

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Aboubekr Belkaid-Tlemcen
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sciences de la Terre et de
l'Univers
Département de Biologie



Laboratoire de recherche
« Antibiotiques, Antifongiques : Physico-chimie, Synthèse et Activité
Biologique »



MÉMOIRE

Présenté par

AYAD Ismehen

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

DOMAINE : SNV

FILIÈRE : Sciences biologiques

SPÉCIALITÉ : « Biochimie »

Thème

Caractérisation phytochimique et évaluation du pouvoir
antioxydant des extraits bruts d'*Eucalyptus camaldulensis*

Soutenu publiquement, le **24 juin 2026** Devant le jury :

Présidente	Dr. TABET-HELAL Sana	MCA	Université de Tlemcen
Examinatrice	Dr. MEDJDOUB Houria	MCA	Université de Tlemcen
Encadrante	Dr. ADIDA Houria	MCA	Université de Tlemcen

Année université : 2025-2026

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je remercie tout d'abord mon encadrante, **Dr. ADIDA Houria**. Maître de conférences A au département de Biologie, Faculté SNV-STU, Université de Tlemcen, pour avoir accepté de superviser ce travail. Sa gentillesse, ses conseils constructifs, son intérêt, son dévouement.

Je remercie également **Dr. TABET-HELAL Sana**. Maître de conférences A au département de Biologie, Faculté SNV-STU, Université de Tlemcen, pour avoir accepté de présider le jury.

Je suis également reconnaissant envers **Dr. MEDJDOUB Houria**. Maître de Conférences A au département de Biologie, Faculté SNV-STU, Université de Tlemcen, qui a eu la gentillesse d'accepter d'examiner et de discuter ce travail.

Un grand merci à **Dr. MIMOUN Amira** et à tous les membres du laboratoire Antibiotiques, Antifongiques, Physico-chimiques, Synthèse et Activité biologique de l'Université de Tlemcen pour leur gentillesse et leur aide.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes chers parents pour leur amour, leurs sacrifices, leur soutien moral et matériel ainsi que leurs encouragements constants tout au long de mon parcours universitaire. Je remercie également très chaleureusement mes sœurs et mon frère pour leur affection, leur patience, leur présence à mes côtés et leur soutien indéfectible.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, j'adresse mes plus sincères remerciements.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, le respect et la reconnaissance que je vous porte. Merci pour vos sacrifices, votre soutien inconditionnel, vos encouragements et vos prières qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À mes chères sœurs et à mon cher frère,

Pour leur affection, leur présence, leur soutien et leurs encouragements permanents. Je leur souhaite réussite, bonheur et prospérité dans leur vie.

À tous mes amies qui m'ont soutenu durant mes études

المخلص

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم التركيب الكيميائي النباتي، والنشاط المضاد للأكسدة للمستخلص المائي والهيدروإيثانولي المحضرين من أوراق نبات الأوكالبتوس الأحمر .

تم تحضير المستخلصات بطريقة النقع، ثم أُجري لها التحري الكيميائي النباتي، وتقدير محتوى البوليفينولات الكلية والفلافونويدات، بالإضافة إلى تقييم النشاط المضاد للأكسدة باستعمال اختبار ارجاع الجذر الحر DPPH* واختبار القدرة الاختزالية للحديد. أظهرت النتائج أن المستخلص الهيدروإيثانولي حقق مردود استخلاص أعلى (8.681%) مقارنة بالمستخلص المائي (7.888%) كما كشف التحري الكيميائي النباتي عن وجود التانينات والفلافونويدات والكينونات الحرة والصابونينات في كلا المستخلصين، في حين تم الكشف عن القلويدات والتربينويدات في المستخلص الهيدروإيثانولي فقط. كما أظهرت التحاليل الكمية أن المستخلص الهيدروإيثانولي يحتوي على مستويات أعلى من البوليفينولات الكلية (9574.40 ± 0.007) ميكروغرام مكافئ حمض الغاليك/غرام من المستخلص الجاف والفلافونويدات (358.12 ± 0.007) ميكروغرام مكافئ الكيرسيتين/ملغ من المستخلص الجاف مقارنة بالمستخلص المائي .

بيّنت اختبارات النشاط المضاد للأكسدة أن كلا المستخلصين يمتلك قدرة معتبرة على اقتناص الجذور الحرة واختزال أيونات الحديد. وقد أظهر المستخلص الهيدروإيثانولي نشاطاً معتبراً مضاداً للأكسدة ، حيث بلغت قيمة IC_{50} له 0.995 ملغ/مل، مقابل 1.37 ملغ/مل للمستخلص المائي. أما فيما يتعلق بالقدرة الاختزالية للحديد، فقد أظهر المستخلصان نشاطاً متقارباً، بقيم EC_{50} بلغت 0.47 ملغ/مل و 0.42 ملغ/مل على التوالي. تُظهر هذه النتائج أن أوراق الأوكالبتوس الأحمر تُعد مصدراً طبيعياً واعداداً للمركبات الحيوية الفعالة ذات الخصائص المضادة للأكسدة، مما يبرز إمكاناتها التطبيقية في المجالات الصيدلانية والغذائية ومستحضرات التجميل

الكلمات المفتاحية: الأوكالبتوس الأحمر ، البوليفينولات، النشاط المضاد للأكسدة ، المستخلص الهيدروإيثانولي .

Résumé

L'objectif de ce travail était d'étudier la composition phytochimique, la teneur en composés phénoliques et l'activité antioxydante des extraits aqueux et hydroéthanoliques des feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis*. Les extraits ont été obtenus par macération, puis soumis à un criblage phytochimique, au dosage des polyphénols totaux et des flavonoïdes, ainsi qu'à l'évaluation de leur activité antioxydante par les méthodes du piégeage du radical libre DPPH et du pouvoir réducteur du fer.

Les résultats ont montré que l'extrait hydroéthanolique présente un rendement d'extraction plus élevé (8,681 %) que l'extrait aqueux (7,888 %). L'analyse phytochimique a révélé la présence de plusieurs métabolites secondaires, notamment les tanins, flavonoïdes, quinones libres et saponines dans les deux extraits, tandis que les alcaloïdes et les terpénoïdes n'ont été détectés que dans l'extrait hydroéthanolique. Les dosages ont indiqué que l'extrait hydroéthanolique est plus riche en polyphénols totaux ($9574,40 \pm 0,007 \mu\text{g EAG/g ES}$) et en flavonoïdes ($358,12 \pm 0,007 \mu\text{g EQC/g ES}$) que l'extrait aqueux ($5762,53 \pm 0,025 \mu\text{g EAG/g ES}$ et $208,125 \pm 0,006 \mu\text{g EQC/g ES}$).

L'évaluation de l'activité antioxydante a montré que les deux extraits possèdent une capacité importante à neutraliser les radicaux libres et à réduire les ions ferriques. L'extrait hydroéthanolique a présenté la meilleure activité antioxydante avec une valeur d' IC_{50} de 0,995 mg/mL contre 1,37 mg/mL pour l'extrait aqueux. Concernant le pouvoir réducteur du fer, les deux extraits ont montré des activités comparables avec des valeurs d' EC_{50} de 0,47 mg/mL et 0,42 mg/mL respectivement.

Ces résultats mettent en évidence le potentiel antioxydant important des feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis*, attribué principalement à leur richesse en composés phénoliques et flavonoïdiques. Cette espèce constitue ainsi une source naturelle prometteuse de substances bioactives susceptibles d'être valorisées dans les domaines pharmaceutique, alimentaire et cosmétique.

