans une cuve à chromatographie, qui est ensuite hermétiquement fermée afin de permettre la saturation de son atmosphère en vapeurs de solvant. Une ligne de dépôt est tracée à environ 2,5 cm du bord inférieur de la plaque. À l'aide d'une micropipette, environ 0,5 µL de chaque échantillon est déposé sur cette ligne, formant des taches d'environ 2 mm de diamètre. La plaque est ensuite placée verticalement dans la cuve, sans que les taches ne soient immergées, puis le couvercle est remplacé afin d'assurer le bon développement du chromatogramme. L'élution est arrêtée lorsque le front du solvant atteint environ 1 cm du bord supérieur de la plaque. La plaque est alors retirée.

Révélation et calcul du rapport frontal (Rf)

Après séchage, la révélation des taches est effectuée selon la méthode chimique + chaleur, consiste à vaporiser la plaque avec une solution d'acide sulfurique (20 :80 ; v : v) puis mettre la plaque dans l'étuve à 120°C. Il est essentiel de cercler immédiatement les taches colorées visibles à la fin de la chromatographie, car certaines peuvent s'estomper avec le temps. Le rapport frontal (Rf) est ensuite calculé pour chaque spot selon la formule suivante :

$$Rf = \frac{\text{distance parcourue par le composé}}{\text{distance parcourue par le solvant}}$$

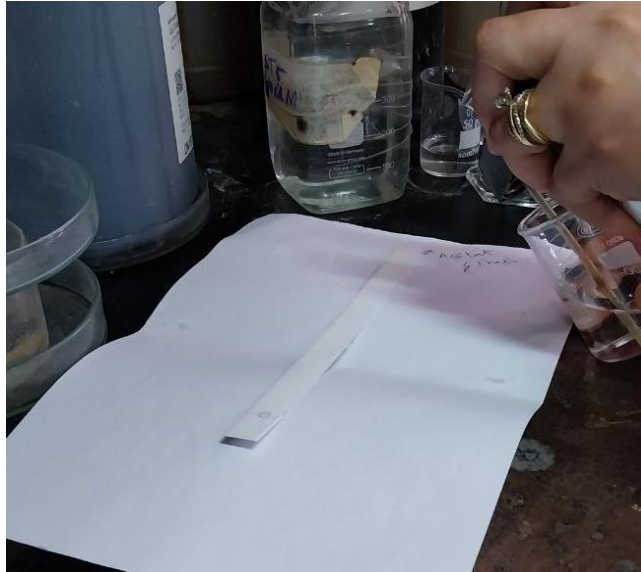


Figure 15: révélation chimique avec l'acide sulfurique.

3.9 Évaluation des activités biologiques des polyphénols de la spiruline

3.9.1 Activité antioxydante

Test de piégeage du radical DPPH

Principe :

Le test au radical DPPH est une méthode couramment utilisée pour évaluer le pouvoir antioxydant de différentes substances. Il repose sur la capacité des composés antioxydants à neutraliser le radical libre stable 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH•), soit par transfert d'un atome d'hydrogène à partir d'un groupement hydroxyle, soit par don d'électron. Ce radical présente une absorption maximale à 517 nm, mesurable par spectrophotométrie UV-visible. Lorsque le DPPH• est réduit par un antioxydant, son absorption diminue, ce qui permet de suivre facilement la réaction (Afonso et al., 2016).

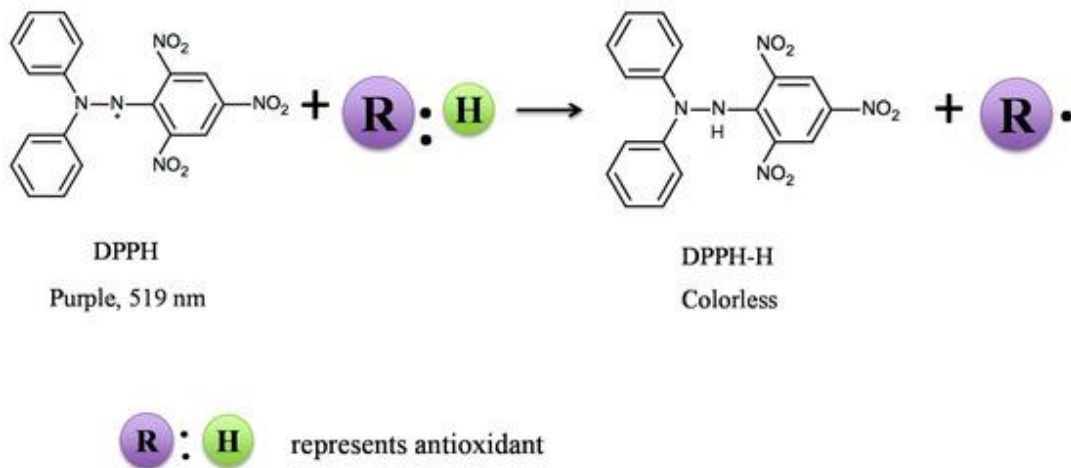


Figure 16: Réaction d'une molécule antioxydant avec le radical DPPH (Liang & Kitts, 2014)

3.9.1.1 Dosage de l'activité antioxydante par la méthode DPPH

L'activité antioxydante des échantillons a été déterminée en utilisant la méthode du radical libre stable 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyl (DPPH), selon le protocole décrit par **(Bothma, Divakar et Meredith 2008)**. Une solution de DPPH a été préparée à une concentration de 2 % (m/v) dans du méthanol pur. Les échantillons à tester ont également été dilués dans le méthanol. Pour chaque essai, 1 mL de la solution de DPPH a été mélangé à 1 mL de la solution d'échantillon, dans des tubes à essai en verre. Le mélange a été agité vigoureusement, puis laissé à reposer pendant 30 minutes dans l'obscurité à température ambiante, afin d'éviter l'oxydation prématurée. L'absorbance du mélange a ensuite été mesurée à 517 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible. Une solution d'acide ascorbique (vitamine C), préparée à une concentration de 1 mg/mL dans du méthanol, a été utilisée comme témoin positif **(Brand-Williams, Cuvelier & Berset, 1995)**.



Figure 17: la gamme d'étalonnage préparées.

Le pourcentage d'inhibition de l'activité radicalaire a été calculé à partir des valeurs d'absorbance selon la formule suivante :

$$I (\%) = \frac{A_{\text{contrôle}} - A_{\text{échantillon}}}{A_{\text{contrôle}}} \times 100$$

Où :

- $A_{\text{contrôle}}$ est l'absorbance du témoin sans extrait
- $A_{\text{échantillon}}$ est l'absorbance en présence de l'extrait testé.

3.9.2 Evaluation de l'activité antibactérienne et antifongique des extraits obtenus

Préparation des pré-cultures microbiennes à partir de souches ATCC :

Les souches de référence (*Escherichia coli* ATCC 8739, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027, *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, *Candida albicans* ATCC 10231 et *Aspergillus brasiliensis* ATCC 16404) ont été ensemencées sur des boîtes de Pétri contenant de la gélose nutritive pour les bactéries et le milieu Sabouraud pour les champignons, puis incubées à 37 °C pendant 24 heures pour les bactéries et 28 °C pendant 72 H pour levure (*Candida albicans*) et à 28°C pendant 7 jours pour moisissure (*Aspergillus brasiliensis*).

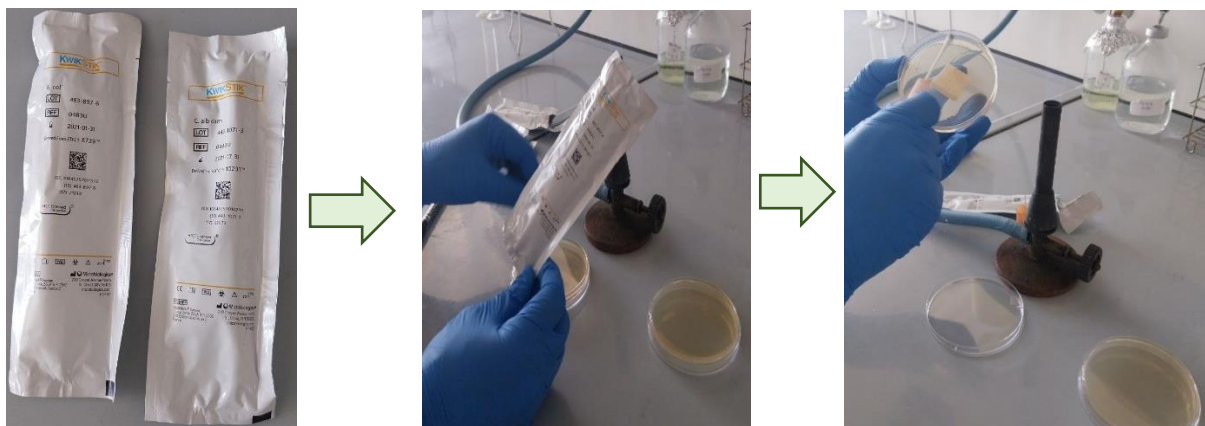


Figure 18: les étapes de pré cultures à partir des souches ATCC

Préparation des milieux de cultures

Les bactéries ont étéensemencées sur un milieu de culture de gélose nutritive, tandis que les champignons ont été cultivés sur un milieu à base de gélose Sabouraud. Les deux milieux ont été stérilisés à 125 °C pendant 2 heures avant utilisation.

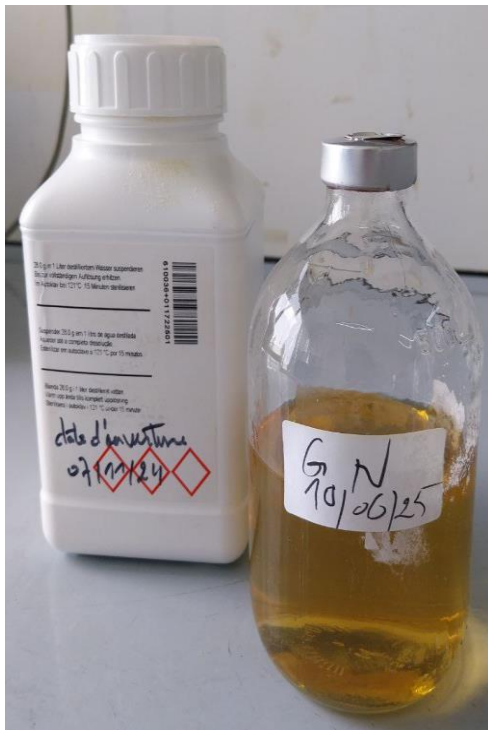


Figure 20: gélose nutritive



Figure 19: Sabouraud

Préparation des disques d'antibiotique

Les disques antibiotiques ont été préparés en déposant une quantité précise de solutions standardisées d'antibiotiques (tétracycline 30 µg/disque) et d'antifongiques (nystatine 20–30 µg/disque ou 100 UI/disque) au centre de disques de papier stériles (6 mm). (Bio-Rad. 2020)

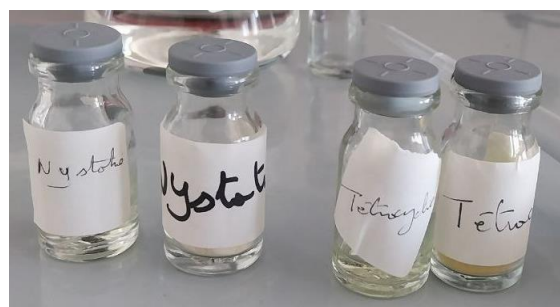


Figure 21: les disques d'antibiotique (6mm)



Figure 22: préparation des antibiotiques

Préparation des suspensions bactériennes

La préparation de l'inoculum a été réalisée dans des conditions stériles, en zone aseptique. À l'aide d'une anse de platine stérile, deux colonies bien isolées ont été prélevées à partir des boîtes de culture, puis transférées dans des tubes à essai stériles contenant une solution de NaCl à 0,9 %. Après homogénéisation des suspensions à l'aide d'un vortex, leur densité optique (DO) a été mesurée au spectrophotomètre à 625 nm. L'absorbance a été ajustée entre 0,08 et 1, ce qui correspond à une concentration bactérienne comprise entre 10^7 et 10^8 UFC/mL (Unités Formant Colonie). Cette suspension mère a ensuite été diluée au $1/10^e$ pour obtenir une concentration finale standardisée d'environ 10^6 UFC/mL, utilisée pour les tests d'évaluation de l'activité antimicrobienne.

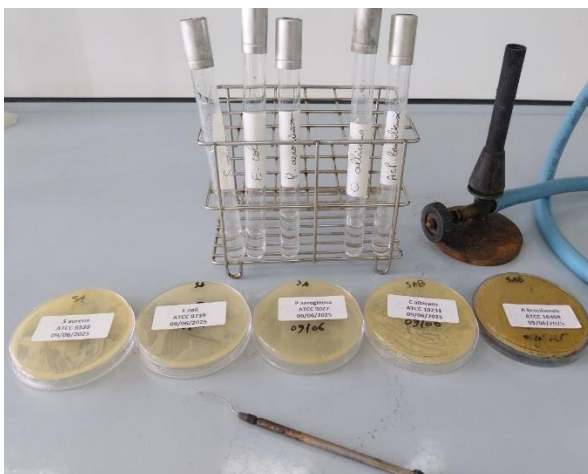


Figure 24: préparation d'inoculum



Figure 23: lecture spectrophotométrique

Évaluation de l'activité antimicrobiennes par la méthode de diffusion sur disques en milieu solide

Principe :

L'activité antimicrobienne a été évaluée par la méthode de diffusion sur disques en milieu solide (gélose). Cette technique consiste à mesurer le diamètre de la zone d'inhibition de la croissance bactérienne autour de disques imbibés d'extrait, déposés à la surface d'une gélose ensemencée. Les étapes opératoires sont similaires à celles utilisées pour la réalisation d'un antibiogramme. **(Bauer & Kirby 1966)**

Mode opératoire :

Le test de l'activité antimicrobienne de l'extrait éthanolique et butanolique de spiruline a été évalué au sein du laboratoire de microbiologie du complexe d'antibiotique SAIDAL de Médéa (Algérie).

Le protocole a été adapté de **(Zaidan et al. 2005)**, avec quelques modifications.

- Verser la gélose Mueller-Hinton (MH) stérile dans des boîtes de Pétri jusqu'à une épaisseur uniforme de 4 mm.
- Laisser solidifier et sécher les boîtes à température ambiante avant utilisation.
- Prélever la suspension bactérienne en imbibant un écouvillon stérile.
- Éliminer l'excès de liquide en pressant l'écouvillon contre la paroi interne du tube.
- Ensemencer uniformément la surface de la gélose par un écouvillonnage en stries croisées dans plusieurs directions.
- Terminer l'ensemencement en passant l'écouvillon sur le pourtour de la boîte.
- Recharger l'écouvillon à chaque fois qu'une nouvelle boîte est ensemencée.
- À l'aide d'une pince stérile, déposer des disques de papier stériles de 6 mm de diamètre, imbibés d'extrait à tester, sur la surface de la gélose ensemencée.
- Déposer également :
 - Un disque témoin négatif imbibé d'éthanol.
 - Un disque témoin positif imbibé d'un antibiotique adapté à la souche bactérienne.
- Placer soigneusement les disques en appuyant légèrement pour assurer un bon contact avec la gélose, sans les déplacer par la suite.

- Incuber les boîtes à 35 °C pendant 18 à 24 heures.
- Mesurer ensuite le diamètre (en mm) des zones d'inhibition autour de chaque disque pour évaluer l'activité antibactérienne des extraits testés.



Figure 25: Coulage du milieu Mueller-Hinton (MH) dans les boites à Petri.

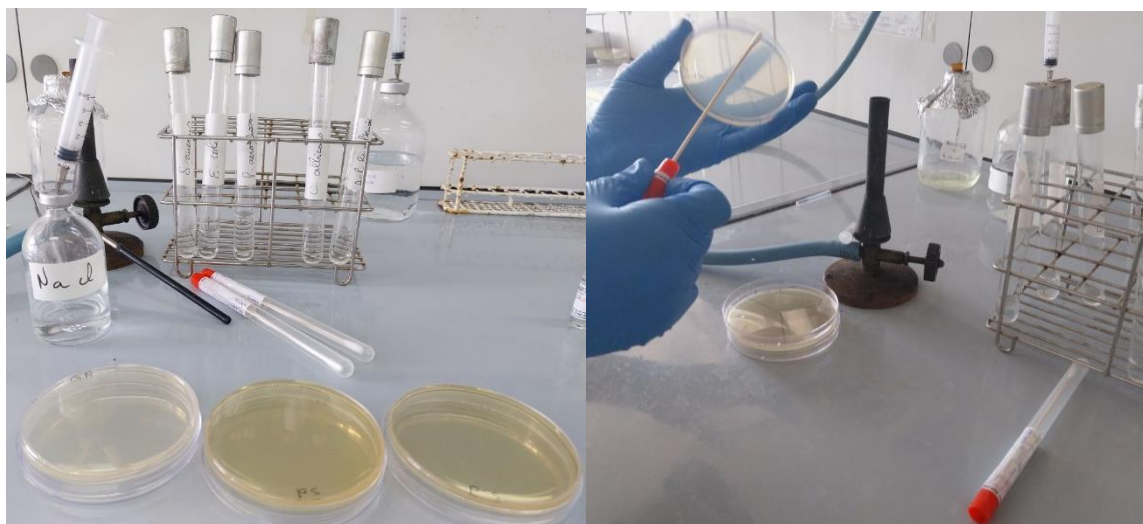


Figure 26: prélèvement et l'ensemencement des suspensions microbiennes

Lecture des résultats

L'activité antibactérienne des extraits a été évaluée par la méthode de diffusion sur disque (6 mm). Le diamètre des zones d'inhibition, mesuré en millimètres (mm), a permis de classer

l'efficacité antibactérienne. Selon (Valgas et al. 2007), après la mesure du diamètre des zones d'inhibition, les souches microbiennes sont classées selon leur sensibilité comme suit :

≤ 6 mm : aucune activité (résistance)

- 7–9 mm : activité faible
- 10–13 mm : activité modérée
- 14–18 mm : activité forte
- > 18 mm : activité très forte

Cette grille d'interprétation a été utilisée pour analyser les résultats obtenus des deux extraits éthanolique et butanolique de spiruline sur différentes souches microbiennes.

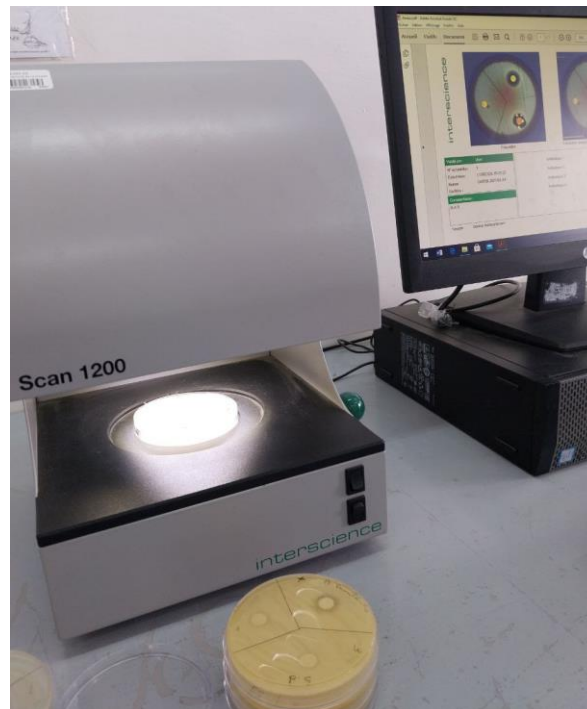


Figure 27: lecture des résultats de zone d'inhibition.

3.9.3 Activité anti-inflammatoire :

Evaluation in vivo de l'activité anti-inflammatoire des extraits de spiruline chez les souris

L'effet anti-inflammatoire de l'extrait éthanolique et butanolique de spiruline a été évalué chez les souris en utilisant le modèle d'œdème de la patte induit par la carraghénine, selon une méthode inspirée de (Winter et al. 1962).

L'évaluation de l'activité anti-inflammatoire des extraits de spiruline L'effet anti-inflammatoire de l'extrait éthanolique et butanolique de spiruline a été évalué au sein du laboratoire d'animalerie du complexe d'antibiotique SAIDAL de Médéa (Algérie).

Cette activité a été menée chez des souris mâles d'environ 19 à 24 g, réparties en groupes expérimentaux. Deux types d'extraits ont été testés : un extrait éthanolique et un extrait butanolique, administrés par voie intrapéritonéale à un volume de 0,2ml. Le groupe témoin positif a reçu une injection de diclofénac, tandis que le groupe témoin négatif a été traité avec de l'éthanol dilué. 30minutes après l'administration des extraits, une inflammation aiguë a été induite par injection de 0,02 mL d'une solution de carraghénine (1 %) dans la patte postérieure gauche des souris. L'évolution de l'œdème a été suivie à l'aide d'un pied à coulisse, en mesurant l'épaisseur de la patte avant l'injection de carraghénine, puis après l'injection pendant 4 heures.