Mots-clés : *Eucalyptus camaldulensis*, composés phénoliques, activité antioxydante, extrait aqueux, extrait hydroéthanolique.

Abstract

The present study aimed to evaluate the phytochemical composition, phenolic compound content, and antioxidant activity of aqueous and hydroethanolic extracts obtained from the leaves of *Eucalyptus camaldulensis*. The extracts were prepared by maceration and subjected to phytochemical screening, determination of total polyphenol and flavonoid contents, and assessment of antioxidant activity using the DPPH free radical scavenging assay and ferric reducing power test.

The results showed that the hydroethanolic extract exhibited a higher extraction yield (8.681%) compared with the aqueous extract (7.888%). Phytochemical screening revealed the presence of tannins, flavonoids, free quinones, and saponins in both extracts, whereas alkaloids and terpenoids were detected only in the hydroethanolic extract. Quantitative analysis demonstrated that the hydroethanolic extract contained higher levels of total polyphenols ($9574,40 \pm 0,007 \mu\text{g GAE/g DE}$) and flavonoids ($358,12 \pm 0,007 \mu\text{g QE/g DE}$) than the aqueous extract.

Antioxidant activity assays indicated that both extracts possess significant free radical scavenging and ferric reducing capacities. The hydroethanolic extract exhibited stronger antioxidant activity with an IC_{50} value of 0.995 mg/mL, compared to 1.37 mg/mL for the aqueous extract. Regarding ferric reducing power, both extracts showed comparable activities, with EC_{50} values of 0.47 mg/mL and 0.42 mg/mL, respectively.

These findings demonstrate that *Eucalyptus camaldulensis* leaves are a promising natural source of bioactive compounds with remarkable antioxidant properties, highlighting their potential applications in pharmaceutical, food, and cosmetic industries.

Keywords: *Eucalyptus camaldulensis*, polyphenols, antioxidant activity, aqueous extract, hydroethanolic extract.

Table des matières

DÉDICACE.....	III
المخلص	IV
Résumé	V
Abstract	VI
Table des matières	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des figures	X
Liste des abréviations.....	XII
1. Généralité	4
1.1. Le stress oxydatif.....	4
1.2. Les radicaux libres (RLs).....	4
1.3. Les espèces réactives de l’oxygène (ERO).....	5
1.4. Sources des radicaux libres	7
1. Les antioxydants.....	9
1.1. Les types d’antioxydants	9
1.1.1. Les antioxydants enzymatiques	9
1.1.2. Les antioxydants non enzymatiques	10
1. Généralité	12
2. Classification des métabolites secondaires	13
2.1. Les composés phénoliques	13
2.1.1. Les flavonoïdes	13
2.1.2. Les tanins	14
2.1.3 Les coumarines.	16
2.1.4 Les quinones.....	15
2. 3. Les alcaloïdes	16
2.4. Les terpénoïdes	17
2.5. Les saponosides	18
3. L’importance des métabolites secondaire dans la lutte contre le stress oxydatif.....	19
1. Historique et origine de l’Eucalyptus.....	20
2. Classification botanique :.....	20

3. Description botanique.....	21
4. L'utilisation traditionnelle de la plante.....	21
Partie 02 : Matériel et méthodes	23
1. Préparation des extraits.....	24
1.1. Matériel végétal.....	24
2. Calcul du rendement	26
3. Les tests phytochimiques	26
4. Dosage des polyphénols.....	28
5. Dosage des flavonoïdes	29
6. Évaluation de l'activité antioxydante.....	30
6.1. Piégeage du radical libre DPPH [•] - (2,2-diphényle-1-picrylhydrazyl):.....	30
6.1.1. Calcul des IC ₅₀	32
6.2. Réduction du fer par la méthode FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power).....	32
6.2.1. Calcul d'EC ₅₀	33
Partie 03 : Résultats et interprétations	34
1. Analyse phytochimique	35
1.1. Rendement des extraits d' <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	35
1.2. Criblage phytochimique.....	35
1.3. Teneur en polyphénols totaux et flavonoïdes	36
2. L'activité antioxydante	38
2.1. Piégeage du radical libre DPPH [•]	38
2.2. Pouvoir réducteur du fer	41
Partie 04 : Discussion	44
Discussion	45
Conclusion	50
Références Bibliographiques	51

Liste des tableaux

Tableau 1: Principaux radicaux libres et leur structure chimique.....	4
Tableau 2: Classification des espèces réactives de l'oxygène et de l'azote (ROS / RNS).	6
Tableau 3: Rendements, et caractéristiques des extraits d' <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	35
Tableau 4: Résultats des tests phytochimiques effectués sur les deux extraits : aqueux et hydroéthanolique de la plante <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	36
Tableau 5: Dosage des polyphénols totaux et flavonoïdes des extraits d' <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	38
Tableau 6: Les valeurs d'IC ₅₀ des deux extraits avec la molécule de référence (Acide ascorbique).	40
Tableau 7: Les valeurs d'EC ₅₀ des extraits d' <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	43

Liste des figures

Figure 1: Origine extra- et intracellulaire des radicaux libres dérivés de l'oxygène.	8
Figure 2: Classification des antioxydants	9
Figure 3: Origine biogénétique des métabolites secondaires des plantes.	12
Figure 4: Classification et illustrations des composés polyphénoliques	13
Figure 5: Structures chimiques des composés flavonoïdes	14
Figure 6: Structure des tannins hydrolysable (cas d'acide gallique).	14
Figure 7: Structure des tanins condensés (cas de tanins condensés à base de flavan-3-ols).	15
Figure 8: Les structure et schéma de numérotation de la coumarine	17
Figure 9: Structure chimique de la benzoquinone (a), de la naphtoquinone (b) et de l'anthraquinone (c).	16
Figure 10: Les structures stéréochimiques des alcaloïdes Structure chimique de la benzoquinone (a), de la naphtoquinone (b) et de l'anthraquinone (c).	16
Figure 11: Schéma général de la biosynthèse des terpénoïdes.	18
Figure 12: Structures chimiques de différents types de sapogénines et de saponines triterpénoïdes	19
Figure 13: Origine des <i>Eucalyptus</i>	20
Figure 14: <i>Eucalyptus camaldulensis</i> .	21
Figure 15: Protocole de préparation de l'extraits aqueux	25
Figure 16: Protocole de préparation de l'extrait hydroéthanolique*	26
Figure 17: Protocole utilisé pour le dosage des polyphénols totaux	29
Figure 18: Protocole utilisé pour le dosage des flavonoïdes	30
Figure 19: Protocole suivi pour l'évaluation de l'activité anti-radicalaire du DPPH*.	31
Figure 20: Protocole suivi pour l'évaluation de l'activité antioxydante par la méthode FRAP	32
Figure 21: Courbe d'étalonnage de l'acide gallique pour le dosage des polyphénols totaux	37
Figure 22: Courbe d'étalonnage de la catéchine pour le dosage des flavonoïdes	37

Figure 23:Pourcentage d'inhibition du radical DPPH• en fonction de différentes concentrations de l'extrait hydroéthanolique d' <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	39
Figure 24:Pourcentage d'inhibition du radical DPPH• en fonction de différentes concentrations de l'extrait aqueux d' <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	39
Figure 25:Pourcentage d'inhibition du radical DPPH• en fonction de différentes concentrations de l'acide ascorbique.	40
Figure 26:Pouvoir de réduction de fer par l'extrait aqueux d' <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	41
Figure 27:Pouvoir de réduction de fer par l'extrait hydroéthanolique d' <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	42
Figure 28:Pouvoir de réduction de fer par l'acide ascorbique.	42

Liste des abréviations

AG : Acide gallique

AKT : Protéine kinase B

CAT : Catalase

CO₂ : Dioxyde de carbone

CTE : Chaîne de transport des électrons

DPPH[•] : 2,2-Diphényl-1-picrylhydrazyle

EC₅₀ : Concentration efficace à 50 %

EAG : Équivalent Acide Gallique

EQC : Équivalent Catéchine

ERO : Espèces Réactives de l'Oxygène

ES : Extrait Sec

EFS : Extraction par fluide supercritique

ERO : Espèces réactives de l'oxygène

ERN : Espèces réactives de l'azote

FS : Fluide supercritique

GPx : Glutathion peroxydase

GSH : Glutathion réduit

GC-MS : Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse

H₂O₂ : Peroxyde d'hydrogène

HOCl : Acide hypochloreux

IC₅₀ : Concentration nécessaire pour inhiber 50 % des radicaux libres

MAPK : Mitogen-Activated Protein Kinase

MP : Métabolites primaires

MS : Métabolites secondaires

NADPH : Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate réduit

NF- κ B : Nuclear Factor kappa B

NOX : NADPH oxydase

•NO : Oxyde nitrique

O₂ : Dioxygène

O₂•⁻ : Anion superoxyde

•OH : Radical hydroxyle

ONOO• : Peroxynitrite

PI3K : Phosphoinositide 3-kinase

RLs : Radicaux libres

scCO₂ : Dioxyde de carbone supercritique

SO : Stress oxydatif

SOD : Superoxyde dismutase

ROO• : Radical peroxyde

RO• : Radical alkoxyde

XO : Xanthine oxydase

µg EAG/g ES : Microgramme équivalent d'acide gallique par gramme d'extrait sec

µg EQC/g ES : Microgramme équivalent de catéchine par gramme d'extrait sec

Introduction générale

Depuis toujours, les végétaux ont eu une importance capitale, non seulement en tant qu'apport de nutriments essentiels, mais aussi comme médecines traditionnelles pour soigner une variété de problèmes de santé. Cette coutume est largement documentée dans les écrits des civilisations arabes, chinoises, égyptiennes, hindoues, grecques et romaines anciennes (**Kamatou et al., 2017**).

L'OMS (Organisation mondiale de la santé) indique l'importance des remèdes à base de plantes, particulièrement dans les zones du monde où l'accès aux soins médicaux modernisés est restreint. Effectivement, ces végétaux proposent des remèdes fréquemment plus accessibles et économiques pour les communautés vulnérables et les nations en voie de développement (**OMS, 2013**).

De plus, l'attention portée aux plantes médicinales dépasse leur utilisation traditionnelle. Plusieurs recherches ont démontré que ces plantes sont une source primordiale de composés bioactifs, en particulier les polyphénols, les flavonoïdes et les tanins, réputés pour leurs effets antioxydants. Ces métabolites secondaires ont la capacité de neutraliser les espèces réactives de l'oxygène, contribuant ainsi à diminuer les dommages oxydatifs au sein des cellules. Ces caractéristiques biologiques des plantes médicinales attirent de plus en plus l'attention pour la prévention et la gestion de plusieurs maladies associées au stress oxydatif (**Shahidi & Ambigaipalan, 2015 ; Wink, 2015**).

Plusieurs recherches scientifiques ont établi que le stress oxydatif constitue un facteur clé dans l'apparition de diverses maladies humaines (**Gutteridge, 1993**). Ce stress oxydatif se définit par la faillibilité de l'organisme à se défendre contre les agressions des radicaux libres, dues soit à une surproduction des espèces réactives de l'oxygène, soit à une réduction de la capacité antioxydante de l'organisme (**Sies, 1991**).

L'agression des radicaux libres sur diverses biomolécules, y compris les protéines, les lipides et l'ADN, engendre des dommages oxydatifs qui provoquent la détérioration et l'apoptose des cellules (**Pan et al., 2008**). Ces lésions peuvent entraîner diverses pathologies, comme le vieillissement, le cancer, l'athérosclérose, le diabète, l'asthme et la rhinite (**Eberhardt et al., 2000 ; Finkel et Holbrook, 2000**).

Face à ces conséquences négatives, les antioxydants contribuent de manière cruciale à la défense des cellules contre les atteintes oxydatives. Même si l'organisme dispose de mécanismes de défense enzymatiques et non enzymatiques, ceux-ci peuvent se révéler inadéquats face à une production massive de radicaux libres. Ainsi, on assiste à un intérêt grandissant pour les composés naturels d'origine végétale, grâce à leur forte concentration en

métabolites secondaires bioactifs. Ces derniers sont reconnus pour leur importante capacité antioxydante (**Panche et al., 2016 ; Shahidi & Ambigaipalan, 2015**).

Dans ce contexte, notre étude vise à évaluer l'activité antioxydante de deux extraits d'*Eucalyptus camaldulensis*, aqueux et hydroéthanoliques, obtenus par macération.

Le document se décompose en deux sections : la première est une partie bibliographique détaillé de divers aspects du sujet, tandis que la seconde se concentre sur l'expérimentation, englobant les outils et les méthodes employées dans cette recherche.

Par la suite, nous présenterons les résultats que nous avons obtenus, accompagnés de leurs interprétations, avant de conclure avec une discussion générale.

Pour conclure, un récapitulatif de l'étude sera proposé, soulignant les résultats significatifs et suggérant des pistes pour d'éventuelles recherches ultérieures dans ce domaine.

Partie 01 : Synthèse bibliographique

1. Généralité

L'oxygène joue le rôle d'accepteur final des électrons libérés durant différents processus cataboliques au sein de l'organisme, notamment dans la chaîne respiratoire. Des perturbations dans le métabolisme de l'oxygène entraînent une surproduction d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) ou de radicaux libres. Ces catégories engendrent des dommages oxydatifs sur les macromolécules biologiques (ADN, lipides et protéines), susceptibles d'engendrer un stress oxydatif qui contribue à diverses pathologies. Les antioxydants ont pour rôle de freiner l'oxydation provoquée par les espèces réactives de l'oxygène (**Gardès-Albert et al., 2023**).

1.1. Le stress oxydatif

Le stress oxydatif (SO) résulte d'un déséquilibre entre la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) et le système de défense antioxydant, ce qui provoque une concentration excessive d'ERO et des lésions oxydatives sur les éléments cellulaires tels que les lipides, les protéines et l'ADN (**Liu et al., 2025**). Même si les ERO jouent un rôle crucial dans les fonctions biologiques fondamentales, leur production permanente peut mener à une balance instable (**Muscolo et al., 2024**).

1.2. Les radicaux libres (RLs)

On définit un radical libre comme un atome ou une molécule qui possède un ou plusieurs électrons non appariés. Ce radical est doté d'un électron non apparié, ce qui lui confère une instabilité et une réactivité, bien que cette dernière puisse varier considérablement. La démonstration de la génération de radicaux libres par les êtres vivants a été réalisée pour la première fois en 1954 et est désormais largement acceptée (**Powers et al., 2011**) (**Tableau 1**).