L'importance de l'œdème a été appréciée par la détermination de la moyenne d'augmentation du volume de la patte des souris suivant la formule (Sene et al., 2017) :

$$\text{Augmentation du volume} = \frac{V_t - V_0}{V_0}$$

V_t : Volume de la patte au temps t

V_0 : Volume initial de la patte.

L'activité anti-inflammatoire a été évaluée en calculant le pourcentage d'inhibition de l'œdème par comparaison aux groupes témoins.



Figure 28: mesure de l'œdème de patte avec un pied à coulisse.

Expression des résultats L'activité anti-inflammatoire In-vivo des extraits a été exprimée en pourcentage d'inhibition de l'œdème selon la formule suivante :

$$\text{Pourcentage d'inhibition} = \frac{(\text{Œdème témoin négatif}) - (\text{Œdème groupe traité})}{(\text{Œdème témoin négatif})} \times 100$$

3.10 Formulation du gel nettoyant

La formulation du gel comprend une phase aqueuse contenant une base gélifiante associée à des tensioactifs doux, sélectionnés pour leur bonne tolérance cutanée. À cette base ont été incorporés des extraits bioactifs, notamment un extrait de spiruline riche en composés antioxydants, ainsi qu'un extrait protéique aux propriétés hydratantes et revitalisantes.

Le conservateur Cosgard a été ajouté à la formulation afin d'assurer une bonne stabilité microbiologique du produit. L'ensemble a été homogénéisé jusqu'à obtention d'un gel stable. Le pH a été ajusté entre 5,5 et 6,5 afin de respecter l'équilibre physiologique cutané, puis la préparation a été mise dans des flacons stériles.

3.11 Test de tolérance cutané

Le principe

Ce test in vivo consiste à appliquer une substance unique sur la peau rasée et à la fois intacte d'un lapin, souvent à l'aide de doses de 0,5 mL ou 0,5 g couvrant une surface d'environ 6 cm². La substance est laissée en contact pendant au moins 4 heures, sous un pansement semi-occlusif. Après retrait, la peau est évaluée à plusieurs intervalles (30–60 minutes, 24 h, 48 h et 72 h) pour détecter des signes visibles d'érythème (rougeur) et d'œdème (gonflement) selon l'échelle de Draize (**Rooney et al. 2021**).

Mode opératoire

Ce test a été réalisé au sein du laboratoire d'animalerie du complexe d'antibiotique SAIDAL de Médéa (Algérie).

Selon les lignes directrices de (l'OCDE 404 2015), le test d'irritation cutanée est réalisé sur des lapins albinos adultes en bonne santé. Une petite zone de la peau du dos (environ 6 cm²) est rasée 24 heures avant l'application du produit. Une quantité précise de la substance à tester est appliquée directement sur la peau, puis recouverte d'une compresse fixée par un pansement

semi-occlusif. Dans un premier temps, le produit reste en contact pendant 1 heure. Si aucune réaction cutanée (érythème ou œdème) n'est observée, une nouvelle application est effectuée pour une durée de 2 heures supplémentaire. Si la peau reste toujours indemne, une troisième application est réalisée pour un temps total d'exposition de 4 heures. Après chaque application, la zone est doucement nettoyée. Les réactions cutanées sont ensuite observées et notées à différents intervalles : immédiatement, après 30min, 1 heure puis 24 h, 48 h et 72 h après le retrait du pansement. Ce protocole progressif permet d'évaluer le potentiel irritant de la substance tout en minimisant l'exposition inutile si une réaction est observée dès les premières étapes.

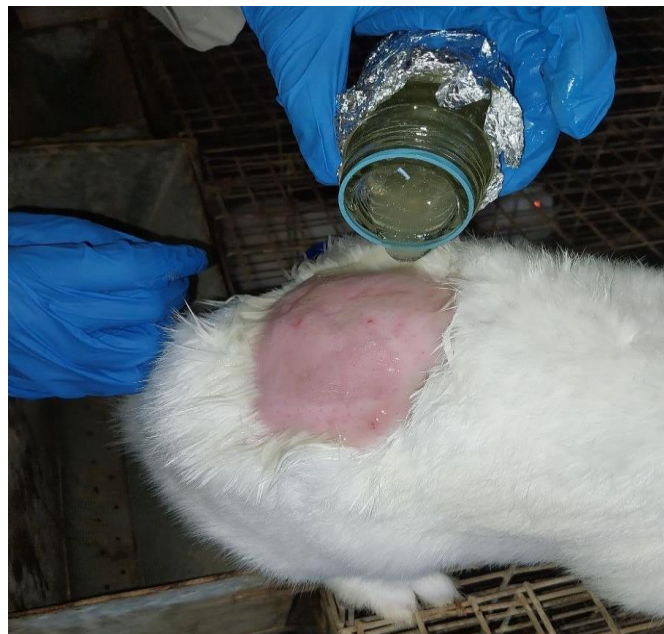


Figure 29: application du produit

3.12 Le Test microbiologique du produit final

L'objectif de ce test était d'évaluer la qualité microbiologique du gel nettoyant développé, afin de s'assurer qu'il respecte les critères de sécurité exigés pour un produit cosmétique destiné à un usage cutané.

Les analyses comprenaient à la fois des tests quantitatifs, visant à mesurer la charge en germes aérobies mésophiles, et des tests qualitatifs, destinés à vérifier l'absence de micro-organismes pathogènes spécifiques : *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* et *Candida albicans*.

Ces examens ont été réalisés en s'inspirant des normes suivantes du journal officiel de la république algérienne N°16 :

- **ISO 21149 / NA 8287** : recherche et dénombrement des germes aérobies mésophiles.
- **ISO 16212 / NA 8285** : recherche et dénombrement des levures et moisissures.
- **ISO 22717 / NA 8292** : recherche de *Pseudomonas aeruginosa*.
- **ISO 22718 / NA 8293** : recherche de *Staphylococcus aureus*.
- **ISO 21150** : recherche de *Escherichia coli*.
- **ISO 18416** : recherche de *Candida albicans*.

Les milieux de culture et le matériel utilisés ont été sélectionnés conformément à ces normes et adaptés aux caractéristiques du produit testée en s'inspirant du journal officiel N°16 **République Algérienne Démocratique et Populaire. (2020, 24 mars)**

Préparation des échantillons et des dilutions

Le gel nettoyant a été prélevé aseptiquement et mis en suspension dans de l'eau péptonée tamponnée stérile pour préparer une solution mère. Des dilutions décimales ont ensuite été réalisées jusqu'à une dilution de 10^{-5} dans un diluant stérile, en veillant à maintenir des conditions d'asepsie strictes afin d'éviter toute contamination.

Recherche de la flore totale aérobie mésophile

La recherche des germes aérobies mésophiles a été effectuée par ensemencement en masse. Un volume de 1 ml de la solution mère a été réparti au fond de boîtes de Pétri stériles, puis recouvert de 10 à 15 ml de gélose PCA fondue et refroidie. L'ensemencement a été réalisé en double pour chaque échantillon afin d'assurer la fiabilité des résultats.

Après solidification, les boîtes ont été incubées à $32,5 \pm 2,5$ °C pendant 24 à 48 heures. Les colonies développées dans la masse, de forme lenticulaire, ont été dénombrées et les résultats exprimés en fonction du facteur de dilution appliqué.

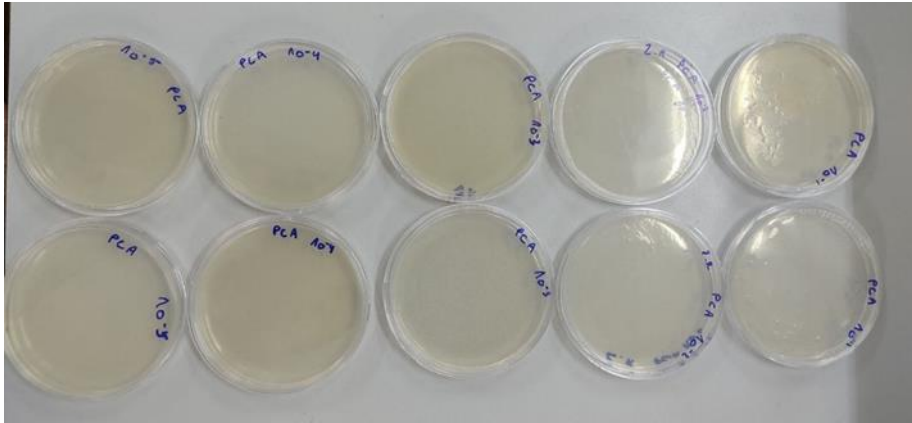


Figure 30: Recherche de la flore totale aérobie mésophile

Recherche de levures et moisissures

La recherche des levures et moisissures a été réalisée par ensemencement en surface. Un volume de 0,1 ml des dilutions appropriées a été réparti en surface sur des boîtes contenant un milieu SDCA (Sabouraud Dextrose Agar avec chloramphénicol), puis étalé à l'aide d'un râteau stérile. L'ensemencement a été réalisé en double pour chaque dilution.

Les boîtes ont été incubées à 22-25 °C pendant 3 à 5 jours.

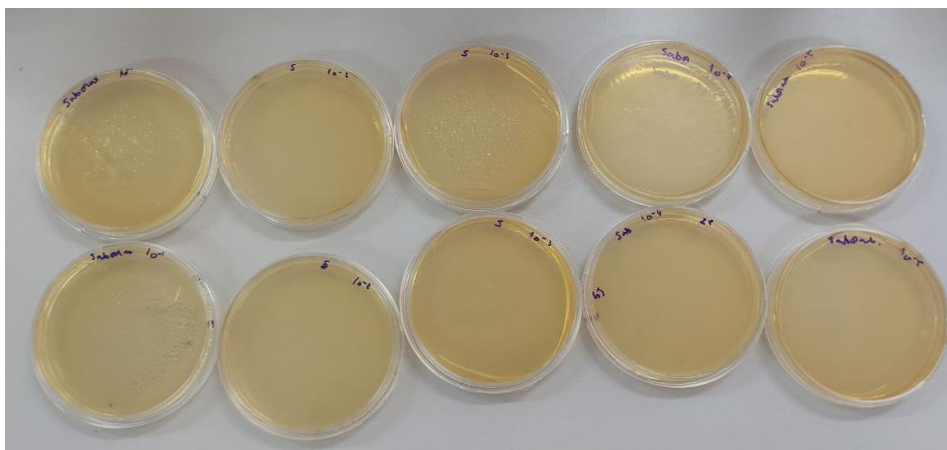


Figure 31: Recherche des levures et moisissures

Recherche des germes à risques sanitaire

La recherche des germes pathogènes (*Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* et *Candida albicans*) a été réalisée selon une méthode en deux étapes : une

phase d'enrichissement dans un bouillon non sélectif, suivie d'un isolement sur des milieux sélectifs adaptés.

Après enrichissement, les ensemencements ont été effectués en surface sur :

- **Gélose Chapman** pour *Staphylococcus aureus*
- **Gélose cétrimide** pour *Pseudomonas aeruginosa*
- **Gélose VRBL** pour *Escherichia coli*
- **Gélose Sabouraud avec chloramphénicol** pour *Candida albicans*

L'incubation s'est faite aux températures et durées recommandées pour chaque germe selon les normes en vigueur. La présence de colonies caractéristiques a été vérifiée après incubation.

Mise en évidence des protéines

Principe :

Le test de Biuret repose sur la formation d'un complexe coloré violet entre les ions cuivre (II) (Cu^{2+}) et les liaisons peptidiques (-CO-NH-) des protéines en milieu basique. En présence d'hydroxyde de sodium (NaOH), les ions Cu^{2+} interagissent avec au moins deux liaisons peptidiques contiguës, formant un complexe de coordination stable. Ce complexe donne une coloration violette caractéristique, proportionnelle à la concentration en protéines. Ce test permet ainsi de mettre en évidence la présence de protéines ou de peptides, mais il reste inefficace pour les acides aminés libres, qui ne possèdent pas de liaison peptidique. Ce principe a été décrit et validé dans plusieurs études biochimiques, notamment dans la revue de **Gornall et al. (1949)**, qui a optimisé l'utilisation du réactif de Biuret pour la quantification des protéines dans les échantillons biologiques

Au cours d'une de ces méthodes d'extraction, une quantité importante de matière riche en protéines a été obtenue. Dans l'objectif de valoriser cette fraction, nous avons d'abord vérifié la présence de protéines à l'aide du test de Biuret, un test colorimétrique spécifique basé sur la complexation des ions cuivre (Cu^{2+}) en milieu alcalin avec les liaisons peptidiques.

Chapitre 4 : Résultats et Discussions

4.1 Tests phyto-chimiques

Une analyse phytochimique a été réalisée sur les solutions des différents extraits (éthanolique, méthanolique et aqueux) afin de détecter la présence de cinq grandes familles de composés : polyphénols, tanins, coumarines, terpénoïdes et saponosides.

Les résultats de ce screening chimique préliminaire sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 8: Résultats des tests phytochimiques des extraits de spiruline

Extrait	Éthanolique	Méthanolique	Aqueuse
Les polyphénols	++	+++	+
Tanins	+++	++	+
Coumarines	–	–	+
Terpénoïdes	+++	+++	+
Saponosides	++	+	+++

+++ : Réaction très positive.

++ : Réaction moyennement positive.

+ : Réaction faiblement positive.

– : Réaction négative.

De façon générale, les familles chimiques détectées dans nos extraits confirment les observations rapportées par **Arun et al. (2012)**, **Ali et Doumandji (2017)** et **Dahikar (2018)**, bien que certaines différences apparaissent. Par exemple, alors que ces études rapportent l'absence de tanins dans leurs extraits, nous avons détecté leur présence dans tous nos extraits, particulièrement dans les extraits éthanoliques et méthanolique. Concernant les flavonoïdes, leur détection reste variable selon les auteurs et les solvants employés : absents dans certains extraits méthanoliques chez **Arun et al. (2012)**, présents dans les extraits acétoniques et méthanoliques chez **Ali et Doumandji (2017)**, et absents uniquement dans l'extrait méthanolique chez **Dahikar (2018)**. Dans notre étude, les tests qualitatifs pour les flavonoïdes sont peu concluants, possiblement en raison de l'interférence des pigments naturels de la spiruline, mais aussi du fait que nous ne disposons pas des moyens techniques suffisants pour réaliser le test de manière plus fiable. Ces divergences peuvent s'expliquer par les différences d'espèces, de solvants et de protocoles utilisés. Nos résultats s'alignent également avec des études spécifiques sur la spiruline, telles que celles de **d'Alouach-Boumediene (2021)** et **Kanoun (2020)**, qui soulignent l'importance du choix du solvant pour l'extraction optimale des composés phénoliques et saponosides.

4.2 Rendement d'extraction des composés phénoliques totaux

Dans notre étude, les rendements ont été calculés à partir de 10 g de spiruline sèche selon la formule :

$$\text{Rendement (\%)} = \frac{\text{Masse de l'extrait sec}}{10 \text{ g de spiruline}} \times 100$$

Pour les extraits concentrés au rotavapeur, la masse de l'extrait sec a été déterminée en mesurant la différence entre le poids du ballon contenant l'extrait sec après évaporation et celui du ballon vide avant l'extraction.

Tableau 9: Poids d'extrait sec et rendement correspondant des trois méthodes d'extraction des composés phénoliques

Solvant	Masse d'extrait sec (g)	Rendement (%)
Méthanol 70 %	3,6378	36,378
Eau chaude	2,3311	22,43
Éthanol 70 %	2,2434	23,31

Les résultats obtenus montrent que l'extraction par macération au méthanol 70 % a permis d'obtenir le rendement le plus élevé en extrait sec (36,38 %), suivi de l'eau chaude (23,31 %) et de l'éthanol 70 % (22,43 %). Ces observations sont conformes à plusieurs études antérieures qui indiquent que les solvants mixtes alcool-eau, en particulier le méthanol aqueux, favorisent une extraction plus efficace des composés solubles dans la matrice végétale (**Bouchelaghem et al., 2020 ; étude sur *Caesalpinia benthamiana***)

Par ailleurs, le rendement relativement élevé obtenu avec l'eau chaude suggère que la température joue un rôle important dans l'amélioration de la solubilité et de la diffusion des composés, compensant ainsi l'absence d'alcool dans le solvant, comme cela a été observé dans d'autres travaux sur l'extraction de plantes médicinales (**Zhang et al., 2018**).

4.3 Dosage des polyphénols totaux

4.3.1 Droite d'étalonnage de l'acide gallique

Courbe d'étalonnage pour le dosage de polyphénols totaux (PPT) Cette courbe est établie en utilisant l'acide gallique comme référence. La courbe d'étalonnage est établie avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,9946$ (**Figure 32**)

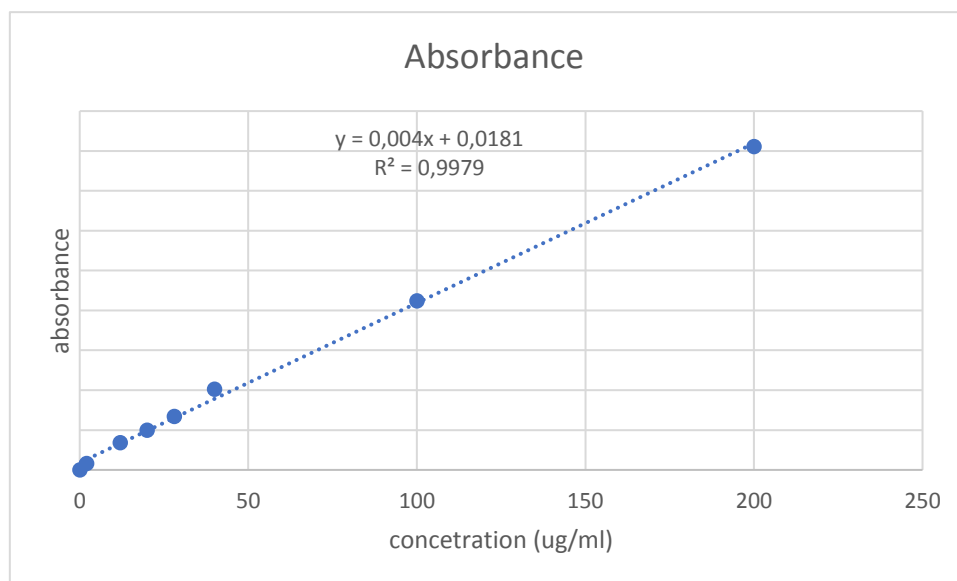


Figure 33: courbe d'étalonnage d'acide gallique

4.3.2 Evaluation de la teneur en polyphénols totaux

Les quantités des phénols totaux dans les extraits bruts ont été rapportées en milligramme d'équivalents de l'acide gallique par 10 grammes de matière sèche (mg EAG/g MS). Les résultats sont indiqués dans le tableau 10

Tableau 10: Teneur en polyphénols totaux des extraits de spiruline exprimée en mg EAG/g de matière sèche

Extrait	Polyphénols totaux (mg EAG/g MS)
Éthanolique	0,602
Méthanolique	0,492
Aqueux	0,110

*Mg EAG/g MS : milligramme d'équivalents de l'acide gallique par gramme de matière sèche.

Le dosage des polyphénols totaux par la méthode de Folin-Ciocalteu révèle que l'extrait éthanolique présente la teneur la plus élevée en polyphénols (0,602 mg EAG/g MS), suivi de l'extrait méthanolique (0,492 mg EAG/g MS) et enfin de l'extrait aqueux (0,110 mg EAG/g MS).

Cette hiérarchie indique que l'éthanol 70 % est plus efficace pour extraire les composés phénoliques de la spiruline que le méthanol 70 % et l'eau chaude. Ce résultat peut s'expliquer par la polarité modérée

de l'éthanol qui favorise la solubilité des polyphénols, notamment des flavonoïdes et tanins, qui sont souvent mieux extraits dans des solvants alcooliques à concentration intermédiaire (70 %) (Bouchelaghem et al., 2020)

La littérature indique que le méthanol est généralement plus efficace que d'autres solvants pour l'extraction des polyphénols totaux de *Spirulina platensis*. Par exemple, Alouach-Boumediene (2021) a rapporté des teneurs significativement plus élevées dans les extraits méthanoliques comparés aux extraits aqueux. Cependant, dans nos travaux, l'éthanol 70 % a montré une meilleure efficacité (0,602 mg EAG/g MS contre 0,492 mg EAG/g MS pour le méthanol), probablement en raison de sa polarité optimale pour l'extraction sélective sous nos conditions expérimentales. Ces variations soulignent l'influence des paramètres d'extraction (solvant, méthode, matrice). Des techniques avancées (extraction supercritique, ultrasons) pourraient améliorer les rendements indépendamment du solvant.

De plus, il convient de souligner que les teneurs en composés phénoliques, et en particulier les polyphénols, varient considérablement d'une espèce à une autre, mais aussi au sein d'une même espèce. Ces variations sont influencées par plusieurs facteurs extrinsèques tels que la température et le climat, et intrinsèques tels que les facteurs génétiques comme la variété et l'origine des espèces, les facteurs physiologiques incluant le degré de maturation et les parties utilisées, ainsi que la durée et les conditions de stockage (Maisuthisakul et al., 2007 ; Ksouri et al., 2009). Ces éléments peuvent expliquer les différences observées entre les études et soulignent l'importance d'adapter les protocoles d'extraction aux spécificités de la biomasse étudiée.

4.4 Extraction des flavonoïdes

L'extraction séquentielle des flavonoïdes et composés phénoliques à partir des extraits aqueux de spiruline a permis d'obtenir plusieurs fractions, chacune correspondant à un solvant de polarité croissante. Voici la présentation synthétique des rendements obtenus pour chaque phase.

L'extraction liquide-liquide successive a été réalisée sur les extraits aqueux (eau chaude), méthanolique et éthanolique de spiruline, en utilisant trois solvants organiques de polarité croissante : éther diéthylique, acétate d'éthyle et n-butanol. Les rendements obtenus, exprimés en grammes d'extrait sec, sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 11: Rendements des extraits secs obtenus par phase d'extraction liquide-liquide

Solvant d'extraction	Éther diéthylique (g)	Acétate d'éthyle (g)	n-Butanol (g)
Eau chaude	1,83	1,43	6,47

Éthanol	0,47	0,33	0,50
Méthanol	2,10	2,93	2,00

Conformément aux principes de l'extraction liquide-liquide, chaque solvant organique utilisé cible des classes spécifiques de composés selon leur polarité :

- **Phase éther de pétrole** : Cette étape préliminaire a permis d'éliminer les composés non phénoliques (cires, lipides, pigments chlorophylliens) par affinité apolaire, clarifiant ainsi la solution pour les extractions ultérieures.
- **Phase éther diéthylique** : Comme décrit dans la littérature, cette phase extrait sélectivement les aglycones, notamment les flavonoïdes simples et les acides phénoliques, avec des rendements qui peuvent varier selon la matrice étudiée.
- **Phase acétate d'éthyle** : Solvant de polarité intermédiaire, il cible principalement les monoglycosides et partiellement les diglycosides.
- **Phase n-butanol** : Utilisé pour son affinité avec les composés polaires, il extrait les diglycosides résiduels et les triglycosides.

Le rendement de chaque phase est obtenu à partir de 50 ml de chaque phase aqueuse.

Les résultats présentés correspondent aux quantités brutes extraites à chaque étape, sans distinction ni quantification précise des composés phénoliques ou flavonoïdes présents. Il est important de souligner que ces valeurs ne permettent pas d'affirmer la richesse relative en flavonoïdes ou autres composés spécifiques dans chaque fraction.

Les extraits obtenus feront l'objet d'analyses complémentaires, notamment par chromatographie sur couche mince (CCM) et autres tests, afin de caractériser qualitativement et quantitativement les composés présents dans chaque phase

4.5 Criblage chromatographique des composés phénoliques et flavonoïdes

Les extraits obtenus par les différentes méthodes d'extraction ont été analysés par chromatographie sur couche mince (CCM) afin d'évaluer qualitativement leur composition en composés phénoliques et flavonoïdes. Le tableau suivant présente les valeurs de R_f, les couleurs des spots révélés, ainsi que leur présence ou absence selon les phases d'extraction et les méthodes utilisées. Ces données serviront de base pour une identification préliminaire des composés, en comparaison avec la littérature.

Tableau 12 : Résultats de la chromatographie sur couche mince (CCM) des extraits de spiruline selon trois méthodes d'extraction

Phase d'extraction	Spot	Hydro-éthanolique			Eau chaude	Hydro-méthanolique	Identification probable
		Rf	Couleur	Détection			
Phase aqueuse hydroalcoolique	1	0,67	Rose	✓	Nt	Nt	Quercétine/Kaempférol
	2	0,80	Vert	✓	X	X	C-phycocyanine
	3	0,89	Vert	✓	X	X	Chlorophylle a
	4	0,94	Jaune	✓	X	X	Lutéine/Zéaxanthine
Éther diéthylique	1	0,59	Vert	✓	X	X	Phéophytine
	2	0,67	Jaune	✓	X	X	Kaempférol
Acétate d'éthyle	X	X	X	X	X	X	-
n-butanol	1	0,92	Vert	✓	X	X	Glycoside de phéophorbide
	2	0,96	Rose	✓	X	X	Glycoside de quercétine

- ✓ = Spot observé
- Nt = non testé
- X = Spot non observé

(*) Identification basée sur la littérature, à confirmer par CCM avec standards ou HPLC.

Après analyse par chromatographie sur couche mince (CCM), il apparaît que seuls les extraits obtenus par la méthode d'extraction hydro-éthanolique présentent des spots révélés sur les plaques, tandis qu'aucun spot n'a été détecté dans les extraits issus des méthodes à l'eau chaude et hydro-méthanolique. Plus précisément, dans l'extrait hydro-éthanolique, des spots sont observés dans la phase aqueuse hydroalcoolique (Rf = 0,80 et 0,89, couleur verte), dans la phase éther diéthylique (Rf = 0,67, couleur jaune), et dans la phase n-butanol (Rf = 0,92, vert et Rf = 0,96, rose).

En se référant à la littérature utilisant des systèmes solvants et des révélateurs similaires (Markham, 1982 ; Harborne, 1998 ; Boulekbache-Makhlouf et al., 2013), les spots verts à Rf élevés (0,80–0,92)

pourraient correspondre à des pigments chlorophylliens ou à des flavonoïdes glycosylés, tandis que le spot jaune à $R_f = 0,67$ est typique de certains flavonols comme la quercétine ou le kaempférol. Le spot rose à $R_f = 0,96$ pourrait indiquer la présence d'un glycoside de flavonoïde.

L'absence totale de spots dans les extraits issus des macérations à l'eau chaude et à l'hydro-méthanol suggère soit une faible concentration en composés extraits et détectables par CCM dans ces conditions, soit une extraction moins efficace des composés phénoliques et flavonoïdiques par ces deux méthodes.

4.6 Évaluation des activités biologiques des polyphénols de la spiruline

4.6.1 Activité antioxydante

Le test DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle) est une méthode spectrophotométrique simple, rapide et largement utilisée pour évaluer la capacité antioxydante d'un extrait. Ce test repose sur la réduction d'un radical stable, le DPPH, qui présente une couleur violet foncé caractéristique. En présence d'un antioxydant capable de donner un électron ou un atome d'hydrogène, le radical DPPH est réduit, ce qui entraîne une décoloration progressive du mélange. Cette diminution d'absorbance, mesurée à 517 nm, est proportionnelle à la capacité antioxydante de l'échantillon testé (**Brand-Williams, Cuvelier, & Berset, 1995**).

En raison de la quantité limitée de réactif DPPH disponible, il a été nécessaire de sélectionner un seul extrait pour l'évaluation de l'activité antioxydante.

L'extrait n-butanol, obtenu à partir de l'échantillon hydro-éthanolique, a été retenu pour cette analyse car il a présenté le plus grand nombre de spots lors du test de chromatographie sur couche mince (CCM). De plus, cet extrait s'est révélé être le plus riche en flavonoïdes, des composés largement reconnus pour leur fort pouvoir antioxydant

Les résultats de l'activité antioxydante de l'extrait n-butanol ont été exprimés en pourcentage d'inhibition du radical DPPH à différentes concentrations. Ces valeurs ont été comparées à celles obtenues avec l'acide ascorbique, utilisé comme référence standard.

Tableau 13: Pourcentage d'inhibition du radical DPPH par l'extrait n-butanol et l'acide ascorbique à différentes concentrations

Concentration (mg/ml)	% Inhibition Extrait n-Butanol	% Inhibition Acide Ascorbique
62,5	37,3	91,01
125	47,3	92,1
500	61	93,68
1000	63,1	96,84

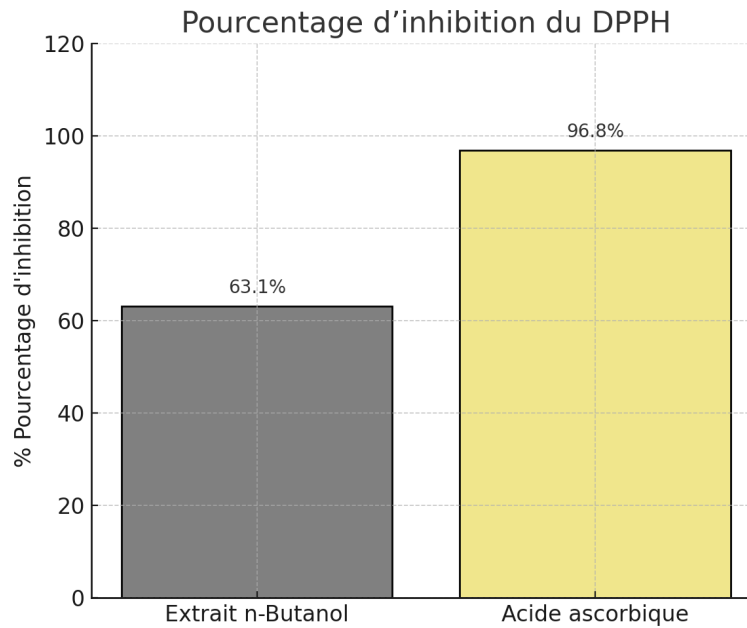


Figure 34: Histogramme représentant le pourcentage d'inhibition du radical DPPH par l'extrait n-butanol et l'acide ascorbique à différentes concentrations.

La figure 36 montre que plus la concentration de l'extrait n-butanol augmente, plus le pourcentage d'inhibition du radical DPPH s'élève, atteignant un maximum de 63,1 % à la concentration de 1 mg/mL. À l'inverse, l'acide ascorbique présente une activité antioxydante très élevée, avec un plateau d'inhibition supérieur à 90 % dès la plus faible concentration testée.

L'IC50, qui correspond à la concentration nécessaire pour inhiber 50 % du radical DPPH, constitue un indicateur clé de la puissance antioxydante d'un extrait : plus l'IC50 est faible, plus l'activité antioxydante est élevée. Dans cette étude, l'IC50 de l'extrait n-butanol a été déterminée à 0,398 mg/mL, indiquant une activité antioxydante modérée. Pour l'acide ascorbique, l'IC50 n'a pas pu être calculée dans la plage testée, car son activité dépasse 90 % dès 0,0625 mg/mL.

Ces résultats sont cohérents avec la littérature, qui montre que les extraits végétaux riches en flavonoïdes et en polyphénols présentent généralement une activité antioxydante modérée à élevée, bien qu'inférieure à celle des antioxydants purs comme l'acide ascorbique. La capacité antioxydante observée pour l'extrait au n-butanol pourrait ainsi être attribuée à sa richesse en composés phénoliques, identifiés lors de l'analyse phytochimique.

En conclusion, l'extrait n-butanol du gel nettoyant présente un potentiel antioxydant intéressant, susceptible de contribuer à la protection de la peau contre le stress oxydatif, bien que son efficacité reste inférieure à celle de l'acide ascorbique utilisé comme référence.

4.6.2 Évaluation de l'activité anti-inflammatoire

Inhibition de l'œdème induit par la carraghénine

L'activité anti-inflammatoire des extraits éthanolique et butanolique de spiruline a été évaluée en mesurant l'œdème induit par la carraghénine chez des souris réparties en plusieurs groupes expérimentaux : un groupe témoin négatif (recevant uniquement la carraghénine), un groupe traité par l'extrait éthanolique, un groupe traité par l'extrait butanolique, et un groupe témoin positif recevant un anti-inflammatoire de référence (diclofénac).

L'injection de 0,02 mL de carraghénine à 1 % dans la patte postérieure gauche des souris a induit une inflammation caractérisée par un gonflement progressif mesuré à l'aide d'un pied à coulisse. L'œdème était visible dès la première heure (environ 2,3 mm) et a atteint un maximum au bout de 3 à 4 heures, avec un gonflement moyen d'environ 3,5 mm (Figure 38).

Le traitement préventif par le diclofénac (témoin positif) a entraîné une réduction marquée du volume de l'œdème, avec un effet significatif dès la première heure et un pourcentage d'inhibition maximal avoisinant les 65 à 70 % au bout de 4 heures (Figure 39). Ces résultats confirment l'efficacité du diclofénac comme molécule de référence et valident la fiabilité du protocole expérimental.

Les extraits de spiruline ont également exercé une activité anti-inflammatoire. L'extrait butanolique a montré une inhibition modérée mais constante de l'œdème, avec un effet apparent dès la première heure et une inhibition atteignant environ 50 % à la 4^e heure. L'extrait éthanolique a aussi réduit l'œdème, avec une inhibition légèrement inférieure (environ 47 % à la 4^e heure).

Les courbes obtenues confirment ces observations (Figure 37) : les volumes d'œdème des groupes traités sont systématiquement inférieurs à ceux du témoin négatif, avec une tendance décroissante au fil du temps, traduisant l'action anti-inflammatoire des extraits. L'extrait butanolique semble légèrement plus performant que l'éthanolique, bien que la différence reste modérée.

Ces résultats suggèrent que les extraits de spiruline possèdent des composés bioactifs capables de moduler la réponse inflammatoire. Plusieurs études ont rapporté que la spiruline exerce une activité anti-inflammatoire notable dans des modèles expérimentaux similaires, notamment par l'action de la phycocyanine et d'autres antioxydants naturels (Remirez et al., 2002 ; Riss et al., 2007). Le léger avantage observé avec l'extrait butanolique pourrait être dû à une concentration plus élevée en composés hydrophiles actifs.

Il serait intéressant de compléter cette étude par une analyse quantitative des polyphénols, flavonoïdes et pigments dans les extraits utilisés afin de mieux caractériser les fractions responsables de l'effet observé.

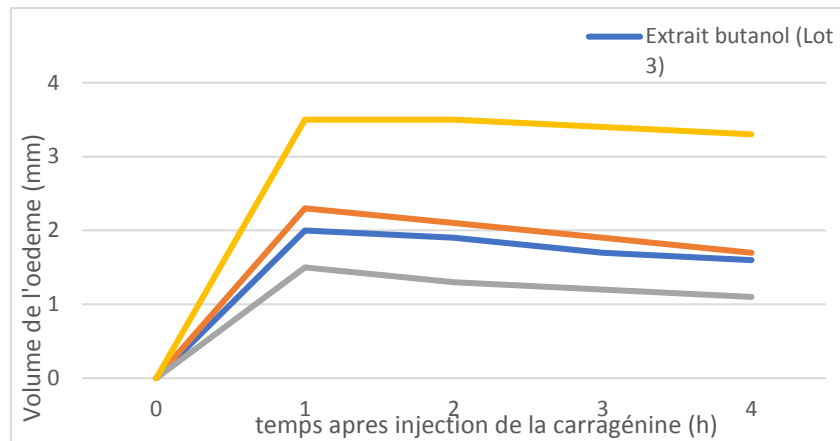


Figure 35: Variation du volume d'œdème (mm) au cours du temps après injection de carraghénine

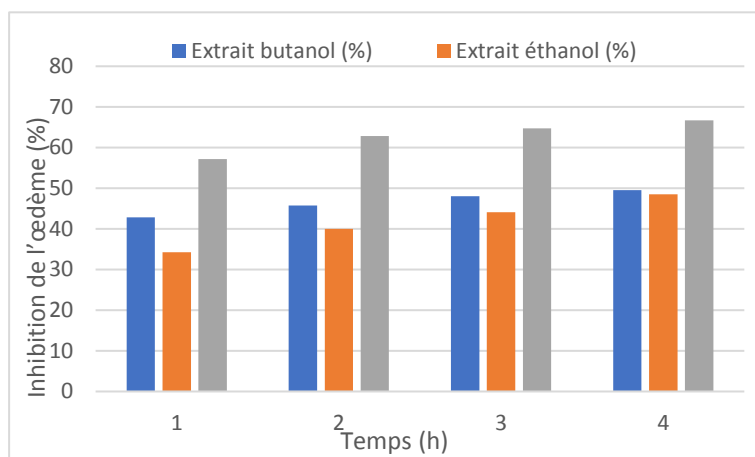


Figure 36: Pourcentage d'inhibition de l'œdème induit par la carraghénine chez la souris.

4.6.3 Evaluation d'activité antibactérienne et antifongique

L'activité antibactérienne des extraits éthanolique et butanolique a été évaluée à l'aide de la méthode de diffusion sur disque. L'effet inhibiteur se traduit par l'apparition d'une zone d'inhibition autour du disque de papier imprégné d'extrait, indiquant une entrave à la croissance des micro-organismes testés.

Parallèlement, un antibiogramme a été réalisé en exposant les différentes souches à des antibiotiques de référence, afin de comparer l'efficacité relative de ces derniers avec celle de nos extraits. Nous avons ainsi évalué l'activité de l'amoxicilline, de la tétracycline et de la gentamicine sur trois souches bactériennes, ainsi que celle de la nystatine sur deux souches fongiques. Les résultats sont présentés dans les figures ci-dessous.

Tableau 14: Résultats de l'évaluation de l'activité antimicrobienne des extraits de spiruline (éthanolique et butanolique) par la méthode de diffusion sur disque.

Les souches testées	L'extrait éthanolique	L'extrait butanolique
E. coli	-	+
S. aureus	-	+
P. aeruginosa	+	+
C. albicans	-	+
A. brasiliensis	-	+

(-) : Absence de zone d'inhibition. (+) : Présence de zone d'inhibition

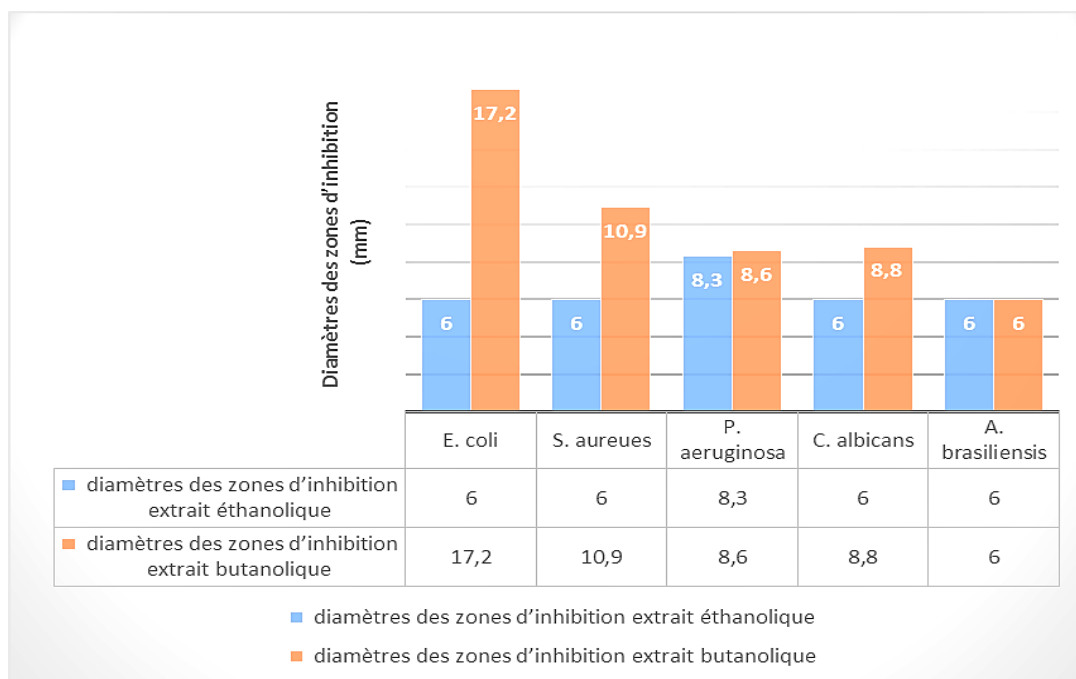
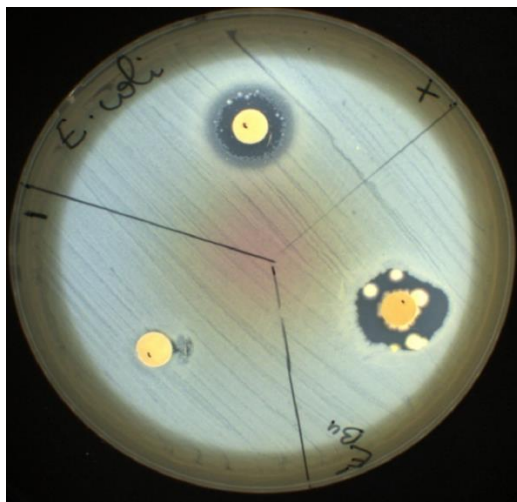


Figure 37: les résultats des diamètres des zones d'inhibition (mm) de la croissance des souches vis-à-vis des deux extraits

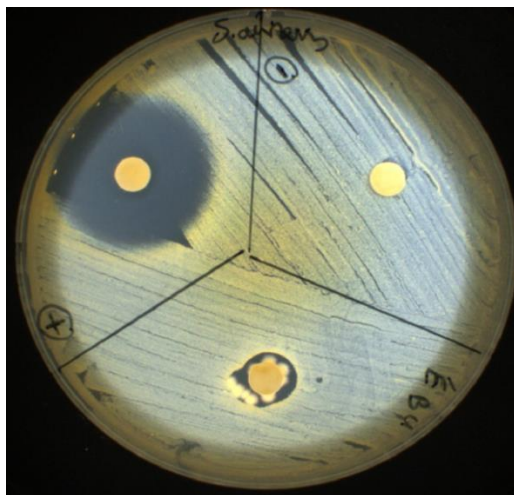
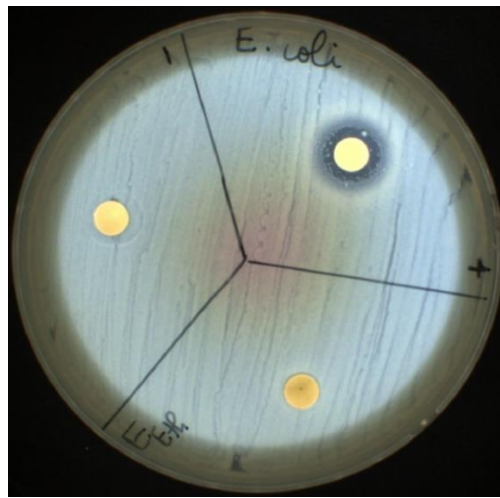
Les figures ci-dessous, montrant les zones d'inhibition résultant de la réaction des extraits avec les souches testées de l'activité antibactérienne sachant que (+) : Témoin positif d'antibiotique et (-) : le témoin négatif celui de l'éthanol.