Tableau 1: Principaux radicaux libres et leur structure chimique (**Baghli & Iles, 2024**)

Radicaux libres	Structure chimique
Radicaux hydroxyle	$\text{OH} \cdot$
Radicaux hydroperoxyde	$\text{HOO} \cdot$
Radicaux peroxyde	$\text{ROO} \cdot$
Radicaux alkoyle	$\text{RO} \cdot$
Peroxynitrite	$\text{ONOO} \cdot$
Anion superoxyde	$\text{O}_2^{\cdot -}$

1.3. Les espèces réactives de l'oxygène (ERO)

Les espèces réactives de l'oxygène, sont des molécules hautement réactives produites par la réduction partielle de l'oxygène. On les divise essentiellement en deux catégories basées sur leur configuration électronique : les ERO radicalaires, qui ont un ou plusieurs électrons célibataires, à l'image de l'anion superoxyde ($\text{O}_2^{\bullet-}$) et du radical hydroxyle ($\text{OH}^\bullet$), et les ERO non radicalaires, qui n'en possèdent pas, comme le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et l'acide hypochloreux (HOCl). Il est essentiel de souligner que la définition d'un radical libre comprend également les espèces réactives de l'azote (ERN), comme par exemple, l'oxyde nitrique ($\text{NO}^\bullet$) **(Ren et al., 2026)**.

Une production excessive d'ERO, fréquente dans ces conditions, entraîne des dommages oxydatifs, affectant l'organisme et les agents pathogènes **(Muscolo et al., 2024)**. La génération d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) a lieu dans des milieux où la demande en énergie est importante, exigeant un métabolisme robuste. La double caractéristique des ERO, engendrant des effets à la fois pathologiques et bénéfiques, liés à l'autodécomposition et au système immunitaire, est associées aux besoins énergétiques intrinsèques à ces processus **(Muscolo et al., 2024)**.

L'anion superoxyde ($\text{O}_2^{\bullet-}$), le radical hydroxyle ($\text{OH}^\bullet$) ainsi que le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) constituent les principales espèces réactives de l'oxygène (ERO). La principale source de ces espèces est la chaîne de transport des électrons (CTE), localisée dans les mitochondries. **(Gao et al., 2025) (Tableau 2)**.

Tableau 2:Classification des espèces réactives de l'oxygène et de l'azote (ROS / RNS) (Anwar et al., 2026).

Type	Espèce	Formule chimique	Source principale	Rôle biologique
Radical	Superoxyde	$O_2^{\bullet-}$	Écoulement de la chaîne de transfert d'électrons mitochondriale ; oxydases du NADPH (NOX) ; cellules immunitaires stimulées.	Une molécule de signalisation qui régule plusieurs processus biologiques (comme l'apoptose, le vieillissement et la sénescence) et qui est associée à différentes maladies.
	Radical hydroxyle	$\bullet OH$	Réactions multiples incluant la réaction de Haber-Weiss et la réaction de Fenton	Peut diminuer les ponts disulfures des protéines (par exemple : fibrinogène), entraînant leur dénaturation et des conformations anormales.
	Radical peroxyde	$ROO\bullet$	Formé à travers des interactions radicalaires avec des composants biologiques tels que les lipides et les bases nucléiques.	L'oxyde affecte les éléments cellulaires, des intermédiaires qui jouent un rôle dans la toxicité et la cancérogenèse.
	Peroxyde d'hydrogène	H_2O_2	Principalement produit par les	Deuxième messenger dans la signalisation de l'insuline

Non radical			oxydases NADPH ou le complexe III de la chaîne respiratoire mitochondriale.	ainsi que dans d'autres voies (prolifération, différenciation, réparation des tissus, inflammation, rythme circadien, vieillissement).
	Acide hypochloreux	HOCl	Élaboré par la myéloperoxydase : oxydation du Cl^- par le H_2O_2 .	Impliqué dans diverses affections ; possède une action antimicrobienne ; chlorination des restes de tyrosine.
	Ozone	O_3	Produit par les neutrophiles, formé à partir de l'oxygène singulet ($^1\text{O}_2$) via des anticorps ou des acides aminés.	Interaction avec les tissus pulmonaires ; oxydation des biomolécules ; effets potentiels sur les dommages hépatiques.

1.4. Sources des radicaux libres

a. Sources endogènes :

En conditions physiologiques, les principales sources d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) à l'intérieur des cellules incluent la chaîne de transport d'électrons mitochondriale, les NADPH oxydases (NOX), la xanthine oxydase et différentes oxydoréductases des réticulums endoplasmique et des peroxysomes (**Lastra et al., 2026**). L'emplacement subcellulaire de ces sources et la composition chimique des espèces générées confèrent une particularité à la signalisation redox, en particulier par l'oxydation réversible de cystéines sensibles sur les protéines cibles. Grâce à sa stabilité relative et sa capacité de diffusion, le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) est identifié comme un messager secondaire essentiel capable de réguler des voies de signalisation telles que MAPK, PI3K/AKT et NF- κ B.

b. Sources exogènes :

Les radiations, les traitements contre le cancer, le tabagisme, la consommation d'alcool et certains médicaments sont des exemples de sources exogènes d'ERO. La consommation de

viande fumée et la prise de médicaments contenant des métaux (ciclosporine, bléomycine, gentamicine, etc.) constituent également des sources exogènes d'ERO (Jomova et al., 2023) (Figure 1).

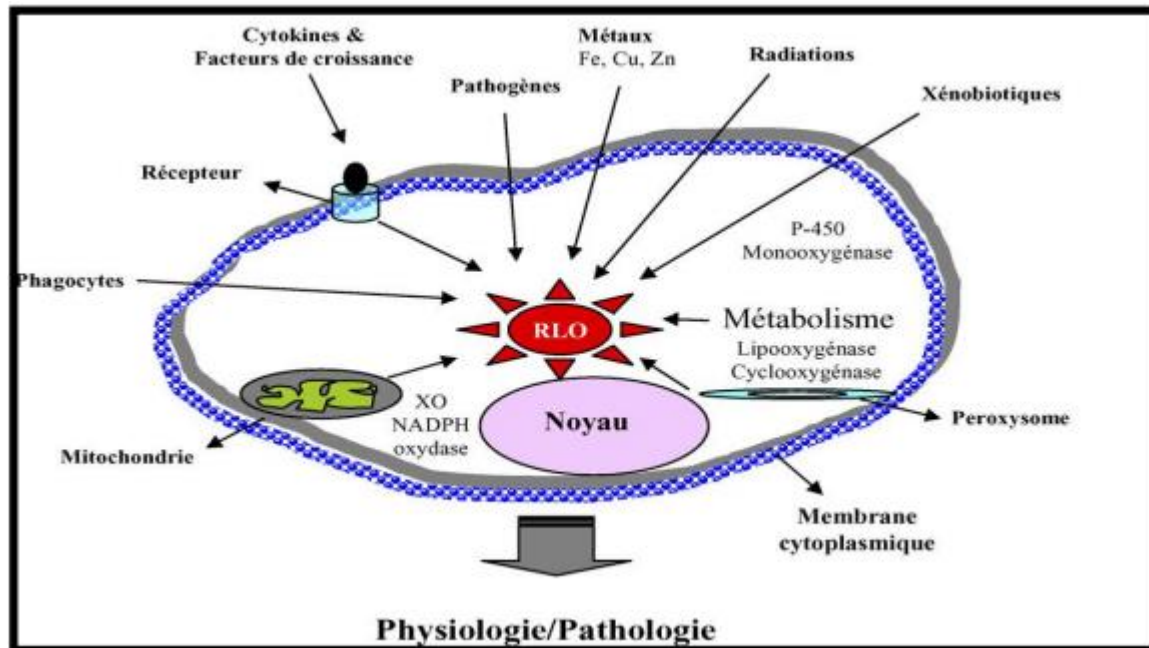


Figure 1: Origine extra- et intracellulaire des radicaux libres dérivés de l'oxygène.