L'extrait butanolique

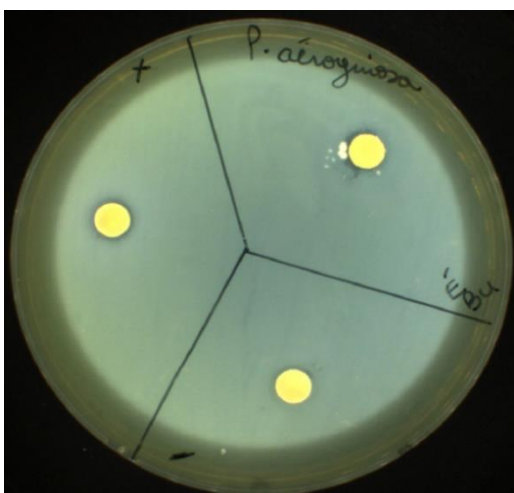
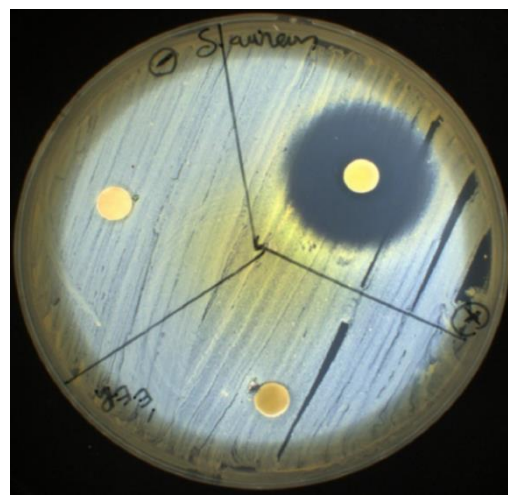
L'extrait éthanolique



(a)



(b)



(c)

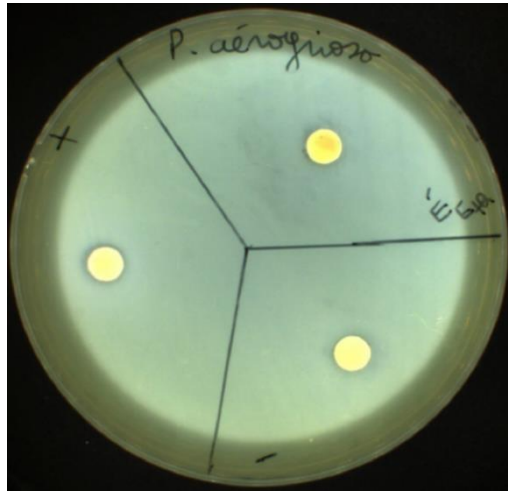


Figure 38: Pouvoir antibactérien des extraits (butanolique et éthanolique) antibactérien de l'extrait éthanolique sur : (a) : Escherichia coli ; (b) : Staphylococcus aureus; c : Pseudomonas aeruginosa.

Les figures ci-dessous, montrant les zones d'inhibition résultant de la réaction des extraits avec les souches testées de l'activité antifongique sachent que (+) : Témoin positif d'antibiotique et (-) : le témoin négatif celui de l'éthanol.

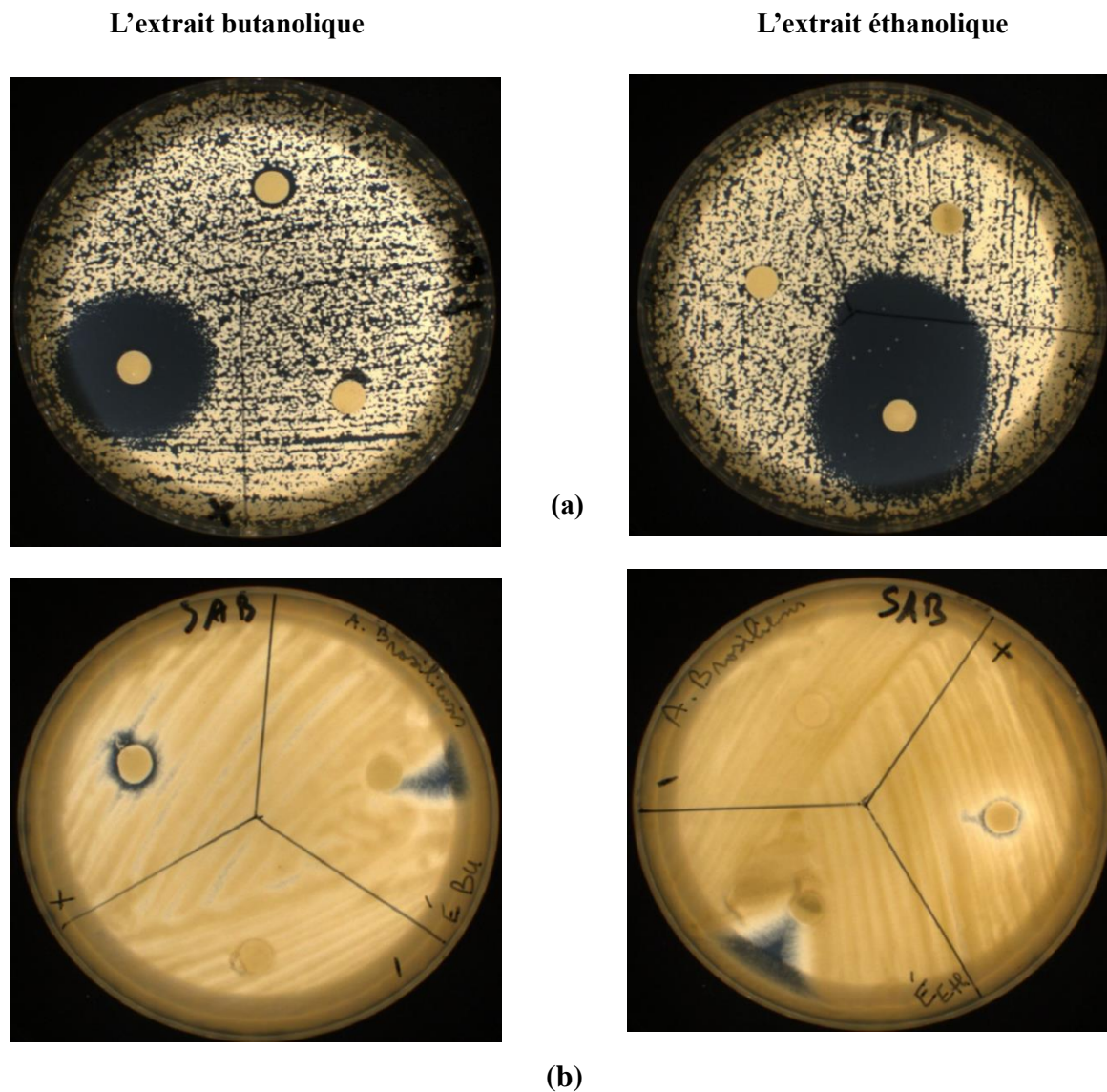


Figure 39: Pouvoir antifongique de l'extrait éthanologique et butanolique sur : (a) candida albicans ; (b) : Aspergillus brasiliensis

La **tétracycline** a présenté une forte activité antibactérienne, *Escherichia coli* étant la souche la plus sensible, avec une zone d'inhibition de 28,3 mm.

Concernant les champignons, la **Nystatine**, utilisée comme antifongique de référence, a montré une efficacité marquée contre *Candida albicans* (zone d'inhibition de 30,9 mm), tandis que *Aspergillus brasiliensis* s'est révélé moins sensible à la Nystatine.

Les résultats représentés dans la figure montrent que l'extrait butanolique de spiruline, issu de l'extraction liquide-liquide, a exercé une activité antibactérienne notable, avec des zones d'inhibition clairement visibles sur les différentes souches bactériennes testées.

En revanche, l'extrait éthanolique de spiruline, obtenu par macération solide-liquide, a montré une activité plus limitée, n'inhibant que la croissance de *P. aeruginosa*, avec une zone d'inhibition de 8,6 mm, et aucune activité détectée sur les autres souches.

4.7 Mise en évidence qualitative des protéines

Afin de vérifier la présence de protéines dans l'extrait de spiruline, un test qualitatif de Biuret a été réalisé sur la fraction concernée.

Le test de Biuret est une méthode colorimétrique simple permettant de détecter la présence de protéines en révélant la présence des liaisons peptidiques caractéristiques. En milieu alcalin, les ions cuivre (Cu^{2+}) réagissent avec ces liaisons pour former un complexe bleu-violet ou rose, dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en protéines. Une coloration violette ou rose indique un résultat positif, confirmant la présence de protéines ou de peptides contenant au moins trois liaisons peptidiques (ENSFEA, 2016).

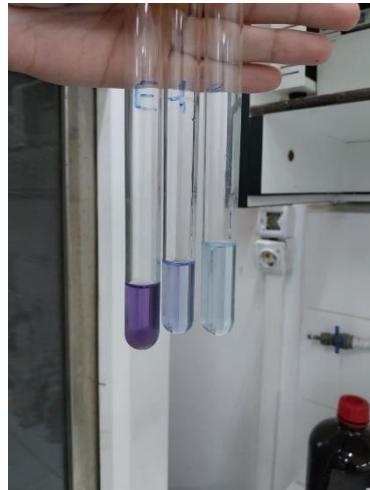


Figure 40: résultat de test de biuret

Comme la figure montre, la présence de protéines est confirmée, ce qui est cohérent avec la composition connue de la spiruline.

Cette observation constitue une indication supplémentaire de la richesse de l'extrait, même si l'analyse

principale porte sur les polyphénols.

La fraction protéique pourrait être valorisée dans la formulation de notre gel nettoyant.

La fraction protéique pourrait être valorisée dans la formulation de notre gel nettoyant, en raison des nombreux bienfaits reconnus des protéines et peptides pour la peau. En effet, les peptides agissent comme des messagers biologiques qui stimulent la production de collagène et d'élastine, deux protéines essentielles au maintien de la fermeté, de l'élasticité et de la régénération cutanée. Ils contribuent également à améliorer la barrière cutanée, à réduire les rides et à favoriser la réparation des tissus, ce qui en fait des ingrédients précieux dans les soins cosmétiques (IOMA Paris, 2024).

4.8 Formulation du gel nettoyant valorisant les polyphénols de spiruline

Dans cette étude, les polyphénols extraits de la spiruline ont été incorporés dans une formulation de gel nettoyant afin de valoriser leurs propriétés biologiques, notamment antioxydantes et anti-inflammatoires, antibactérienne dans un produit cosmétique.

Le gel formulé a été évalué pour ses caractéristiques physico-chimiques (pH, stabilité). Les résultats montrent que l'incorporation des polyphénols n'a pas altéré la stabilité ni l'aspect organoleptique du gel, ce qui est essentiel pour une bonne acceptabilité cosmétique.

Tableau 15: Synthèse des propriétés et tests de qualité du gel nettoyant enrichi en polyphénols de spiruline

Propriété	Résultat obtenu	Commentaire / Norme ou Référence
Couleur	Bleu clair	Conforme à l'extrait de spiruline
Odeur	Légère odeur herbacée	Acceptable pour un produit cosmétique
Ph	5	Compatible avec le pH cutané (4,5–7)
Stabilité	Pas de séparation ni décoloration	Conforme aux exigences cosmétiques
Efficacité	Propriétés nettoyantes, hydratantes, éclaircissantes	Propriétés actives attestées
Tolérance cutanée	Aucune irritation observée	Test réalisé selon protocole détaillé
Tests microbiologiques	Conforme	Test réalisé selon protocole détaillé

4.9 Résultats du contrôle microbiologique

Afin de déterminer la charge microbienne totale présente dans l'échantillon de notre gel nettoyant, un test microbiologique a été réalisé. Ce test a permis d'évaluer la population de micro-organismes viables, notamment les bactéries aérobies mésophiles, les levures et les moisissures, ainsi que la présence

spécifique de germes pathogènes ou indicateurs tels que *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* et la levure *Candida albicans*.

Résultats de la recherche de la flore totale aérobie mésophile

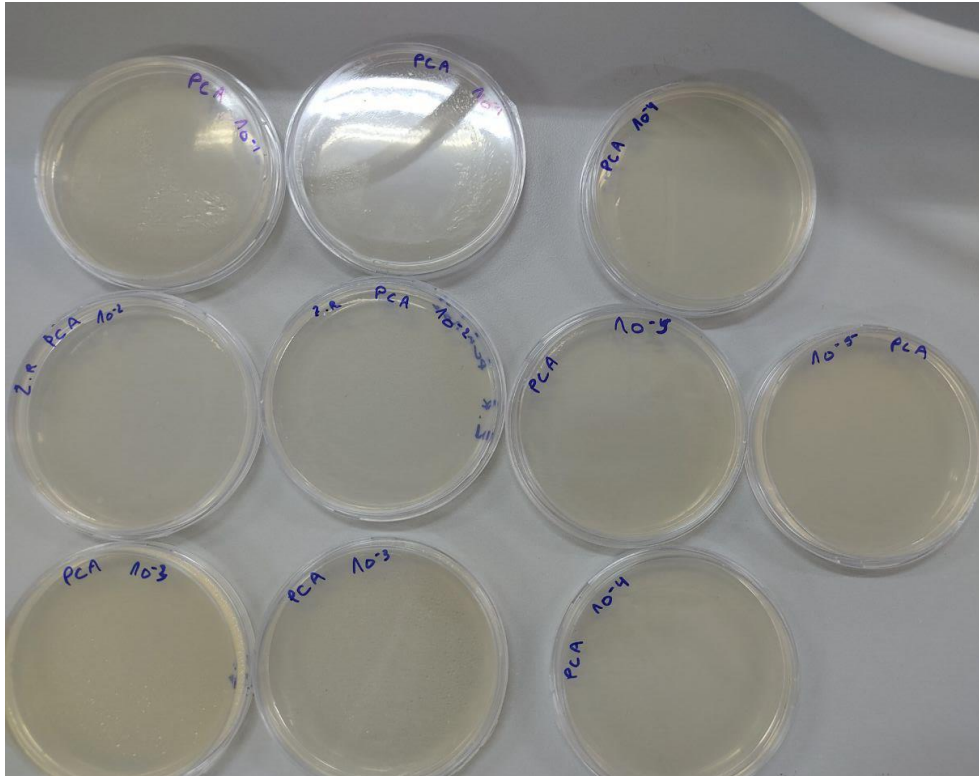


Figure 41: résultat de la flore totale aérobie mésophile sur milieux PCA

Résultats de la recherche des levures et moisissures

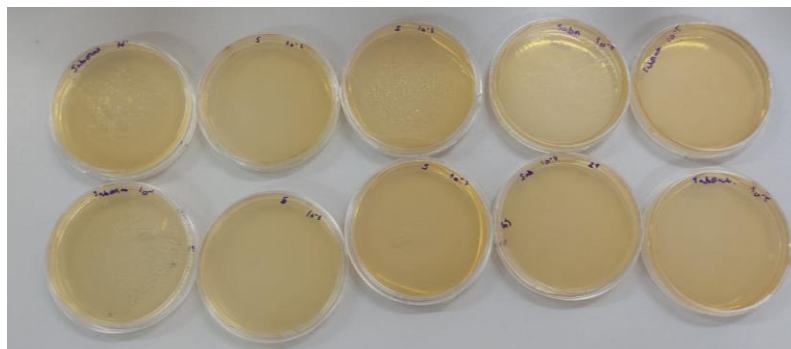


Figure 42: résultat de la flore fongique isolée sur milieux SDCA

Résultats des isollements des germes pathogènes

Les analyses microbiologiques réalisées sur l'échantillon de gel nettoyant n'ont révélé aucune croissance de germes pathogènes ciblés, notamment *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* et *Candida albicans*. Cette absence de colonies visibles témoigne de l'efficacité des procédés de fabrication et du respect des bonnes pratiques d'hygiène. Afin d'éviter une surcharge visuelle, les

résultats sont présentés dans le tableau récapitulatif ci-dessous, qui synthétise l'ensemble des données microbiologiques et leur conformité aux normes internationales.

Tableau 16 : Tableau récapitulatif des résultats microbiologiques

Micro-organismes	Résultats (CFU/mL)	Limites réglementaires (Norme)	Interprétation
Bactéries aérobies mésophiles	10 ¹	≤ 10 ² CFU/ml (ISO 17516 :2014)	Conforme
Levures et moisissures	Absence	≤ 10 ² CFU/ml (ISO 16212 :2017)	Conforme
<i>Staphylococcus aureus</i>	Absence	Absence (ISO 22717 :2015)	Conforme
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Absence	Absence (ISO 22717 :2015)	Conforme
<i>Escherichia coli</i>	Absence	Absence (ISO 22717 :2015)	Conforme
<i>Candida albicans</i>	Absence	Absence (ISO 22717 :2015)	Conforme

Les résultats montrent que le gel nettoyant respecte pleinement les exigences microbiologiques définies par les normes internationales applicables aux produits cosmétiques. La charge microbienne totale est très faible, et l'absence de germes pathogènes majeurs garantit la sécurité du produit pour l'utilisateur. Par ailleurs, l'absence de levures et de moisissures confirme la stabilité microbiologique du produit. Ces données attestent de l'efficacité des bonnes pratiques de fabrication et des mesures d'hygiène mises en œuvre







4.10 Résultats de la tolérance cutanée

L'objectif de ce test était d'évaluer la tolérance cutanée primaire du gel nettoyant formulé, suite à une application unique sur la peau de lapins.

Ce test visait à vérifier l'absence de signes d'irritation cutanée tels que l'érythème (rougeur) ou l'œdème (gonflement), afin d'estimer la compatibilité du produit avec la peau et sa sécurité d'utilisation.

Les observations ont été effectuées aux temps suivants : 1 h, 2 h, 4 h, 24 h, 48 h et 72 h, après des applications successives du produit, afin de détecter d'éventuelles réactions locales.

Tableau 17: Résultats des observations de la tolérance cutanée

Temps d'observation	Érythème	Œdème	Illustration
1 h	Absent	Absent	
2 h	Absent	Absent	
4 h	Absent	Absent	
24 h	Absent	Absent	
48 h	Absent	Absent	
72 h	Absent	Absent	

Les observations effectuées à différents moments après l'application du gel nettoyant sur la peau des lapins n'ont montré aucun signe d'irritation, que ce soit des rougeurs, des gonflements, des desquamations ou d'autres manifestations inflammatoires. L'absence totale de réactions, aussi bien immédiates que retardées, témoigne de la très bonne tolérance cutanée de ce produit.

Ces résultats confirment que le gel nettoyant est non irritant et ne provoque pas de sensibilisation dans les conditions de ce test. Cette tolérance est un gage de sécurité et constitue un atout important pour son utilisation future par les consommateurs.

Conclusion

Ce travail avait pour objectif de valoriser la spiruline à travers l'extraction et l'exploitation de ses polyphénols dans une application cosmétique innovante : un gel nettoyant naturel pour le visage.

Nous avons mis en œuvre différentes méthodes d'extraction solide-liquide (eau chaude, éthanol, méthanol) et procédé au dosage des polyphénols totaux. Les résultats ont montré que l'extrait éthanolique présentait la teneur la plus élevée (0,602 mg EAG/g MS), suivi de l'extrait méthanolique (0,492 mg EAG/g MS) et de l'extrait aqueux (0,110 mg EAG/g MS).

Des extractions liquide-liquide successives et des analyses phytochimiques (CCM) ont permis d'identifier la présence de composés phénoliques, bien que des investigations complémentaires soient nécessaires pour caractériser précisément ces extraits. Une fraction protéique a également été détectée qualitativement, ouvrant des perspectives pour une valorisation supplémentaire.

L'évaluation des activités biologiques (antioxydante, antibactérienne, anti-inflammatoire) a confirmé le potentiel bioactif des extraits, notamment ceux issus de l'extraction éthanolique. Enfin, ces extraits ont été intégrés dans une formulation cosmétique sous forme de gel nettoyant, dont les premiers tests microbiologiques ont validé la sécurité d'utilisation.

Certaines contraintes ont limité l'étude, notamment le faible nombre de répétitions expérimentales qui a restreint la comparaison complète des méthodes d'extraction et des fractions. L'identification des composés phénoliques reste partielle, et la purification des protéines n'a pas été réalisée. De plus, les tests biologiques ont été concentrés sur une seule fraction, ce qui limite la portée des conclusions

Pour approfondir cette étude, il est recommandé :

- D'identifier précisément les composés phénoliques et flavonoïdes par des techniques avancées (HPLC, spectrométrie de masse, RMN).
- De purifier et caractériser la fraction protéique pour mieux comprendre ses propriétés.
- De multiplier les répétitions et comparer rigoureusement les différentes méthodes d'extraction.
- D'élargir les tests biologiques à d'autres modèles et souches bactériennes.

- D'optimiser la formulation cosmétique en évaluant la stabilité, la synergie des extraits, et l'efficacité via des tests cliniques.
- De réaliser des études toxicologiques et cliniques pour garantir la sécurité et l'efficacité des produits développés.

Les pistes futures incluent

- ✓ la purification et la caractérisation des fractions protéiques
- ✓ l'optimisation des procédés d'extraction et de formulation
- ✓ le développement de nouvelles gammes de soins intégrant ces actifs
- ✓ la réalisation d'études cliniques pour valider l'efficacité et la sécurité des produits sur la peau humaine.

Ce mémoire représente une première contribution à la valorisation des polyphénols de la spiruline en cosmétique naturelle. Il confirme l'intérêt de cette ressource locale et pose les bases pour le développement de produits innovants, sûrs et respectueux de l'environnement.

Références bibliographiques

Antenna Technologies. (2009). *Malnutrition : Spiruline – Données scientifiques.*

<https://www.antenna-france.org/wp-content/uploads/2014/06/spiruline-donnees-scientifiques.pdf>

Archer, D. L., & Glinsarm, W. H. (1985). Intestinal infection and malnutrition initiate AIDS. *Nutritional Research*, 5(1), 19.

Banks, J. (2007). *Étude de la Spiruline au Palacret : Étudier la faisabilité de la mise en place d'une filière spiruline sur le site du Palacret, dans les Côtes d'Armor.*

Batista, A. P., Gouveia, L., Bandarra, N. M., Franco, J. M., & Raymundo, A. (2013). Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products. *Algal Research*, 2(2), 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.01.004>

Becker, E. W. (2013). Microalgues pour la nutrition humaine et animale. Dans A. Richmond & Q. Hu (Éds.), *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology* (2^e éd., p. 461–503). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch25>

Becker, E. W., Jakover, B., Luft, D., & Schmuelling, R. M. (1986). Clinical and biochemical evaluations of the alga *Spirulina* with regard to its application in the treatment of obesity: A double-blind cross-over study. *Nutritional Reports International*, 33(5), 565-574.

Belay, A. (2002). The potential application of *Spirulina* (*Arthrospira*) as a nutritional and therapeutic supplement in health management. *Journal of the American Nutraceutical Association (JANA)*, 5(2), 27–48.

Békro, Y. A., Janat, A., Békro, M., Boua, B. B., Trabi, F. H., & Éhilé, E. (2007). Étude ethnobotanique et screening phytochimique de *Caesalpinia benthamiana* (Baill.) Herend et Zarucchi (Caesalpinaceae). *Sciences & Nature*, 4(2), 217–225.

Bougoffa, S., & Hamidi, A. (2020). Étude de l'activité antibactérienne de l'extrait de la spiruline (*Spirulina platensis*) sur différentes souches pathogènes dans la région de Ouargla [Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla].

Casal, A. (2019). L'Aliment Idéal et le plus Complet de Demain. spirulinefrance.fr. Retrieved from www.spirulinefrance.fr

Charpy, L., Langlade, M.-J., & Alliod, R. (2008). *La spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique ?* Marseille : IRD.

Chavane, M., Boumaiza, M., Aksas, M., & Bouabida, H. (2001). *Titre et détails à compléter.*

Ciferri, O. (1983). Spirulina, the edible microorganism. *Microbiological Reviews*, 47(4), 551–578.

Cruchot, H. (2008). *La spiruline : bilan et perspectives* [Thèse d'exercice, Université de Franche-Comté, Faculté de médecine et de pharmacie].

de Mule, M. C., De Caire, G., & de Cano, M. (1996). Bioactive substances from *Spirulina platensis* (Cyanobacteria). *International Journal of Experimental Botany*, 58, 93–96.

Deng, R., & Chow, T. (2010). Hypolipidemic, antioxidant, and antiinflammatory activities of microalgae spirulina. *Cardiovascular Therapeutics*, 28(4). <https://doi.org/10.1111/j.1755-5922.2010.00200.x>

Djafar, I., & Menzri, I. (2017). *Extraction et purification des métabolites secondaires du champignon algérien Pleurotus eryngii et évaluation de leur activité antioxydante* (Mémoire de master, Université des Frères Mentouri Constantine).

Do, Q. D., Angkawijaya, A. E., Tran-Nguyen, P. L., Huynh, L. H., Soetaredjo, F. E., Ismadji, S., & Ju, Y. H. (2014). Effect of extraction solvent on total phenol content, total flavonoid content, and antioxidant activity of *Limnophila aromatica*. *Journal of Food and Drug Analysis*, 22(3), 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2013.11.001>

EPPO European and Mediterranean Plant Protection Organization. (2021). *Arthrospira platensis* (ARTRPL). In EPPO Global Database.

Fukino, H., Takagi, Y., & Yamane, Y. (1990). Effect of *Spirulina* (*Spirulina platensis*) on the renal toxicity induced by inorganic mercury and cisplatin. *Eisei Kagaku*, 36, 5.

- Goldsmith, C. D., Vuong, Q. V., Stathopoulos, C. E., Roach, P. D., & Scarlett, C. J.** (2014). Optimization of the aqueous extraction of phenolic compounds from olive leaves. *Antioxidants*, 3(4), 700–712. <https://doi.org/10.3390/antiox3040700>
- Grosshagauer, S., Kraemer, K., & Somoza, V.** (2020). The True Value of Spirulina. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 68(14), 4109-4115.
- Hajati, H., & Zaghari, M.** (2019). *Spirulina platensis in poultry nutrition* (1st ed., 230 pp.). Cambridge Scholars Publishing.
- Karumi, Y., et al.** (2004). Simple screening methods for flavonoids and alkaloids. *Natural Product Research*, 18(4), 301-306.
- Labreche, N., & Younsi, F. Z.** (année à compléter).
- Lupatini, A. L., Colla, L. M., Canan, C., & Colla, E.** (2017). Potential application of microalga *Spirulina platensis* as a protein source. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(3), 724–732. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7787>
- Mathew, B., Sankaranarayanan, R., Nair, P., Varghese, C., Somanathan, T., Amma, B. P., Amma, N. S., & Nair, M. K.** (1995). Evaluation of chemoprevention of oral cancer with *Spirulina fusiformis*. *Nutrition and Cancer*, 24(2), 197–202. <https://doi.org/10.1080/01635589509514407>
- Merabet, K., & Benyeza, S.** (2021). Contrôle de la qualité des produits cosmétiques : Cas des shampooings pour bébés [Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla]. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Mohammedi, Z.** (2005). *Étude du pouvoir antimicrobien et antioxydant des huiles essentielles et flavonoïdes de quelques plantes de la région de Tlemcen* (Thèse de magistère). Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen.
- Parada, J. L., de Caire, G., de Mule, M. C., & de Cano, M. M.** (1998). Lactic acid bacteria growth promoters from *Spirulina platensis*. *International Journal of Food Microbiology*, 45, 225–228.

Rihane, N., & Benlahreche, F. (2013). Contribution à l'étude phytochimique et l'activité biologique de l'*Origanum glandulosum* Desf.

République Algérienne Démocratique et Populaire. (2020, 24 mars). Arrêté interministériel du 21 Safar 1441 correspondant au 21 octobre 2019 portant règlement technique fixant les critères microbiologiques des produits cosmétiques et d'hygiène corporelle. Journal Officiel de la République Algérienne, (16), 11–17.

Sall, M. G., Dankoko, B., Badiane, M., Ehua, E., & Kuwakuwi, N. (1999). La spiruline, une source alimentaire à promouvoir (Article 46(3)). *Laboratoire de Chimie Thérapeutique*.

Seladji, M., Belmekki, N., Azmani, I., Bouziani, I., & Bendimerad, N. (2013). Phytochemical screening of two Algerian medicinal plants: *Moricandia arvensis* and *Pseudocytisus integrifolius*. *Journal of Natural Products and Plant Resources*, 3(2), 105–109.

Sguera, S. (2008). *Spiruline contre malnutrition et faim dans le monde*.

<https://solidarites.info/sosefants-org/spiruline.html>

Shastri, D., Kumar, M. M. M., & Kumar, A. (1999). Modulation of lead toxicity by *Spirulina fusiformis*. *Phytotherapy Research*, 13, 258-260.

Stoyneva Gärtner, M., Uzunov, B., & Gärtner, G. (2020). Enigmatic microalgae from aeroterrestrial and extreme habitats in cosmetics: The potential of the untapped natural sources. *Cosmetics*, 7(2), 27.

Sultana, B., Anwar, F., & Ashraf, M. (2009). Effect of extraction solvent/technique on phenolic contents and antioxidant activity. *Molecules*, 14(6), 2167-2180.

<https://doi.org/10.3390/molecules14062167>

Takai, Y., Hossayamada, Y., & Kato, T. (1991). Effect of water soluble and water insoluble fractions of *Spirulina* over serum lipids and glucose resistance of rats. *Journal of the Japanese Society for Nutritional Food Science*, 44(6), 273–277.

Théodore, Z. G. H. C. (2017). *Optimisation de la culture de la spiruline en milieu contrôlé : éclairage et estimation de la biomasse* [Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier].

Treki, A., et al. (2009). Étude phytochimique et évaluation de l'activité antimicrobienne de différents extraits de plantes médicinales.

Treki Amina S., Merghem R., Dehimat L. (2008). Etude phytochimique et évaluation de l'activité antibactérienne d'une labiée : *Thymus hirtus*. *Sciences & Technologie*, 29, 25–29.

Tsuchihashi, N., Watanabe, T., & Takai, Y. (1987). Effect of *Spirulina platensis* on caecum content in rats. *Bulletin of Chiba Hygiene College*, 5, 27–30.

Vijayakumari, K., et al. (2013). Tannin detection in plant extracts. *Plant Science Reviews*, 8(2), 112–120.

Vuong, Q. V., Hirun, S., Roach, P. D., Bowyer, M. C., Phillips, P. A., & Scarlett, C. J. (2013). Effect of extraction conditions on total phenolic compounds and antioxidant activities of *Carica papaya* leaf aqueous extracts. *Journal of Herbal Medicine*, 3(3), 104–111.
<https://doi.org/10.1016/j.hermed.2013.04.004>

Yamane, Y., Fukino, H., Icho, T., Kato, T., & Shimamatsu, H. (1998). Effect of *Spirulina* (*Spirulina platensis*) on the renal toxicity induced by inorganic mercury and para-aminophenol. *Summary of Abstracts, 108th Conference of the Pharmaceutical Society of Japan*, 58.

Zheng-wu, H., Chao-tsi, T., & Yuan-zhen, Z. (1994). The effects of polysaccharide and phycocyanin from *Spirulina platensis* on peripheral blood and hematopoietic system of bone marrow in mice. *Book of Abstracts: Second Asia Pacific Conference on Algal Biotechnology*, 58.

Abstract

This study aimed to optimize the extraction and valorization of polyphenols from *Spirulina platensis*, a microalga with promising bioactive properties. Three solvents (hot water, ethanol, methanol) were evaluated using solid-liquid extraction, with ethanol yielding the highest polyphenol content. Liquid-liquid extraction was then employed to isolate flavonoid-enriched fractions (identified by TLC), with the n-butanol phase from the ethanol extract showing the highest flavonoid concentration. A protein fraction was also detected, requiring further characterization. The butanol fraction, exhibited moderate antioxidant, anti-inflammatory, and antibacterial activities as assessed by standardized assays. Finally, their incorporation into a facial cleansing gel confirmed their safety and skin compatibility, suggesting potential applications in natural cosmetics.

Keywords

Spirulina platensis, Polyphenols, flavonoids, antioxidant, anti-inflammatory, cleaning gel.

Résumé

Cette étude vise à optimiser l'extraction et la valorisation des polyphénols de *Spirulina platensis*, une microalgue aux propriétés bioactives prometteuses. Trois solvants (eau chaude, éthanol, méthanol) ont été évalués en extraction solide-liquide, révélant une teneur supérieure en polyphénols pour l'éthanol. Une extraction liquide-liquide a permis d'isoler des fractions enrichies en flavonoïdes (identifiées par CCM), la phase n-butanol issue de la méthode éthanolique présentant la concentration la plus élevée. Une fraction protéique a également été détectée, nécessitant des investigations complémentaires. Les extraits, en particulier la fraction butanolique, ont démontré une activité antioxydante, anti-inflammatoire et antibactérienne modérée, évaluée par des tests standardisés. Enfin, leur incorporation dans un gel nettoyant facial a confirmé leur sécurité et bonne tolérance cutanée, ouvrant des perspectives d'application en cosmétique naturelle.

Mots-clés

Spirulina platensis, Polyphénols, flavonoïdes, antioxydant, anti inflammatoire, gel nettoyant.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين استخلاص وتثمين البوليفينولات من *Spirulina platensis*، وهي طحلب دقيق يتميز بخصائص بيولوجية فعالة واعدة. تم تقييم ثلاثة مذيبات (الماء الساخن، الإيثانول، الميثانول) باستخدام تقنية الاستخلاص الصلب-السائل، حيث أظهر الإيثانول أعلى محتوى من البوليفينولات. كما أتاح الاستخلاص السائل-السائل عزل كسور غنية بالفلافونويدات (تم تحديدها بواسطة تحليل الطبقة الرقيقة - CCM)، وكانت الطور البيوتانولي الناتج عن الطريقة الإيثانولية هو الأغنى. تم أيضاً الكشف عن جزء بروتيني يتطلب دراسات تكاملية. أظهرت المستخلصات، ولا سيما الكسر البيوتانولي، نشاطاً مضاداً للأكسدة ومضاداً للالتهاب ومضاداً للبكتيريا بدرجة متوسطة، وتم تقييمها باستخدام اختبارات معيارية. وأخيراً، أظهرت إدماج هذه المستخلصات في جل منظف للوجه أماناً وتحملاً جيداً للبشرة، مما يفتح آفاقاً لتطبيقها في مستحضرات التجميل الطبيعية.

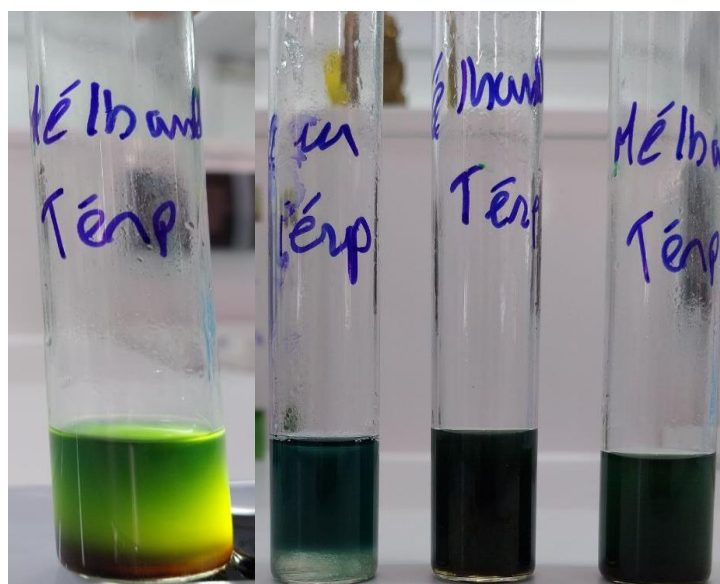
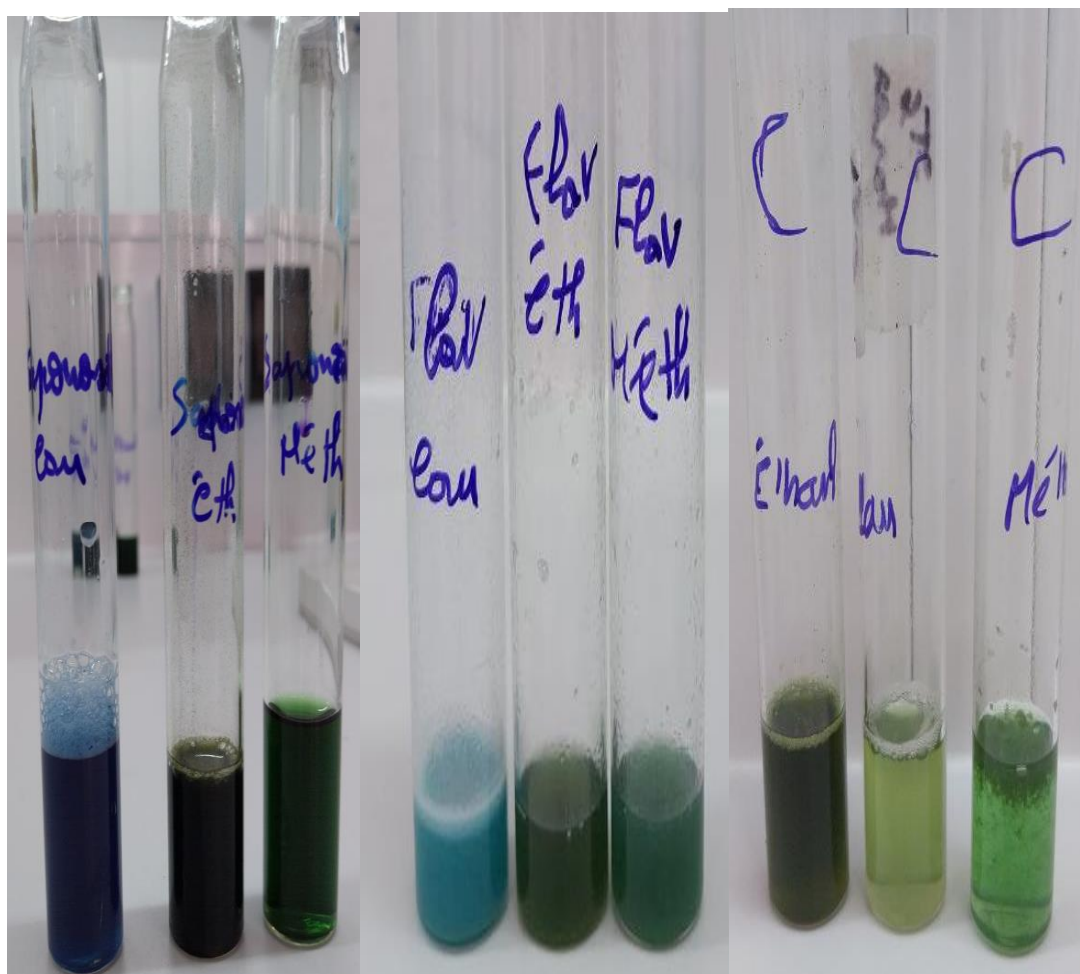
الكلمات المفتاحية: سبيرولينا بلاتينسيس، البوليفينولات، الفلافونويدات، مضادات الأكسدة، مضادات الالتهاب، جل منظف.