XO : xanthine oxydase ; P-450 : cytochrome P-450 (Kheroua, 2015).

1. Les antioxydants

Les antioxydants sont des substances qui défendent les cellules contre les dégâts provoqués par des molécules réactives comme les radicaux libres. Ils peuvent, même à des concentrations minimales, freiner, gérer ou éviter les réactions d'oxydation, ce qui contribue à maintenir la qualité des aliments et pourrait diminuer l'émergence et l'évolution des maladies dégénératives. Ils jouent un rôle crucial à la fois dans les systèmes biologiques et dans la préservation des aliments, car ils contrebalancent le stress oxydatif et les impacts néfastes des espèces réactives de l'oxygène (ERO) (Gulcin, 2025).

1.1. Les types d'antioxydants

Les antioxydants peuvent être classés en deux grandes catégories : les antioxydants enzymatiques et les antioxydants non-enzymatiques (Figure 2).

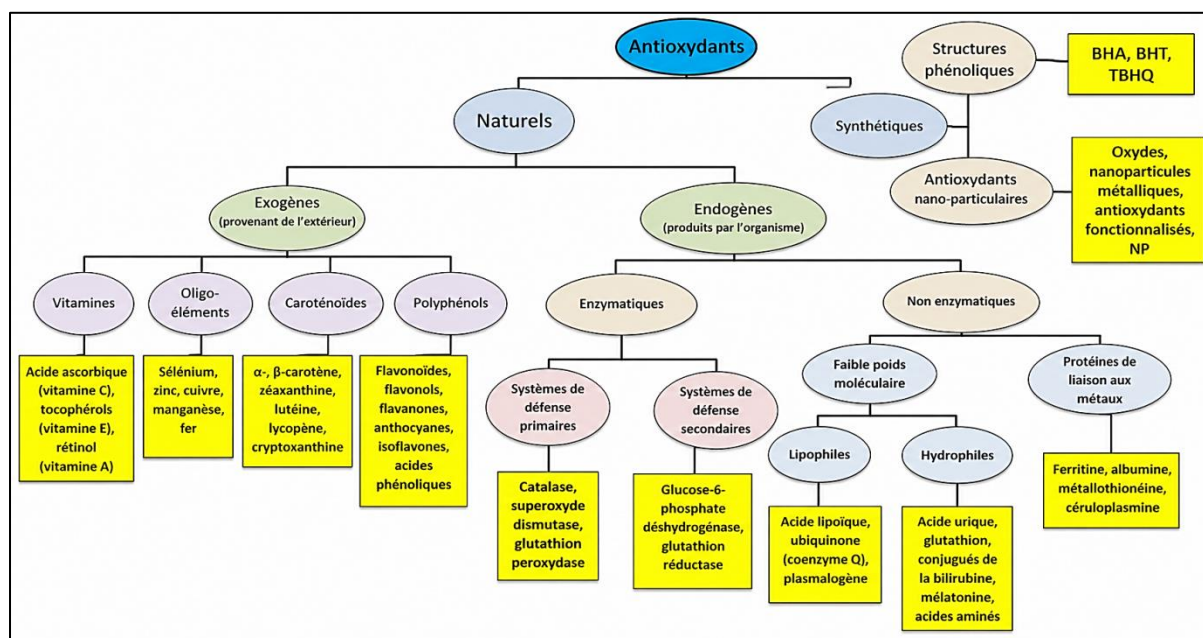


Figure 2: Classification des antioxydants (Flieger et al., 2021).

1.1.1. Les antioxydants enzymatiques

Le premier niveau de défense est le plus efficace et utilise des enzymes antioxydantes telles que la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT) et la glutathion peroxydase (GPx) (Jomova et al., 2024).

a. La catalase

Est une enzyme clé qui décompose le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), un composé toxique issu du métabolisme. Elle protège les biomolécules et maintient l'équilibre redox en limitant le stress oxydatif. Présente chez la plupart des organismes aérobies, elle joue un rôle essentiel dans la détoxification (Alhumaydhi et al., 2025).

b. La superoxyde dismutase (SOD)

Est une enzyme antioxydante majeure, constituant la première ligne de défense contre les oxydants. Présente chez les organismes aérobies, elle convertit les radicaux superoxyde (O_2^-) en peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et en oxygène (O_2) (Jomova et al., 2024).

c. La glutathion peroxydase

Est une enzyme séléno-dépendante qui réduit le peroxyde d'hydrogène et les peroxydes lipidiques en utilisant le glutathion (GSH) comme donneur d'électrons (Krishnamurthy et al., 2024).

1.1.2. Les antioxydants non enzymatiques

Les antioxydants non enzymatiques sont essentiels pour défendre le corps contre les dommages causés par les radicaux libres et les espèces réactives de l'oxygène (ERO), qui peuvent être impliqués dans des pathologies chroniques comme les maladies cardiovasculaires, le diabète, le cancer et l'arthrite (Gulcin, 2025).

a. Vitamine A

Également appelée rétinol, la vitamine A est une vitamine liposoluble indispensable qui contribue de manière cruciale au maintien des fonctions physiologiques normales du corps. Elle contribue de manière significative au maintien des fonctions oculaires normales, notamment en stimulant le développement de l'épithélium cornéen et conjonctival, la survie des cellules de l'épithélium pigmentaire rétinien et la phototransduction rétinienne (Zhang et al., 2025).

b. La vitamine E

Fait référence à un groupe de huit tocophérols et tocotriénols associés, qui sont des vitamines solubles dans les graisses avec des caractéristiques antioxydantes. L' α -tocophérol est le plus examiné parmi ces derniers, grâce à sa biodisponibilité supérieure : le corps humain le préfère pour son absorption et son métabolisme. D'après les chercheurs l' α -tocophérol est le principal antioxydant liposoluble qu'il préserve les membranes de l'oxydation en interagissant avec les radicaux lipidiques générés lors de la peroxydation des lipides (Lobo et al., 2010).

c. La vitamine C

Il s'agit d'un petit glucide hydrosoluble ; toutefois, ses caractéristiques chimiques distinctes lui donnent un rôle spécifique en tant qu'agent réducteur dans les organismes vivants. Pour presque toutes les espèces, l'acide ascorbique – la forme réduite de la vitamine C – est produit naturellement à partir du glucose à travers une séquence de réactions enzymatiques (Lykkes feldt & Carr, 2024).

d. Le β -carotène

Le β -carotène, aussi connu sous le nom de carotène ou provitamine A, est un pigment naturel que l'on trouve dans les végétaux, les champignons et les algues, et a une odeur subtile. Ainsi, son utilisation permet d'éliminer de manière efficace les espèces réactives de l'oxygène et les radicaux libres (Tong et al., 2024).

e. Les polyphénols

Les polyphénols sont des métabolites secondaires produits par les plantes et présentent une grande diversité de structures. Ils existent sous différentes formes, telles que les glycosides, les aglycones ou les formes conjuguées, ce qui peut influencer leur solubilité et leur biodisponibilité. Ils se caractérisent par la présence d'un ou plusieurs cycles benzéniques (aromatiques) portant des groupements hydroxyle ($-\text{OH}$). L'activité antioxydante des polyphénols est principalement attribuée à la présence de leurs groupements hydroxyle, capables de céder des atomes d'hydrogène pour neutraliser les radicaux libres, ainsi qu'à leurs structures aromatiques conjuguées, qui permettent la stabilisation des radicaux phénoxyles (Bas, 2026).