Les annexes

Annexe 1

29 Rajab 1441 24 mars 2020		JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 16		27
ANNEXE I			ANNEXE II	
Critères microbiologiques des produits cosmétiques et d'hygiène corporelle				
A. - Produits destinés aux enfants de moins de trois (3) ans, à la zone oculaire et aux muqueuses				
Types de micro-organismes	Limites microbiologiques (UFC ⁽¹⁾ /g ou UFC/ml) ⁽²⁾			
	m ⁽³⁾	M ⁽⁴⁾		
Micro-organismes aérobies mésophiles totaux	≤ 10 ²	≤ 2 x 10 ²		
Levures et moisissures	≤ 10 ²			
<i>Escherichia coli</i>	Absence dans 1 g ou 1 ml			
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Absence dans 1 g ou 1 ml			
<i>Staphylococcus aureus</i>	Absence dans 1 g ou 1 ml			
<i>Candida albicans</i>	Absence dans 1 g ou 1 ml			
B. - Autres produits				
Types de micro-organismes	Limites microbiologiques (UFC ⁽¹⁾ /g ou UFC/ml) ⁽²⁾			
	m ⁽³⁾	M ⁽⁴⁾		
Micro-organismes aérobies mésophiles totaux	≤ 10 ³	≤ 2 x 10 ³		
Levures et moisissures	≤ 10 ²			
<i>Escherichia coli</i>	Absence dans 1 g ou 1 ml			
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Absence dans 1 g ou 1 ml			
<i>Staphylococcus aureus</i>	Absence dans 1 g ou 1 ml			
<i>Candida albicans</i>	Absence dans 1 g ou 1 ml			
<p>(1) UFC : Unité formant colonie</p> <p>(2) UFC/g : Unité formant colonie pour les produits solides.</p> <p>UFC/ml : Unité formant colonie pour les produits liquides.</p> <p>(3) « m » : nombre de germes présents dans un gramme ou un millilitre de produit analysé, qui correspond à la valeur en dessous de laquelle la qualité du produit est considérée comme satisfaisante ;</p> <p>(4) « M » : nombre de germes présents dans un gramme ou un millilitre de produit analysé, qui correspond à la valeur au dessus de laquelle la qualité du produit est considérée comme non satisfaisante.</p>				
<p>Procédure de prise d'essai et interprétation des résultats d'analyses microbiologiques</p> <p>I. Prise d'essai :</p> <ul style="list-style-type: none"> — les produits cosmétiques et d'hygiène corporelle sont prélevés dans leur conditionnement d'origine et transmis tels quels aux laboratoires. Ils ne doivent être ouverts qu'au début de l'analyse. En l'absence de prescriptions particulières, tous les échantillons doivent être entreposés à une température comprise entre 10 °C et 25 °C et à l'abri de la lumière ; — l'échantillon prélevé, en vue d'analyses microbiologiques, doit être représentatif du lot d'où il provient ; — l'échantillon représentatif d'un lot de produits cosmétiques et d'hygiène corporelle doit être composé, au minimum, de cinq (5) unités d'un même lot et présenter une taille minimale de 50 g en masse ou de 50 ml en volume ; — l'interprétation des résultats d'analyse est effectuée sur la base d'un échantillon moyen composé du nombre d'unités formant l'échantillon. <p>II. Interprétation des résultats d'analyses microbiologiques :</p> <p>1. Interprétation des résultats de dénombrement des micro-organismes aérobies mésophiles totaux :</p> <p>Les résultats s'expriment de la façon suivante :</p> <ul style="list-style-type: none"> — si le résultat d'analyse est inférieur ou égal à « m », le résultat est satisfaisant ; — si le résultat d'analyse dépasse « m » mais n'excède pas « M », le résultat est acceptable ; — si le résultat d'analyse excède « M », le résultat est non satisfaisant. <p>2. Interprétation des résultats de dénombrement des levures et des moisissures (m = M) :</p> <p>Les résultats s'expriment de la façon suivante :</p> <ul style="list-style-type: none"> — si le résultat d'analyse est inférieur ou égal à « m », le résultat est satisfaisant ; — si le résultat d'analyse excède « m », le résultat est non satisfaisant. <p>3. Interprétation des résultats des micro-organismes pathogènes (<i>Escherichia coli</i>, <i>pseudomonas aeruginosa</i>, <i>staphylococcus aureus</i> et <i>candida albicans</i>) :</p> <p>Les résultats s'expriment de la façon suivante :</p> <ul style="list-style-type: none"> — le résultat est satisfaisant lorsqu'il y a absence de micro-organismes pathogènes dans l'échantillon ; — le résultat est non satisfaisant lorsque la présence de micro-organismes pathogènes est détectée dans l'échantillon. 				

Figure a : la fiche des critères microbiologique des produits cosmétique.



Figures b : les résultats des tests phytochimiques.



Figures c : les extraits évaporés

Annexe 2

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

الساحل وتهيئة البحر لعلوم العليا الوطنية المدرسة

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



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

D'ingénieur et du master en sciences de la mer

Options : Biotechnologie marine

Thème :

Formulation d'un gel nettoyant à base des molécules bioactifs à partir de la spiruline

Présenté par :

LAHRACHE Amira Nour Elhouda

ZAHRA Rania

Année universitaire : 2024/2025

Carte d'information

À propos de l'équipe d'encadrement du groupe de travail

a) Équipe d'encadrement :

Encadrant principal :	Spécialité :
Mr BOUGHERIRE Abdelhak	Environnement

2- Équipe de projet :

Équipe de projet	Faculté	Spécialité
LAHRACHE Amira	École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral	Biotechnologie marine
ZAHRA Rania		

INTRODUCTION.....	105
CHAPITRE PRELIMINAIRE : PRESENTATION DE L'IDEE ET DES PROMOTEURS	107
SECTION 1 : ORIGINE DE L'IDEE -----	107
SECTION 2 : POURQUOI CE CHOIX ? -----	107
SECTION3 : PRESENTATION DES PROMOTEURS -----	108
SECTION4 : PARTIE PRENANTE -----	108
SECTION 5: BUSINESS MODEL -----	109
DEUXIEME AXE : ASPECTS INNOVANTS.....	110
<i>Nature des innovations :</i>	<i>110</i>
<i>Domaines d'innovation :</i>	<i>110</i>
CHAPITRE 1 : ETUDE MARKETING ET COMMERCIAL.....	110
SECTION 1 : ETUDE DE L'OFFRE -----	111
a) <i>Présentation de la concurrence.....</i>	<i>111</i>
b) <i>Analyse PESTEL :</i>	<i>112</i>
c) <i>Forces de porter</i>	<i>116</i>
SECTION2 : ETUDE DE LA DEMANDE-----	117
a) <i>Présentation de la problématique et des objectifs de la recherche.....</i>	<i>117</i>
b) <i>Analyse des données.....</i>	<i>118</i>
c) <i>Identification des enquêtés et description de l'échantillon.....</i>	<i>120</i>
d) <i>Taille du marché.....</i>	<i>121</i>
e) <i>Positionnement et cible</i>	<i>122</i>
SECTION 3 : STRATEGIE MARKETING-----	122
a) <i>Présentation de la charte de notre entreprise</i>	<i>122</i>
b) <i>Le produit et ses Caractéristiques.....</i>	<i>123</i>
c) <i>3.3 Formules et prix</i>	<i>124</i>
d) <i>Stratégie de communication (Promotion)</i>	<i>124</i>
d) <i>Stratégie de placement</i>	<i>125</i>
e) <i>Stratégie de distribution</i>	<i>125</i>
e) <i>Analyse SWOT :</i>	<i>126</i>

CHAPITRE 2 : ETUDE TECHNIQUE	127
SECTION 1 : TYPE DE L'ENTREPRISE -----	127
SECTION 2 : CARACTERISTIQUES DU PRODUIT ET DU PROCESSUS DE FABRICATION -----	128
<i>a) Description du produit proposé.....</i>	<i>128</i>
<i>b) Description du processus de fabrication.....</i>	<i>129</i>
SECTION 3 : MOYENS NECESSAIRES AU DEMARRAGE DE L'ACTIVITE -----	131
SECTION 4 : ECONOMIQUE -----	135

listes des tableaux

Tableau 1 : Gamme des produits offerts par les concurrents

Tableau 2: taille de marché cosmétique

Tableau 3: Produits envisagés dans le cadre de l'extension de gamme

Tableau 4 : Seuil de rentabilité économique

Tableau 5: Plan de financement à trois ans

Tableau 6: compte résultats prévisionnelle des 3 ans

AMRA Cosmétique

INTRODUCTION

Dans un monde où la cosmétique naturelle et responsable occupe une place grandissante, nous avons choisi de développer une gamme innovante de soins à base d'extraits marins, et plus particulièrement de spiruline, trésor de la biodiversité.

Notre idée : créer et commercialiser des produits de soin formulés avec des actifs marins reconnus pour leurs propriétés protectrices, hydratantes, purifiantes et anti-âge, afin d'offrir des solutions efficaces et respectueuses de la peau et de l'environnement.

Notre produit phare, un gel nettoyant doux et protecteur, constitue la première étape de cette gamme, qui comprendra également des savons naturels, des gels douche revitalisants, ainsi que des crèmes hydratantes et d'autres soins destinés à nourrir, apaiser et préserver la jeunesse de la peau.

À travers ce projet, nous souhaitons offrir aux consommateurs des soins quotidiens associant efficacité, naturalité et engagement environnemental, en valorisant les richesses marines locales dans une démarche durable et innovante.



5 Chapitre préliminaire : Présentation de l'idée et des promoteurs

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'idée fondatrice de notre projet de création d'entreprise, un projet dédié à la conception et la commercialisation d'une gamme cosmétique naturelle élaborée à partir de ressources marines locales.

Nous y exposons les motivations qui nous ont conduites à développer cette initiative, ainsi que le profil des promotrices, les parties prenantes du projet et le Business Model Canvas qui résume notre organisation et notre proposition de valeur.

5.1 Section 1 : Origine de l'idée

Notre idée : proposer un produit cosmétique innovant, alliant nature, science et richesse marine locale, destiné au marché algérien

5.2 Section 2 : Pourquoi ce choix ?

Le choix de ce projet repose sur les éléments suivants :

- La recherche d'une véritable efficacité dans les soins quotidiens, afin de répondre à un vide sur le marché local.
- Une demande croissante pour des cosmétiques naturels, sains et durables, qui s'inscrit dans un engagement en faveur d'une cosmétique responsable.
- La volonté de valoriser les ressources marines locales, en particulier la spiruline.

5. Calendrier de réalisation du projet :

Les tâches/ Mois	1	2	3	4	5	6	7
Études préalables : préparation des documents nécessaires	X						
Commande des équipements	X						
Construction d'un siège de production		X					
Installation des équipements	X	X					
Achat de matières premières		X					
Réalisation du prototype			X	X	X	X	X

5.3 Section3 : Présentation des promoteurs

Notre projet est porté par deux promotrices, diplômées en ingénierie des sciences de la mer, spécialité biotechnologie marine, avec des compétences complémentaires dans la valorisation des ressources marines et l'innovation cosmétique :

ZAHRA Rania, née le 03/07/2001, diplômée en ingénierie des sciences de la mer biotechnologie marine, Co-fondatrice et responsable R&D.

LAHRACHE Amira Nour Elhouda, née le 27/02/2002, diplômée en ingénierie des sciences de la mer – biotechnologie marine, Co-fondatrice et responsable en Marketing et Stratégie d'Innovation

5.4 Section4 : Partie prenante

Notre projet s'appuie sur un ensemble de parties prenantes qui jouent un rôle clé dans son développement, sa réglementation, sa production et sa commercialisation :

- Ministère du commerce : immatriculation et suivi des activités commerciales.
- Ministère de l'industrie et de la production pharmaceutique : réglementation des produits cosmétiques.
- Ministère de l'environnement et des ressources en eau : respect des normes environnementales et valorisation des ressources marines.
- Centre National du Registre de Commerce (CNRC) : création et formalisation de l'entreprise.
- Laboratoires et organismes de contrôle qualité : validation des formules et certification des produits.
- Clients : pharmacies, parapharmacies, magasins bio, boutiques en ligne, grandes surfaces spécialisées.
- Fournisseurs : producteurs locaux de spiruline, fournisseurs d'ingrédients cosmétiques naturels, fabricants de packaging écoresponsable.
- Médias et réseaux sociaux : communication, promotion et image de la marque.
- Concurrents : Flux, Vinus, Biopharm, Produits d'importation ...
- Institutions financières : financement et accompagnement du projet.

5.5 Section 5 : Business Model

Partenaire clé :

- Producteurs locaux de spiruline.
- ENSSMAL
- Laboratoires cosmétiques / d'analyse agréés.
- ANADE,CNAC (financement/accompagnement)
- les laboratoires, Institut Pasteur (validation)

Ressources clés :

- Ressources humaine.
- Ressources financières.
- Ressources d'équipements (recherche et développement).

Activité clé :

- Extraction de molécules actives
- Formulation cosmétique conforme aux normes algériennes
- Tests de tolérance et stabilité
- Création de marque locale

Proposition de valeur :

- Gel naturel, local, adapté aux peaux normal
- Sans ingrédients agressifs
- Valorisation des ressources algérienne

Canaux de distribution :

- Pharmacies, boutiques bio locales, cosmétique
- Marchés artisanaux / foires
- Réseaux sociaux : Instagram, Facebook, TikTok
- Plateformes e-commerce locales : Jumia DZ, Ouedkniss

Relation Clients

- Service client via WhatsApp, Facebook
- Présence en foires algériennes
- Éducation sur la cosmétique naturelle locale
- Offres de fidélité, abonnements

Segments de clients :

- Femmes (peaux sensibles, acnéiques)
- Consommateurs de bio / naturel
- Marchés urbains : Alger, Oran, Constantine, puis régionaux

Source de revenus :

- Vente directe du gel (150 ml)
- Packs (gel + lotion + crème)
- Abonnements mensuels
- Commandes B2B (pharmacies, instituts de beauté)

Structures des coûts :

- Investissement 7100 Da
- Charge fix 2920 Da
- Les employées : 4500 Da
- Le Chiffre d'affaires : 56908.80 Da
- Les bénéfices : 7038,44 Da

6 Deuxième axe : Aspects innovants

6.1.1 Nature des innovations :

Notre projet propose une innovation croissante, combinant :

- Innovation de produit : un gel nettoyant multifonction inédit en Algérie, associant des actifs marins locaux (spiruline) à des ingrédients naturels pour un effet nettoyant, hydratant, apaisant et protecteur.
- Innovation de marché : introduction d'un gel nettoyant bioactif marin sur un segment encore peu exploité en Algérie, offrant une alternative locale face aux marques importées.
- Innovation écologique : formulation respectueuse de l'environnement et valorisation des ressources marines algériennes.

6.1.2 Domaines d'innovation :

Notre projet se distingue par des innovations dans plusieurs domaines :

- Produit : un soin cosmétique naturel enrichi en extraits marins, associant plusieurs fonctions (nettoyant, hydratant, apaisant, protecteur), encore inédit sous cette forme sur le marché algérien.
- Marché : introduction d'un produit bioactif marin local, positionné sur le segment des cosmétiques naturels et responsables, avec une alternative locale aux produits importés.
- Environnement : formulation sans ingrédients agressifs (sans SLS/SLES, sans parabènes), contribuant à réduire l'impact environnemental des soins quotidiens et valorisant la biodiversité marine algérienne.
- Social : promotion des ressources marines nationales et contribution à la création de valeur ajoutée locale (emploi, entrepreneuriat féminin)

7 Chapitre 1 : Etude marketing et Commercial

Constituant l'élément central de notre plan d'affaires, cette étude permet de définir les principales caractéristiques de notre gel nettoyant naturel, de déterminer notre clientèle cible et de fixer un positionnement adapté au marché.

Elle se structure en trois parties :

- Une première section consacrée à l'étude de l'offre,
- Une deuxième à l'étude de la demande,
- Une dernière dédiée à l'élaboration de notre stratégie marketing.

Notre unité de production et de stockage sera implantée dans la région d'Alger. Le projet s'organise en plusieurs phases :

- **Extraction des molécules bioactives** La fabrication débute par une étape d'extraction des polyphénols et des protéines à partir de la spiruline, nécessitant un laboratoire équipé pour garantir la qualité des extraits obtenus.

- **Formulation et conditionnement du gel**

Les extraits sont intégrés à une base cosmétique naturelle, puis le produit est conditionné dans des emballages adaptés, au sein de la même unité.

- **Stockage et commercialisation**

Les produits finis sont stockés avant d'être distribués sur le marché national. Notre objectif est de commercialiser notre gamme sur l'ensemble du territoire algérien, en valorisant un produit local de qualité respectueux de la peau et de l'environnement.

7.1 Section 1 : Etude de l'offre

L'étude de l'offre constitue une étape essentielle dans le processus de prise de décision marketing.

Elle vise à analyser les acteurs déjà présents sur le marché, à identifier leurs points forts et leurs points faibles, et à repérer les opportunités pour positionner notre produit de manière compétitive.

a) Présentation de la concurrence

Avec l'amélioration du niveau de vie et l'évolution des habitudes de consommation en Algérie, les consommateurs montrent un intérêt croissant pour les produits cosmétiques, notamment ceux à base d'ingrédients naturels et respectueux de la peau.

Le marché local voit émerger un nombre croissant d'acteurs proposant des produits de soin visage, y compris des gels nettoyants, avec des gammes et des prix variés.

Dans ce contexte, la concurrence entre fabricants et distributeurs s'est intensifiée, avec la présence de marques locales bien établies et de marques importées, rendant le marché exigeant et dynamique.

Nos principaux concurrents sont des marques qui occupent déjà une place sur le segment des soins visage :

Tableau 18: produits offerts par les concurrents

Type de concurrents	Marques / Produits	Description / Fonction
Concurrents directs	Swalis, Flux Care, Nial, Vinus, Dermactive, Dermasoufre, Zorah, produits importés ...	Gels nettoyants visage, produits premium importés
Concurrents indirects	Toner (lotions toniques), savon visage, eau micellaire, démaquillant, mousse nettoyante	Alternatives pour nettoyer ou démaquiller le visage, formats et usages différents mais répondant au même besoin de soin facial

L'analyse des principaux concurrents a permis d'identifier les gammes de produits qu'ils proposent sur le marché algérien des soins cosmétiques, en particulier des gels nettoyants et produits associés

b) Analyse PESTEL :

L'analyse PESTEL est une méthode stratégique qui permet d'évaluer les facteurs macro-environnementaux susceptibles d'influencer une entreprise, positivement ou négativement. Cet outil analyse six grandes catégories d'influences externes : Politique, Économique, Socioculturel, Technologique, Écologique (ou Environnemental) et Légal.

Son objectif est d'identifier les opportunités et les menaces issues de l'environnement externe afin d'aider l'entreprise à s'adapter, anticiper les évolutions et élaborer des stratégies efficaces.

Politique :

- Soutien à l'entrepreneuriat national :

L'État algérien a mis en place plusieurs dispositifs d'appui pour les jeunes porteurs de projets :

- ANSEJ / ANGEM / CNAC : financement, accompagnement administratif, exonérations fiscales.
- Ministère de la pêche et des produits halieutiques : promotion de la valorisation des ressources marines locales, notamment via les biotechnologies marines.

- Stratégie de substitution aux importations :

Encouragement de la production locale pour remplacer les produits importés, surtout dans les secteurs comme l'agroalimentaire, la santé et la cosmétique.

- Initiatives en faveur de la cosmétique naturelle locale émergent, mais il n'existe pas encore de stratégie nationale claire dans ce secteur.

Économique :

- Pouvoir d'achat fluctuant : le prix du gel devra rester accessible, surtout pour toucher la classe moyenne.

- Coût d'importation élevé (matières premières, équipements) à cause de :

- Taux de change défavorable (dinars/euros),
- Restrictions douanières et procédures d'import longues.

- Opportunité de marché :

- Les produits cosmétiques naturels de qualité sont très peu développés localement,
- Forte dépendance à l'importation → place à prendre pour un produit "Made in Algeria".

Socioculturel :

- Demande croissante pour des produits naturels et sans produits chimiques (notamment chez les femmes jeunes, les mamans, les personnes à peau sensible).

- Conscience écologique encore en développement, mais les tendances "zéro déchet", "sans parabènes", "sans sulfates" sont en hausse dans les villes.

- Forte valorisation des produits locaux et de la filière marine algérienne (comme la spiruline).
- Besoin de pédagogie pour expliquer les bienfaits des actifs marins au grand public.

Technologique :

- Accès limité à certaines technologies de formulation cosmétique (émulsion, stabilisation, tests de compatibilité).
- Faible nombre de laboratoires spécialisés en cosmétique marine → importance des partenariats avec des universités ou centres de recherche (ex : CRAPC, CDER, ENSSMAL, etc.).
- Numérisation en cours :
Possibilité de vendre en ligne via des plateformes locales (Jumia, Echri Online, etc.) ou via réseaux sociaux (Instagram, TikTok).

Environnemental :

- Réglementation environnementale (loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement) oblige à :
 - Gérer correctement les déchets de production,
 - Éviter l'usage d'agents chimiques nocifs (solvants volatils, colorants synthétiques),
 - Respecter les normes de rejet d'eau usée industrielle.
- Avantage concurrentiel :
Formuler sans parabènes, sans tensioactifs agressifs → faible impact écologique.
- Opportunité d'utiliser des emballages recyclables ou biodégradables, bien vus par les consommateurs.

Légal :

Réglementation des produits cosmétiques en Algérie :

- Il n'existe pas encore de code algérien spécifique et complet comme le règlement (CE) n°1223/2009 européen, mais les cosmétiques sont encadrés par :

- Le Décret exécutif n°92-286 du 6 juillet 1992 : conditions de fabrication, importation, distribution de produits cosmétiques et d'hygiène corporelle.
- La norme algérienne NA 13410 : exigences générales en matière de sécurité et d'étiquetage.
- Exigences principales :
 - Déclaration d'activité auprès du Ministère de la Santé / Direction de la Pharmacie,
 - Liste d'ingrédients selon la nomenclature INCI,
 - Étiquetage : origine, durée de conservation, usage, précautions, numéro de lot,
 - Tests de sécurité obligatoires : test dermatologique, microbiologique, stabilité, etc.
- Pour les produits bio/naturels, il est recommandé (pas encore obligatoire) d'obtenir des certifications privées (ex. : Ecocert, Cosmos, ISO 22716 – bonnes pratiques de fabrication).

c) Forces de porter

Définition :

L'analyse de Porter est un outil stratégique développé par **Michael E. Porter** en 1979, qui permet d'évaluer l'intensité de la concurrence au sein d'un secteur d'activité, ainsi que la rentabilité potentielle de ce secteur. Elle repose sur cinq forces concurrentielles qui influencent la dynamique du marché.

Intensité concurrentielle

- Acteurs locaux présents
- Produits naturels similaires
- Peu de spiruline utilisée
- Marché en expansion
- Différenciation indispensable

Pouvoir des clients

- Clients sensibles au prix
- Recherche de qualité/naturel
- Choix varié de produits
- Peu de fidélité initiale
- Importance du marketing

Pouvoir des fournisseurs

- Matières premières spécifiques
- Spiruline locale = avantage
- Dépendance à certains intrants
- Emballages écoresponsables

Menace des nouveaux entrants

- Marché attractif et accessible
- Barrières faibles à modérées
- Risque de copies rapides
- Innovation à protéger
- Image de marque clé

Produits de substitution

- Savons naturels disponibles
- Huiles, argiles nettoyantes
- Produits traditionnels préférés
- Nécessité d'éduquer le client
- Valoriser les bénéfices uniques

Législation / réglementation

- Normes cosmétiques algériennes
- AMM obligatoire (mise marché)
- Étiquetage et traçabilité requis
- Tests de sécurité nécessaires
- Réglementation à surveiller

7.2 Section2 : Etude de la demande

L'étude de la demande vise à mieux comprendre les attentes des consommateurs en matière de cosmétiques naturels et efficaces, afin d'orienter le développement de notre gel nettoyant.

Pour cela, un questionnaire structuré de 13 questions fermées a été élaboré. Il a permis de collecter des données sur :

- Les habitudes d'achat et les critères de choix des produits cosmétiques,
- L'intérêt pour des soins naturels offrant des bénéfices réels (hydratation, protection, douceur),
- La sensibilité des consommateurs au prix et aux modes de distribution,
- La connaissance des consommateurs à propos la spiruline, afin d'évaluer leur pertinence dans la communication autour du produit,
- Ainsi que des informations générales sur le profil des répondants.

Cette étude a pour but de définir un positionnement adapté au marché et de répondre au mieux aux besoins et attentes des clients potentiels.

a) Présentation de la problématique et des objectifs de la recherche

Le marché algérien des cosmétiques naturels est encore peu développé, laissant une large place aux produits importés. Dans ce contexte, il est important d'étudier si un gel nettoyant naturel, efficace et respectueux de la peau, proposé par une marque locale, pourrait répondre aux attentes des consommateurs.

1.1 Présentation de l'échantillon

Notre enquête a été réalisée auprès d'un échantillon de 60 personnes, bien que la taille de notre échantillon soit restreinte au regard des standards scientifiques, elle reflète un premier aperçu utile, compte tenu des contraintes de temps et de moyens. Constitué à partir des réponses collectées via un questionnaire en ligne diffusé principalement dans la région d'Alger.

Les données recueillies ont été saisies et traitées à l'aide de l'outil Excel, ce qui a permis d'organiser les résultats et de faciliter leur analyse.

b) Analyse des données

Q1 – Utilisez-vous un gel nettoyant pour le visage ?

- Oui, tous les jours : 50 %
- Oui, de temps en temps : 37,9 %
- Non, jamais : 12,1 %

L'utilisation d'un gel nettoyant pour le visage constitue une habitude pour 87,9 % des répondants (dont 50 % l'utilisent quotidiennement), contre 12,1 % qui déclarent ne jamais en utiliser.

Q2 – Quel type de gel nettoyant utilisez-vous actuellement ?

- Gel nettoyant classique (pharmacie, grande surface) : 63,1 %
- Gel nettoyant naturel / bio : 7 %
- Savon dermatologique : 12,3 %
- Eau micellaire : 8,8 %
- Je n'utilise pas de produit nettoyant : 8,8 %

La majorité des répondants (63,1 %) utilisent un gel nettoyant classique, tandis que seulement 7 % privilégient un gel naturel ou bio. Les autres répondants se tournent vers des solutions alternatives comme le savon dermatologique (12,3 %) ou l'eau micellaire (8,8 %). Enfin, 8,8 % déclarent ne pas utiliser de produit nettoyant.

Q3 – Achetez-vous habituellement des produits cosmétiques naturels et/ou locaux ?

- Oui, souvent : 29,8 %
- Parfois : 66,7 %
- Jamais : 1,8 %
- Je ne fais pas attention à cela : 7 %

L'achat de cosmétiques naturels et/ou locaux est une pratique fréquente ou occasionnelle pour 96,5 % des répondants, dont près de 30 % se tournent souvent vers ce type de produit. À l'inverse, seule une faible part des participants (1,8 %) déclare n'en acheter jamais.

Q4 – Quelle importance accordez-vous à la composition naturelle d'un produit cosmétique ?

- Très importante : 57,9 %
- Moyennement importante : 22 %
- Peu importante : 3 %
- Pas du tout importante : 0 %

La composition naturelle d'un produit cosmétique est jugée importante ou très importante par 79,9 % des répondants, avec une majorité nette (57,9 %) qui y accorde une grande importance. Seule une minorité (3 %) considère cet aspect comme peu important.

Q5 – Qu'attendez-vous principalement d'un gel nettoyant ?

- Nettoyage en profondeur : 57,9 %
- Effet hydratant : 49,1 %
- Réduction des imperfections : 26,3 %
- Formule naturelle / bio : 21,1 %
- Sans sulfate / sans produits agressifs : 24,6 %

Les principales attentes des répondants concernent avant tout le nettoyage en profondeur (57,9 %), suivi par l'effet hydratant (49,1 %). Les aspects liés à la douceur et à la composition (sans sulfates, naturel / bio) intéressent également une part significative des consommateurs (environ 20 à 25 %), tandis que 26,3 % espèrent une action sur les imperfections.

Q6 – Préférez-vous :

- Des produits naturels : 56,1 %
- Des produits classiques (pharmacie, grande surface) : 17,5 %
- Peu importe, tant que c'est efficace : 31,6 %

Les répondants expriment une nette préférence pour les produits naturels (56,1 %). Toutefois, 31,6 % se déclarent avant tout attentifs à l'efficacité, indépendamment du type de produit, tandis qu'une minorité (17,5 %) privilégie les produits classiques.

Q7 – Seriez-vous intéressé(e) par un gel nettoyant : produit localement, formulé avec des ingrédients naturels, respectueux de la peau et sans tensioactifs agressifs ?

- Oui : 86 %
- Non : 0 %
- Peut-être : 14 %

Une très large majorité des répondants (86 %) se montre intéressée par un gel nettoyant local, naturel et respectueux de la peau, tandis qu'aucun participant n'a exprimé un désintérêt. Seuls 14 % restent hésitants.

Q8 – Quel prix seriez-vous prêt(e) à payer pour un gel nettoyant 100 % naturel (100 mL) ?

- Moins de 1200 DA : 43,9 %
- 1200–1900 DA : 43,9 %

- 1900–2450 DA : 16,8 %
- Plus de 2450 DA : 8,8 %

La majorité des répondants (87,8 %) se déclare prête à acheter un gel nettoyant naturel à un prix inférieur à 1900 DA, avec un équilibre entre ceux qui préfèrent un prix inférieur à 1200 DA et ceux acceptant 1200–1900 DA (43,9 % chacun). Une part plus réduite envisage un budget supérieur.

Q9 – Où préférez-vous acheter vos produits cosmétiques ?

- Pharmacie : 71,9 %
- Supermarché : 22,3 %
- Boutique bio / naturelle : 24,6 %
- En ligne : 15,8 %
- Autre : 3,5 %

Concernant les habitudes d'achat des produits cosmétiques, nous remarquons que 71,9 % des répondants privilégient la pharmacie, suivie des boutiques bio / naturelles (24,6 %) et des supermarchés (22,3 %). L'achat en ligne reste moins fréquent (15,8 %).

Q10 – Connaissez-vous la spiruline ?

- Oui : 60,7 %
- J'en ai entendu parler, mais je ne connais pas bien : 16,1 %
- Non : 23,2 %

La spiruline est connue d'une majorité des répondants (60,7 %), ce qui montre un bon niveau de familiarité avec cet ingrédient naturel. Toutefois, une part non négligeable (16,1 %) en a seulement entendu parler sans réellement la connaître, et 23,2 % n'en ont aucune connaissance. Ces résultats soulignent l'importance de prévoir un effort pédagogique dans la communication du produit afin de valoriser cet actif auprès du grand public.

c) Identification des enquêtés et description de l'échantillon

Sexe ?

- Femme : 93 %
- Homme : 7 %

L'échantillon interrogé est très majoritairement composé de femmes (93 %), ce qui reflète le profil des consommateurs les plus concernés par les produits cosmétiques, notamment les soins du visage.

Âge

- Moins de 18 ans : 0 %
- 18–25 ans : 80,7 %
- 26–35 ans : 17,3 %
- 36–50 ans : 0 %
- Plus de 50 ans : 1,8 %

L'échantillon est composé en grande majorité de jeunes adultes âgés de 18 à 25 ans (80,7 %), ce qui correspond à une cible particulièrement sensible aux tendances des soins naturels et aux nouveautés cosmétiques. Les autres tranches d'âge sont faiblement représentées.

Après avoir mené cette étude auprès des consommateurs, les résultats obtenus nous ont permis de mieux comprendre les attentes réelles du marché en matière de gels nettoyants et de produits cosmétiques naturels.

Cette analyse a confirmé la pertinence de notre stratégie d'entreprise, qui repose sur :

- **Une stratégie de spécialisation**, en proposant un gel nettoyant naturel à base d'actifs marins locaux,
- **Une stratégie de pénétration du marché**, avec un positionnement prix plus accessible que celui de la majorité de nos concurrents, tout en offrant un produit de qualité supérieure.

Ainsi, notre projet répond concrètement aux besoins identifiés : efficacité, naturalité, respect de la peau et accessibilité.

d) Taille du marché

En Algérie, le secteur des cosmétiques représente un marché dynamique. Le tableau suivant présente une estimation de la taille du marché par catégorie de produit :

Tableau 1 : taille de marché cosmétique

Catégorie de produit	Volume estimé (flacons/an)	Estimation du marché (DZD/an)
Gels nettoyants visage	1 500 000	1 800 000 000
Gels douche	2 000 000	2 400 000 000
Crèmes hydratantes visage	1 200 000	1 800 000 000
Masques visage	800 000	1 200 000 000
Gommages visage/corps	700 000	1 050 000 000

e) Positionnement et cible

Notre stratégie consiste à proposer un gel nettoyant naturel offrant une qualité supérieure et des bienfaits réels pour la peau (hydratation, protection, douceur), à un prix accessible et compétitif par rapport aux produits équivalents sur le marché, notamment face aux marques importées. Le produit se positionne comme une alternative locale et responsable, combinant efficacité et respect de l'environnement en termes de cible, nous visons principalement les femmes appartenant aux catégories socioprofessionnelles moyennes et supérieures (CSP B et A), qui sont particulièrement sensibles à la qualité des soins, à l'efficacité des produits

7.3 Section 3 : Stratégie Marketing

Cette section a pour objectif de présenter les choix stratégiques de notre entreprise sur le plan marketing. Ces choix sont le fruit des analyses de la demande et de l'offre que nous avons menées, et ils visent à positionner notre gel nettoyant naturel ainsi que l'ensemble de notre future gamme cosmétique de manière optimale sur le marché algérien.

a) Présentation de la charte de notre entreprise

Nous avons choisi comme dénomination provisoire de notre entreprise Bleu, et comme marque AMRA. Ce nom de marque est court, facile à prononcer et distinctif, et il évoque un univers naturel et authentique.

Le logo de notre projet intègre des teintes bleu vert, inspirées des pigments naturels de la spiruline : la phycocyanine (bleu) et la chlorophylle (vert).

Le bleu symbolise la mer, la pureté et la sérénité, en lien avec l'origine marine de nos actifs.

Le vert rappelle la nature et la richesse végétale, évoquant un produit sain, respectueux de l'environnement et apaisant pour la peau.

Ce choix de couleurs exprime nos valeurs : naturalité, bien-être, innovation et respect de l'environnement.

b) Le produit et ses Caractéristiques

Notre entreprise est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation de produits cosmétiques innovante.

Notre unité de production prévoit de développer les éléments suivants

Tableau 2 : Produits envisagés dans le cadre de l'extension de gamme

Catégorie	Type de produit	Type de peau ciblé / usage	Contenance	Conditionnement
Gel nettoyant / Mousse	Mousse nettoyante bioactive à la spiruline	Peaux normales à mixtes	150 mL	Flacon pompe recyclable / airless
Gel nettoyant / Mousse	Mousse nettoyante hydratante	Peaux sèches et sensibles	150 mL	Flacon pompe recyclable / airless
Gel nettoyant / Mousse	Mousse purifiante anti-imperfections	Peaux grasses ou à tendance acnéique	150 mL	Flacon pompe recyclable / airless
Crème hydratante (extension)	Crème légère hydratante	Peaux normales à mixtes	50 mL	Pot ou tube recyclable
Crème hydratante (extension)	Crème riche nourrissante	Peaux sèches et sensibles	50 mL	Pot ou tube recyclable

Crème hydratante (extension)	Crème matifiante anti-imperfections	Peaux grasses ou à tendance acnéique	50 mL	Pot ou tube recyclable
Gel douche (extension gamme)	Gel douche aux actifs marins	Tous types de peaux	250 mL	Flacon recyclable
Savon solide (extension)	Savon dermatologique à la spiruline	Peaux sensibles / usage quotidien	100 g	Étui carton

c) 3.3 Formules et prix

Le choix des prix de vente de nos produits n'a pas été arbitraire. Il repose sur plusieurs éléments

- Les résultats de notre étude de marché, qui nous ont permis d'évaluer les attentes et les capacités budgétaires de notre clientèle cible.
- Le coût de revient estimé à partir des matières premières, des procédés de fabrication et du conditionnement.
- La volonté de proposer un produit naturel, local et de qualité, à un prix inférieur à celui des produits équivalents importés, afin de faciliter l'adoption par les consommateurs.

Nous avons ainsi opté pour une stratégie d'équilibre tarifaire, visant à rendre nos produits accessibles tout en reflétant leur qualité premium, afin de conquérir rapidement une part du marché tout en garantissant une marge bénéficiaire raisonnable pour assurer la viabilité de l'entreprise

d) Stratégie de communication (Promotion)

Pour accompagner le lancement et le développement de notre gamme, nous mettons en place une stratégie de communication diversifiée visant à attirer, informer et fidéliser notre clientèle :

- Communication digitale : forte présence sur les réseaux sociaux (Facebook, Instagram, TikTok), création de contenus engageants (vidéos, témoignages, conseils beauté) et campagnes sponsorisées ciblées.

- Publicité locale : affiches et brochures dans les points de vente, pharmacies et magasins partenaires ; bannières sur des sites locaux liés à la beauté et au bien-être.
- Participation à des événements : foires, salons, journées portes ouvertes pour faire découvrir et tester nos produits.
- Promotions et offres de lancement : échantillons gratuits, remises découvertes, packs spéciaux pour encourager les premiers achats.
- Enquêtes de satisfaction et actions de proximité : recueillir les avis des clients et renforcer notre relation avec eux.

Notre objectif est de construire une image de marque forte, associée à la qualité, à la confiance et à l'innovation locale.

d) Stratégie de placement

Nos produits seront placés de façon à maximiser leur visibilité et à valoriser leur caractère innovant et naturel.

Nous prévoyons de les positionner :

- dans les rayons cosmétiques aux côtés des marques locales (ex Swalis, Vinus, Dermactive, Flux Care..) afin de proposer une alternative naturelle et de qualité,
- dans les espaces dédiés aux produits naturels ou bio lorsqu'ils existent (parapharmacies, magasins spécialisés),
- et, lorsque c'est pertinent, en zone de caisse ou de tête de gondole pour favoriser les achats d'impulsion.

e) Stratégie de distribution

Le réseau de distribution de notre entreprise sera organisé de manière à garantir une large accessibilité à nos produits :

- Bleu (notre entreprise) → Pharmacies / parapharmacies → Consommateur
- Bleu → Magasins spécialisés en cosmétique et beauté → Consommateur
- Bleu → Magasins bio / naturels → Consommateur
- Bleu → Grandes surfaces / supermarchés → Consommateur
- Bleu → Vente directe en ligne (site web, réseaux sociaux) → Consommateur

e) Analyse SWOT :

Forces (Strengths)

- Formulation innovante à base d'actifs marins naturels (la spiruline)
- Produit multifonction : nettoyant, antioxydant, hydratant, apaisant, purifiant.
- Capacité d'innovation et de développement produit.
- Engagement éthique et environnemental fort

Faiblesses (Weaknesses)

- Manque de notoriété au lancement.
- Accès limité à certaines ingrédients spécifiques.
- Nouvelle marque
- Besoins initiaux en financement et en matériel de production cosmétique.
- Risques liés aux hausses des coûts des ingrédients

Opportunités

- Marché en croissance des cosmétiques naturels en forte croissance.
- Intérêt croissant pour les produits locaux et durables.
- Partenariats avec des producteurs locaux de spiruline ou d'ingrédients naturels.
- Ouverture à l'exportation vers des pays intéressés par les actifs marins.
- Possibilité de diversification

Menaces (Threats)

- Concurrence accrue des marques internationales bio ou green.
- Méfiance initiale des consommateurs envers un produit innovant local.
- Variabilité de la qualité des matières premières naturelles selon la saison.
- L'entrée des produits d'importation
- Réglementations cosmétiques contraignantes à respecter (tests, certifications...).

8 Chapitre 2 : Etude technique

Notre société Bleu, sous forme de SARL (*Société à Responsabilité Limitée*), est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation de produits cosmétiques naturels et innovants.

Elle est enregistrée auprès du Centre National du Registre du Commerce (CNRC) sous un code d'activité correspondant à :

Domaine d'activité : cosmétique

Code d'activité : 202210

Statu juridique : SARL

Nom commercial : AMRA

Fabrication de parfums et de produits pour la toilette / cosmétiques

Le secteur cosmétique est bien représenté en Algérie : on dénombre environ 71 entreprises actives dans l'industrie cosmétique, dont plusieurs sont implantées à Alger.

Cette réalité plaide en faveur de notre différenciation, à travers une approche locale, moderne et respectueuse de l'environnement.

Dans cette étude technique, nous présenterons :

1. Le type d'entreprise et ses activités
2. Le produit et le processus de fabrication
3. Les moyens humains et matériels nécessaires au démarrage

8.1 Section 1 : Type de l'entreprise

Notre entreprise est une petite et moyenne entreprise industrielle, spécialisée dans la fabrication et la commercialisation de produits cosmétiques. Elle se distingue par la valorisation d'actifs locaux et une approche responsable.

8.2 Section 2 : Caractéristiques du produit et du processus de fabrication

Il s'agit ici de bien définir les caractéristiques de nos produits cosmétiques et de présenter leur processus de fabrication.

Nous proposons des soins conçus dans le respect des normes de qualité et de sécurité, avec des formules étudiées pour répondre aux besoins spécifiques des différents types de peau.

Le processus de fabrication inclut la préparation des actifs, la formulation, le conditionnement et le contrôle qualité, afin de garantir un produit fini efficace, sûr et respectueux de l'environnement.

a) Description du produit proposé

Notre gel nettoyant est un soin qui tient une place essentielle dans la routine quotidienne d'hygiène et de beauté. Dès la première utilisation, il apporte une sensation de fraîcheur, une peau visiblement plus éclatante, et contribue à l'hydratation, tout en éliminant en douceur les impuretés et l'excès de sébum.

Nos formules sont élaborées à partir d'ingrédients sélectionnés pour leur qualité et leur efficacité.

Notre unité de fabrication va produire ces éléments

1. Mousse nettoyante visage (différentes formules selon les besoins : hydratante, purifiante, éclat)
2. Gel douche aux actifs marins (parfum frais, texture douce)
3. Savon dermatologique solide (formule douce, usage quotidien)
4. Crème hydratante visage (différents niveaux d'hydratation selon le type de peau)

Parmi les matières premières nécessaires pour produire ces produits on trouve :

- Actifs issus des ressources naturelles (ex. : extraits végétaux, marins)
- Excipients naturels
- Tensioactifs doux
- Conservateurs

- Eau purifiée
- Parfums

b) Description du processus de fabrication

La description du processus de production permet de connaître l'ensemble des étapes nécessaires pour l'obtention des produits finis et de déterminer les outils et machines nécessaires à la fabrication.