1. Généralité

Le métabolisme représente la totalité des réactions chimiques qui ont lieu dans les cellules des êtres vivants afin de fournir l'énergie requise pour des processus essentiels comme la croissance, le développement, la reproduction, l'adaptation à l'environnement et la création de nouvelles substances organiques. Les métabolites provenant des plantes, couramment employés dans les produits agricoles, médicaux et pharmaceutiques, se répartissent en deux grandes classes : les métabolites primaires (MP), et les métabolites secondaires (MS) (Elshafie et al., 2023).

Les composés naturels appelés métabolites secondaires ont une importance primordiale dans le règne végétal. Sont classés en trois groupes selon leur structure chimique et leurs méthodes de synthèse : les composés phénoliques (les flavonoïdes, les acides phénoliques, les coumarines et les tanins), les terpénoïdes (monoterpènes, des sesquiterpènes, des diterpènes et des triterpènes) et les composés azotés (les alcaloïdes, les cyanosides, les glucosinolates et les acides aminés non protéiques) (Tang et al., 2024) (Figure 3).

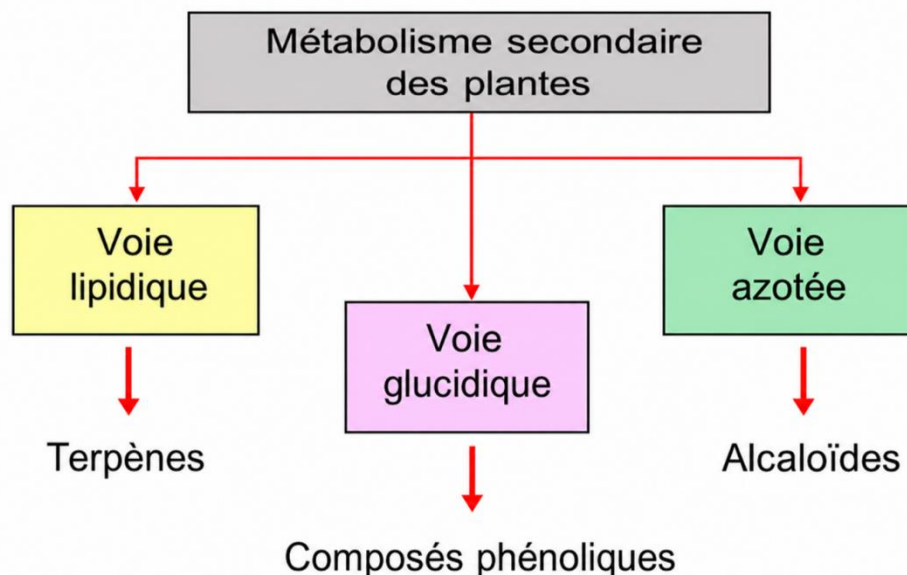


Figure 3: Origine biogénétique des métabolites secondaires des plantes (Palazon & Alcalde, 2025).

2. Classification des métabolites secondaires

2.1. Les composés phénoliques

Ces métabolites secondaires que l'on trouve partout dans les plantes, sont identifiés comme des composés bioactifs cruciaux ayant d'importantes répercussions pour la santé humaine. Les polyphénols d'origine végétale interagissent de manière directe ou indirecte avec des biomolécules qui peuvent influencer différentes voies physiologiques. Les polyphénols, grâce à leur profusion et leur variété structurelle, génèrent un grand intérêt parmi les communautés scientifiques et cliniques (Saini et al., 2024).

Les composés phénoliques se répartissent en trois catégories : les phénols simples, les biphénols et les polyphénols. Parmi eux, on distingue principalement les acides phénoliques (acide benzoïque, cinnamique et phénylacétique), les coumarines, les stilbènes, ainsi que les tanins (condensés, hydrolysables et complexes) et les lignanes (Saini et al., 2024) (Figure 4).

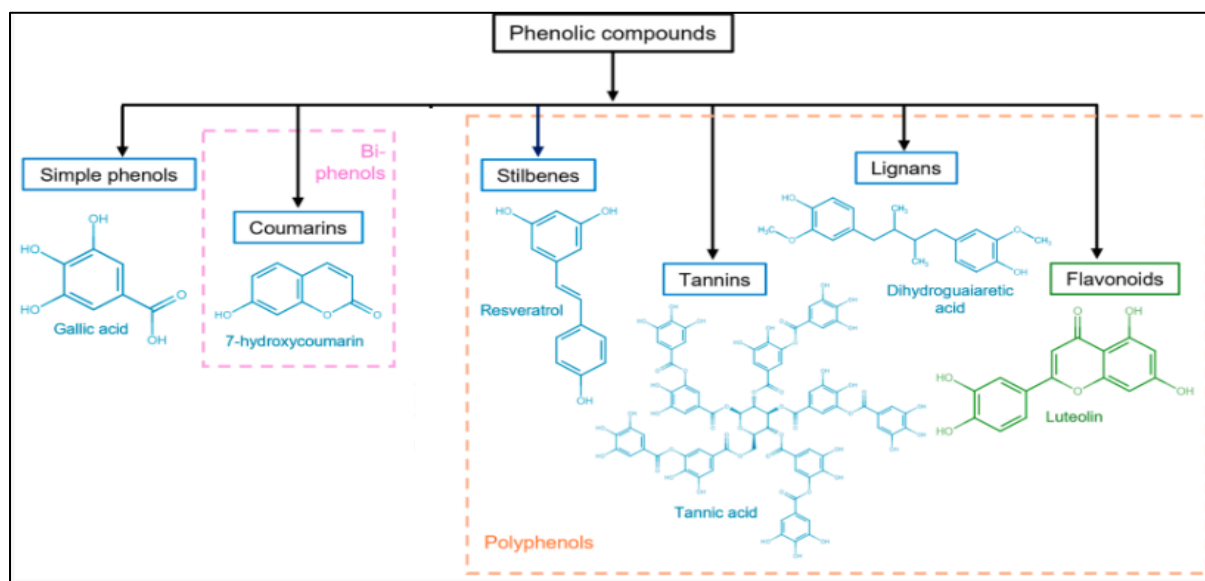


Figure 4: Classification et illustrations des composés polyphénoliques (Saini et al., 2024)

2.1.1. Les flavonoïdes

Les flavonoïdes, qui constituent une catégorie significative de métabolites secondaires, se trouvent en abondance dans les fruits, légumes, herbes, tiges, céréales, noix ainsi que dans les fleurs et graines. Plus de 10 000 composés flavonoïdes ont été extraits et reconnus jusqu'à présent. Les flavonoïdes, associés à une multitude d'effets positifs sur la santé, sont un élément essentiel de diverses applications dans les domaines pharmaceutiques, médicaux et cosmétiques (Chen et al., 2023) (Figure 5).