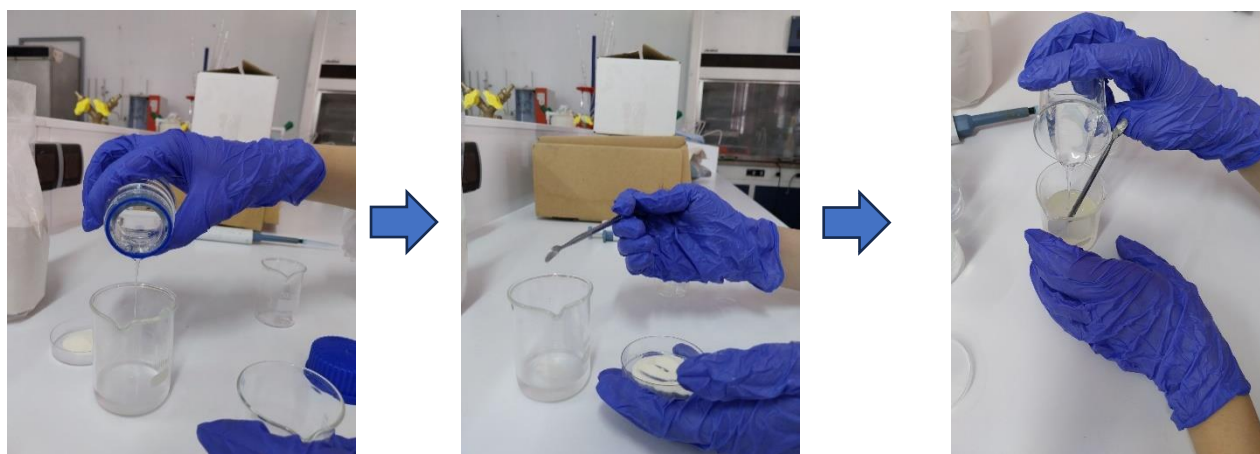
Un processus de fabrication de gel nettoyant :

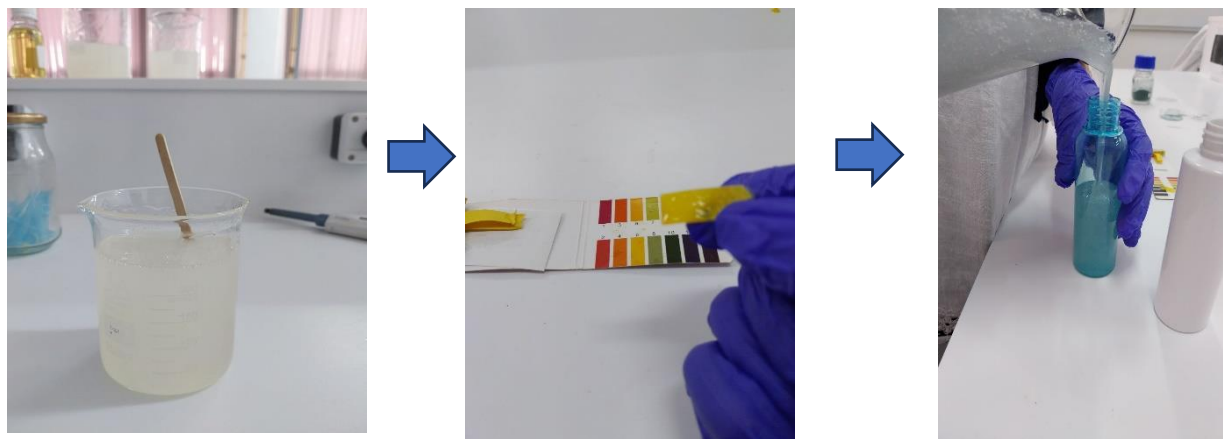
Préparation des actifs → Mélange des ingrédients → Homogénéisation → Remplissage des flacons → Étiquetage → Emballage → Produit fini

Le prototype

Le prototype du gel nettoyant repose sur l'utilisation d'actifs naturels issus de ressources naturelle comme l'extrait de spiruline, combinés à des excipients naturels (glycérine, gommes), des tensioactifs doux, un conservateur, de l'eau purifiée. Le processus de fabrication comprend plusieurs étapes : la préparation de la phase aqueuse en chauffant l'eau avec les excipients, l'ajout des tensioactifs sous agitation, l'incorporation des extraits à température ambiante, puis le conservateur, avec un ajustement éventuel du pH. Le produit est ensuite conditionné dans des flacons ou tubes bien stérile.

Les étapes de fabrication





Le conditionnement

Notre unité dispose des équipements nécessaires pour assurer un conditionnement soigné et adapté à la nature de nos produits cosmétiques. Nous accordons une grande importance à la qualité et à l'aspect visuel des emballages afin de refléter les valeurs de notre marque et de répondre aux attentes des consommateurs.

Le conditionnement primaire

Il concerne le remplissage des flacons, tubes ou pots selon le type de produit (gel nettoyant, mousse, crème). Nos équipements permettent :

- Le remplissage précis des contenants,

- La fermeture (pompe, bouchon, couvercle),
- L'étiquetage des produits (étiquettes informatives et logo).

Le conditionnement secondaire et tertiaire

Cette étape comprend :

- La mise sous étui carton recyclable,
- L'assemblage des produits en lots (packs promotionnels, coffrets),
- La préparation pour le stockage et la distribution.

Chaque étape fait l'objet d'un contrôle qualité pour garantir la conformité, la sécurité et la présentation de nos produits finis.

8.3 Section 3 : Moyens nécessaires au démarrage de l'activité

Pour démarrer notre activité, nous aurons besoin des moyens suivants :

- Moyens de transport
- Location d'un utilitaire léger (ex. : fourgon de 8 CV) pour :
 - Transport des matières
 - Livraison des produits finis vers les points de vente ou les distributeurs.
- Machine
 - Machine de fabrication cosmétique polyvalente (mélangeur homogénéisateur)

- Locaux :

Aménagement :

Emplacement : la zone industrielle de Rouïba

- Espace fabrication : (zone de production et remplissage)
- Espace laboratoire : (zone dédiée à l'extraction, formulation, tests qualité)
- Espace stockage matières premières et produits finis
- Espace conditionnement et emballage
- Bureau administratif
- Espace sanitaires / pause

➤ **Matériel informatique et mobilier nécessaires**

- 2 ordinateurs + 1 imprimante multifonction
- 3 bureaux + 10 chaises
- 2 armoires
- 1 téléphone + connexion internet
- Caméras de surveillance (minimum 2)
- 2 climatiseur (pour les bureaux et laboratoire)
- Réfrigérateur de laboratoire

➤ **Matières premières**

- Eau purifiée
- Excipients
- Tensioactifs doux
- Conservateurs naturels
- Flacons airless / pots / étuis carton
- Étiquettes et emballages
- Substance marine

➤ **Autres équipements et matériel spécifique**

- Équipements de laboratoire :
- Bêchers, erlenmeyers, éprouvettes
- Pipettes automatiques
- Agitateurs magnétiques
- Balance de précision
- Bain-marie

- Ph-mètre
- Verre de montre
- Spatules inox
- Supports et pinces

➤ **Matériel général complémentaire :**

- Étagères pour stockage en laboratoire et production
- Chariots de manutention (pour matières premières / cartons)
- Table inox (pour pesées et manipulations)
- Équipements de nettoyage et d'entretien

➤ Besoins en ressources humaines.

✓ **Un Responsable de production**

Compétences :

- Formation en gestion de production ou ingénierie industrielle (Bac+4 ou équivalent)
- Expérience d'au moins 2 ans en gestion de production (idéalement dans l'industrie cosmétique, pharmaceutique ou agroalimentaire)
- Bonnes connaissances des normes qualité et sécurité (ISO, BPF)
- Capacité à gérer une équipe et à organiser la production

Tâches :

- Définir et piloter la stratégie de production pour optimiser les coûts et la qualité
- Organiser et superviser les opérations de fabrication et de conditionnement
- Encadrer le personnel de production
- Assurer les relations avec les fournisseurs et sous-traitants
- Veiller au respect des normes d'hygiène, de sécurité et d'environnement

✓ **Un chimiste / formulateur**

Compétences :

- Bac+2 ou Bac+3 en chimie, biotechnologie ou formulation cosmétique

- Expérience d'au moins 2 ans dans un laboratoire de production ou de contrôle qualité
- Bonne maîtrise des procédés de formulation et des contrôles physico-chimiques

Tâches :

- Assurer la formulation des produits selon les spécifications
 - Réaliser les contrôles qualité à chaque étape de la production
 - Veiller au respect des normes de sécurité et de qualité
 - Encadrer les opérateurs pendant la production
-

- **Un agent commercial**

Compétences :

- Bac+2 en commerce / marketing / commerce international
- Expérience dans le secteur des biens de consommation ou des cosmétiques
- Permis de conduire obligatoire

Tâches :

- Prospection et développement de la clientèle
 - Suivi des commandes et des livraisons
 - Participation aux actions promotionnelles (foires, salons)
 - Gestion des réclamations et fidélisation des clients
-

- ✓ **Un agent administratif**

Compétences :

- Licence en gestion, administration des affaires ou comptabilité
- Maîtrise du français ; l'anglais est un atout
- Bonnes compétences organisationnelles

Tâches :

- Gestion des documents administratifs et comptables
- Suivi des budgets et des achats
- Organisation des agendas, réunions et correspondances
- Archivage et suivi des dossiers

- ✓ **8 à 10 opérateurs polyvalents**

Compétences :

- Niveau secondaire minimum ; une formation technique (mécanique, électromécanique) est un plus
- Rigueur et capacité à suivre des consignes

Tâches :

- Préparation des matières premières
- Conduite des machines (remplissage, conditionnement)
- Emballage et étiquetage des produits finis
- Nettoyage et entretien des équipements et des locaux

8.4 Section 4 : économique

Cette section vise à évaluer la viabilité financière de notre projet à travers une étude détaillée des principaux indicateurs économiques. Elle comprend les prévisions de chiffre d'affaires, les charges fixes et variables, le plan de trésorerie, ainsi qu'un plan financier à trois ans. L'objectif est de s'assurer de la rentabilité du projet, d'anticiper les besoins en financement et de démontrer la solidité économique de notre modèle.

Tableau 3 : Seuil de rentabilité économique

	Année 1	Année 2	Année 3
Ventes + Autres services	56 908,80	64 306,94	75 882,19
Achats consommés	34 145,28	38 584,17	45 529,32
Total des coûts variables	34 145,28	38 584,17	45 529,32
Marge sur coûts variables	22 763,52	25 722,78	30 352,88
Taux de marge sur coûts variables	40%	40%	40%
Coûts fixes	14 483,00	14 523,00	15 273,00
Total des charges	48 628,28	53 107,17	60 802,32
Résultat courant avant impôts	8 280,52	11 199,78	15 079,88
Seuil de rentabilité (chiffre d'affaires)	36 207,50	36 307,50	38 182,50
Excédent / insuffisance	20 701,30	27 999,44	37 699,69
<i>Point mort en chiffre d'affaires par jour ouvré</i>	<i>144,83</i>	<i>145,23</i>	<i>152,73</i>

Ce tableau présente l'analyse du seuil de rentabilité sur trois années. On observe que le chiffre d'affaires progresse régulièrement de 56 908 800 DA en année 1 à 75 828 219 DA en année 3, ce qui reflète une croissance commerciale significative.

Les charges fixes restent relativement stables, autour de 14 à 15 millions DA, tandis que les charges variables augmentent proportionnellement avec les ventes, ce qui est attendu.

Le seuil de rentabilité, c'est-à-dire le chiffre d'affaires à partir duquel l'entreprise commence à générer des bénéfices, est fixé à :

- 36 207 500 DA en année 1,
- 37 318 407 DA en année 2,
- 39 627 596 DA en année 3.

Ces seuils sont tous inférieurs au chiffre d'affaires réalisé, ce qui prouve que le projet est rentable dès la première année.

Le point mort en jours ouvrés (nombre de jours nécessaires pour atteindre la rentabilité) reste stable, entre 144 et 152 jours, ce qui correspond à environ 6 à 7 mois d'activité par an.

Tableau 4 : Besoin en fonds de roulement

Analyse clients / fournisseurs :

		<i>délai jours</i>		
		Année 1	Année 2	Année 3
Besoins				
Volume crédit client HT	7	1 091,40	1 233,28	1 455,27
Ressources				
Volume dettes fournisseurs HT	45	4 209,69	4 756,95	5 613,20
Besoin en fonds de roulement		- 3 118,29	- 3 523,67	- 4 157,93

Un BFR négatif indique que l'entreprise dispose d'un excédent de trésorerie lié à son cycle d'exploitation, car elle paie ses fournisseurs plus tard qu'elle ne reçoit des paiements de ses clients. Cette situation est favorable, car elle réduit le besoin de financement externe pour couvrir les opérations courantes et améliore la liquidité de l'entreprise. De plus, la tendance à la baisse du BFR (valeurs négatives qui s'amplifient) montre une amélioration progressive de cette position financière.

En résumé, ce tableau met en évidence une gestion efficace des délais de paiement, permettant à l'entreprise de financer son activité opérationnelle sans mobiliser de ressources supplémentaires.

Tableau 19: Plan de financement à trois ans

	Année 1	Année 2	Année 3
Immobilisations	4 600,00		
Acquisition des stocks	1 000,00		
Variation du Besoin en fonds de roulement	- 3 118,29	- 405,38	- 634,26
Remboursement d'emprunts	-	-	-
Total des besoins	2 481,71	- 405,38	- 634,26
Apport personnel	1 100,00		
Emprunts	-		
Subventions	6 000,00		
Autres financements			
Capacité d'auto-financement	7 958,44	10 439,81	13 737,90
Total des ressources	15 058,44	10 439,81	13 737,90
Variation de trésorerie	12 576,73	10 845,19	14 372,16
Excédent de trésorerie	12 576,73	23 421,92	37 794,08

Rappel trésorerie début année 1 : 1 500,00

Interprétation du Plan de financement à trois ans :

Ce tableau met en évidence les besoins de financement et les capacités d'autofinancement de l'entreprise sur une période de trois ans. L'analyse montre une capacité d'autofinancement en nette progression :

- **7 958 440 DA** en année 1,
- **10 439 831 DA** en année 2,
- **12 790 377 DA** en année 3.

Cette dynamique permet de couvrir efficacement les investissements nécessaires au démarrage et au développement de l'activité. Par ailleurs, l'évolution positive de la trésorerie confirme la solidité financière du projet, avec un excédent qui passe de **12 576 733 DA** la première année à **23 421 492 DA** en année 3.

Ces résultats traduisent un projet **autosuffisant, rentable** et **en croissance continue**, offrant une base financière saine pour une exploitation durable.

Tableau 5 : compte résultats prévisionnelle des 3 ans

	Année 1	Année 2	Année 3
Produits d'exploitation	56 908,80	64 306,94	75 882,19
<i>Chiffre d'affaires HT</i>	56 908,80	64 306,94	75 882,19
<i>Chiffre d'affaires HT autres services</i>	-	-	-
Charges d'exploitation	34 145,28	38 584,17	45 529,32
<i>Achats consommés</i>	34 145,28	38 584,17	45 529,32
Marge brute	22 763,52	25 722,78	30 352,88
Charges externes	2 920,00	2 960,00	3 110,00
<i>Assurances</i>	120,00	120,00	120,00
<i>Téléphone, internet</i>	400,00	400,00	400,00
<i>Autres abonnements</i>	-	-	-
<i>Carburant, transports</i>	700,00	700,00	700,00
<i>Frais de déplacement et hébergement</i>	-	-	-
<i>Eau, électricité, gaz</i>	250,00	250,00	350,00
<i>Mutuelle</i>	-	-	-
<i>Fournitures diverses</i>	100,00	120,00	150,00
<i>Entretien matériel et vêtements</i>	150,00	170,00	190,00
<i>Nettoyage des locaux</i>	-	-	-
<i>Budget publicité et communication</i>	-	-	-
<i>Loyer et charges locatives</i>	1 200,00	1 200,00	1 200,00
<i>Expert comptable, avocats</i>	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-

	-	-	-
Valeur ajoutée	19 843,52	22 762,78	27 242,88
Impôts et taxes	-	-	-
Salaires employés	4 500,00	4 500,00	4 500,00
Charges sociales employés	3 240,00	3 240,00	3 240,00
Prélèvement dirigeant(s)	1 800,00	1 800,00	2 400,00
Charges sociales dirigeant(s)	1 103,00	1 103,00	1 103,00
Excédent brut d'exploitation	9 200,52	12 119,78	15 999,88
Frais bancaires, charges financières	-	-	-
Dotations aux amortissements	920,00	920,00	920,00
Résultat avant impôts	8 280,52	11 199,78	15 079,88
Impôt sur les sociétés	1 242,08	1 679,97	2 261,98
Résultat net comptable (résultat de l'exercice)	7 038,44	9 519,81	12 817,90

Le résultat net comptable constitue un indicateur clé de la rentabilité de l'entreprise. Sur les trois premières années, on observe une progression constante de ce résultat, traduisant la solidité financière du projet :

- Année 1 : 7 038 000 DA
- Année 2 : 9 052 371 DA
- Année 3 : 11 581 016 DA

Cette évolution positive témoigne d'une activité bien maîtrisée, avec des charges opérationnelles contenues et un chiffre d'affaires en croissance régulière. Elle indique également que l'entreprise parvient non seulement à couvrir ses coûts, mais aussi à générer des bénéfices significatifs dès la première année. Cela renforce la viabilité et la pérennité économique du projet, et laisse envisager une capacité d'autofinancement importante pour soutenir son développement futur.

Tableau 6 : budget prévisionnel de trésorerie

Première année

Mois 1	Mois 2	Mois 3	Mois 4	Mois 5
--------	--------	--------	--------	--------

Apport personnel	1 100,00				
Emprunts	-				
Subventions	6 000,00				
Autres financements					
Ventes	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40
Ventes autres services	-	-	-	-	-
Chiffre d'affaires (total)	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40
Immobilisations incorporelles	100,00				
Immobilisations corporelles	4 500,00				
Immobilisations (total)	4 600,00				
Acquisition stocks	1 000,00				
Échéances emprunt	-	-	-	-	-
Achats de marchandises	2 845,44	2 845,44	2 845,44	2 845,44	2 845,44
Charges externes	243,33	243,33	243,33	243,33	243,33
Impôts et taxes	-	-	-	-	-
Salaires employés	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00
Charges sociales employés	270,00	270,00	270,00	270,00	270,00
Prélèvement dirigeant(s)	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
Charges sociales dirigeant(s)	91,92	91,92	91,92	91,92	91,92
Total charges de personnel	886,92	886,92	886,92	886,92	886,92
Frais bancaires, charges financières	-	-	-	-	-
Total des décaissements	9 575,69	3 975,69	3 975,69	3 975,69	3 975,69
Total des encaissements	11 842,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40
Solde précédent	-	2 266,71	3 033,42	3 800,13	4 566,84
Solde du mois	2 266,71	766,71	766,71	766,71	766,71
Solde de trésorerie (cumul)	2 266,71	3 033,42	3 800,13	4 566,84	5 333,55

Mois 6	Mois 7	Mois 8	Mois 9	Mois 10	Mois 11	Mois 12	TOTAL
							1 100,00
							-

							6 000,00
							-
4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	56 908,80
-	-	-	-	-	-	-	-
4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	56 908,80
							100,00
							4 500,00
							4 600,00
							1 000,00
-	-	-	-	-	-	-	-
2 845,44	2 845,44	2 845,44	2 845,44	2 845,44	2 845,44	2 845,44	34 145,28
243,33	243,33	243,33	243,33	243,33	243,33	243,33	2 920,00
-	-	-	-	-	-	-	-
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	4 500,00
270,00	270,00	270,00	270,00	270,00	270,00	270,00	3 240,00
150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	1 800,00
91,92	91,92	91,92	91,92	91,92	91,92	91,92	1 103,00
886,92	886,92	886,92	886,92	886,92	886,92	886,92	10 643,00
-	-	-	-	-	-	-	-
3 975,69	3 975,69	3 975,69	3 975,69	3 975,69	3 975,69	3 975,69	53 308,28
4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	4 742,40	64 008,80
5 333,55	6 100,26	6 866,97	7 633,68	8 400,39	9 167,10	9 933,81	
766,71	766,71	766,71	766,71	766,71	766,71	766,71	
6 100,26	6 866,97	7 633,68	8 400,39	9 167,10	9 933,81	10 700,52	

Conclusion

L'analyse financière prévisionnelle menée dans le cadre de ce projet montre des indicateurs très encourageants. Avec un chiffre d'affaires en croissance, une bonne maîtrise des charges, et une rentabilité progressive, notre modèle économique se révèle à la fois solide et réaliste.

En particulier, le résultat net comptable prévisionnel de 7 038 000,44 DA à l'issue de la période étudiée confirme la rentabilité et la viabilité du projet. Ces résultats témoignent du potentiel économique du produit proposé, de la pertinence de notre stratégie de positionnement, ainsi que de l'intérêt croissant du marché pour des soins naturels à base de spiruline.

Ainsi, ce projet représente une opportunité durable, innovante et économiquement attractive dans le secteur cosmétique en Algérie