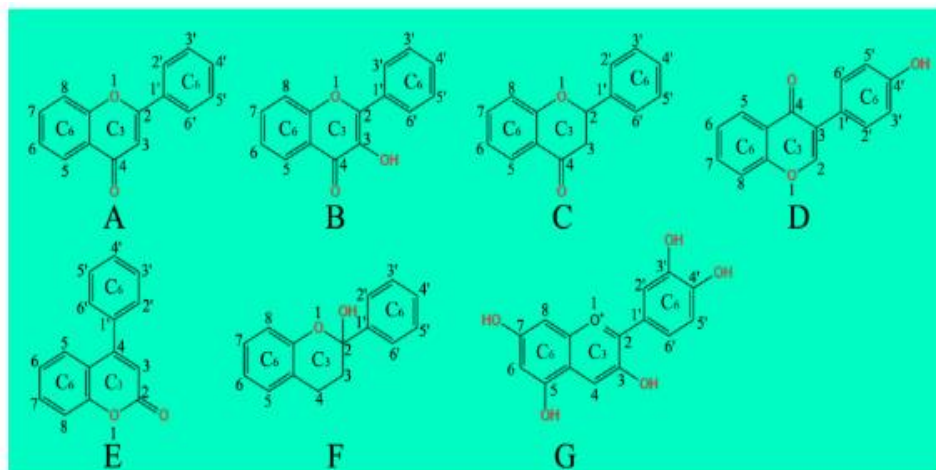


Figure 5: Structures chimiques des composés flavonoïdes. (A) Flavones ; (B) Flavonols ; (C) Flavanones ; (D) Isoflavonoïdes ; (E) Néoflavonoïdes ; (F) Flavanols ; (G) Anthocyanes (Zhuang et al., 2023).

2.1.2. Les tanins

Les composés phénoliques, notamment les tannins, sont présents en abondance chez les plantes à fleurs, les conifères (tannins condensés) et les dicotylédones (tannins hydrolysables). Ils sont à même de s'associer et d'entraîner la précipitation des protéines, une interaction dont la vigueur diffère selon les affinités entre les tannins et les diverses protéines (Harborne, 1997).

Les tanins hydrolysables : Un ensemble varié de polyphénols d'origine végétale, englobent les ellagitannins, les gallotanins et différentes sortes de tannins complexes. Ils se distinguent par leur structure complexe, leur masse moléculaire élevée et leurs multiples actions bioactives (Mihaylova et al., 2025) (Figure 6).

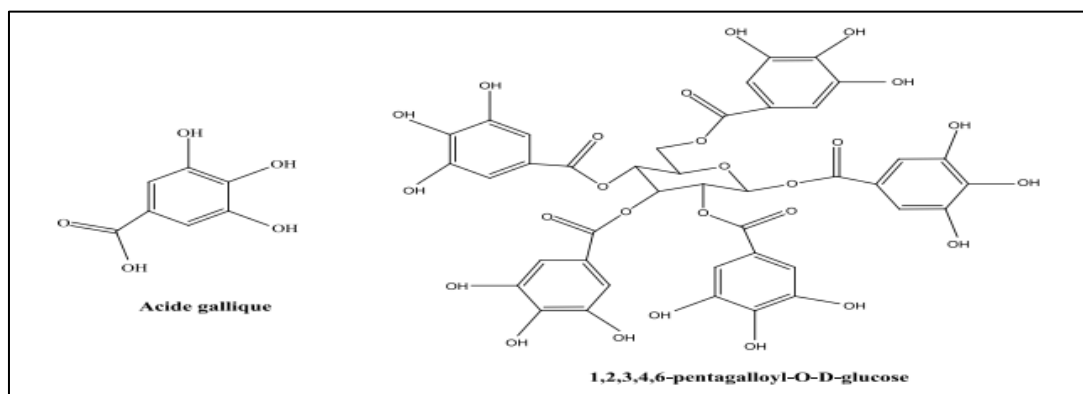


Figure 6: Structure des tannins hydrolysable (cas d'acide gallique) (Brihmat & Djouablia, 2019).

Les tanins condensés (proanthocyanidines): les proanthocyanidines (PA) sont des oligomères ou des polymères constitués d'unités de flavan-3-ol. Depuis l'Antiquité, on utilise ces substances comme médicaments ou agents de tannage. Leur composition chimique et leur synthèse ont fait l'objet d'études pendant de nombreuses années. Les PA, composés phénoliques végétaux parmi les plus courants, sont produits par les voies de biosynthèse des phénylpropanoïdes et des flavonoïdes, et se retrouvent en abondance dans le règne végétal (**He et al ., 2008**). Sont jugés indésirables sur le plan nutritionnel, car ils provoquent la précipitation des protéines, entravent l'action des enzymes digestives et peuvent perturber l'assimilation des vitamines et minéraux (**Amarowicz & Pegg, 2024**) (**Figure 7**).

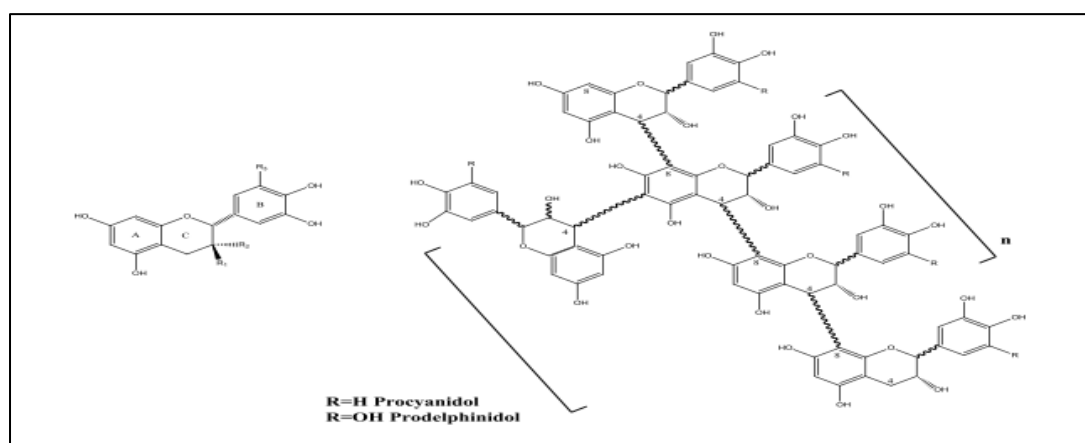


Figure 7: Structure des tanins condensés (cas de tanins condensés à base de flavan-3-ols) (**Brihmat & Djouablia, 2019**).

2.1.3. Les coumarines

Sont des composés naturels dotés d'une structure bicyclique dérivée de l'acide ortho-hydroxycinnamique. Dans le règne végétal, elles sont habituellement produites à partir de précurseurs phénoliques et contribuent au mécanisme de défense de l'organisme. La vaste présence des coumarines dans le règne végétal, combinée à leur diversité structurale exceptionnelle, a fait d'elles un sujet de recherche majeur dans le domaine des produits naturels. Ce squelette moléculaire a stimulé la création d'une multitude de dérivés fonctionnels, dont un grand nombre possède un potentiel thérapeutique notable (**Mustafa, 2025**) (**Figure 8**).

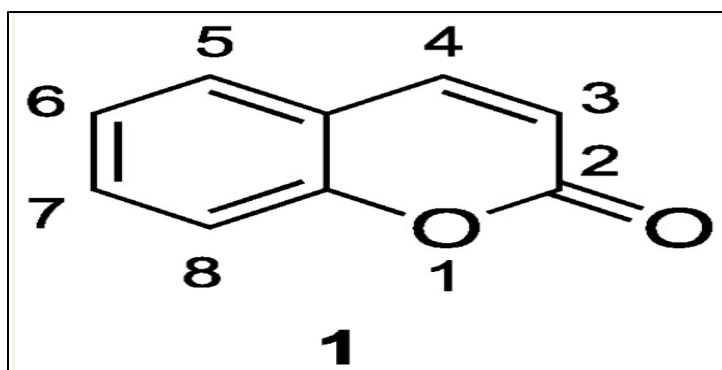


Figure 8: Structure et schéma de numérotation de la coumarine (Stefanachi et al., 2018).

2.1.4. Les quinones

Représentent une catégorie de composés organiques bruts que l'on trouve partout dans la nature. Leur structure caractéristique contenant une quinone leur donne des propriétés et des applications distinctives. Les quinones possèdent des activités biologiques significatives, y compris des propriétés antioxydantes, antimicrobiennes et antitumorales (Dong et al., 2024).

Les quinones sont des composés colorés qui possèdent un chromophore de benzoquinone simple, formé de deux groupes carbonyle et de deux doubles liaisons entre des atomes de carbone. Les pigments quinoniques sont des systèmes conduits benzoïdes-quinonoides cycliques, suffisamment conjugués pour donner une couleur. On distingue trois principales catégories de quinones : les benzoquinones, les naphtoquinones et les anthraquinones, qui comportent de 1 à 3 cycles respectivement (Dulo et al., 2021) (Figure 9).

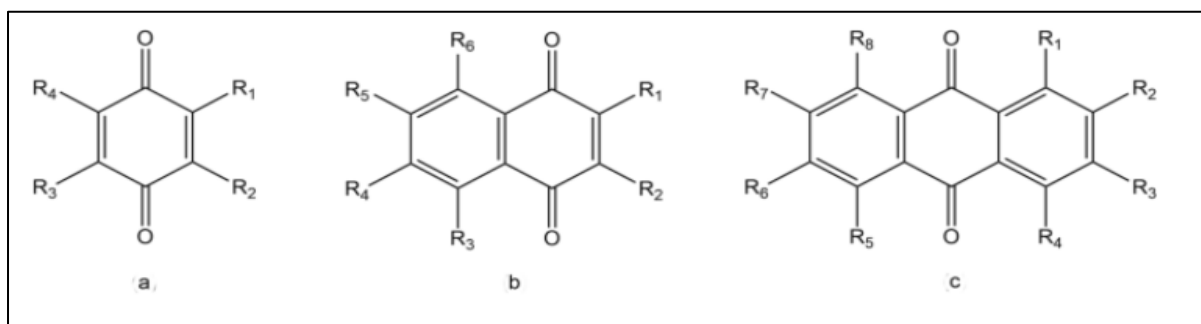


Figure 9: Structure chimique de la benzoquinone (a), de la naphtoquinone (b) et de l'anthraquinone (c) (Dulo et al., 2021).

2.2. Les alcaloïdes

Représentent une catégorie étendue de métabolites secondaires, sont couramment présents dans la nature. À l'heure actuelle, plus de 27 000 espèces ont été identifiées, majoritairement issues du règne végétal, bien que leur présence dans les règnes animal et microbien soit plutôt limitée. Les alcaloïdes terpénoïdes (TeA) tiennent une position

prépondérante parmi les diverses catégories d'alcaloïdes. Ces terpènes aminés sont le résultat de la transformation des terpénoïdes en alcaloïdes par le biais de réactions d'amination (Wang et al., 2024) (Figure 10).

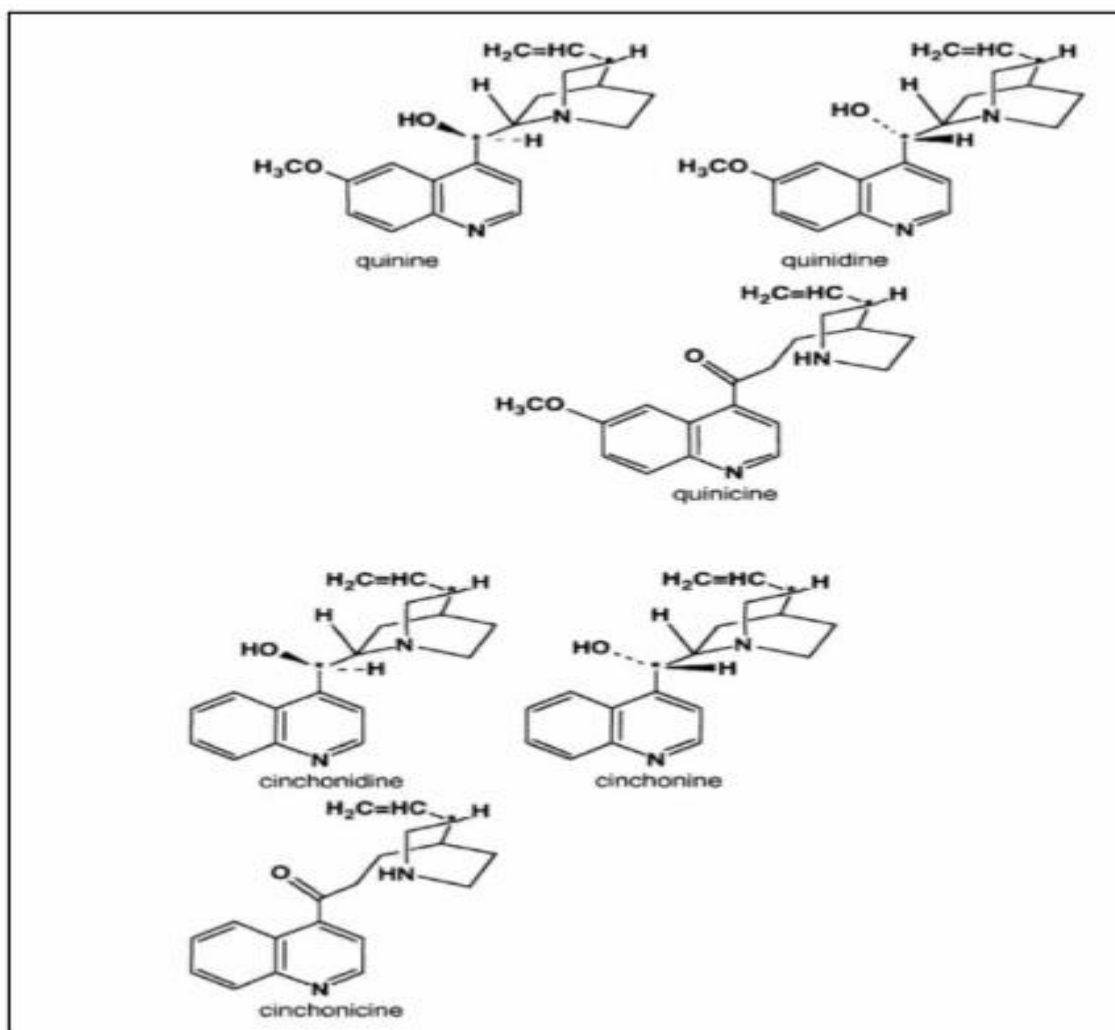


Figure 10: Les structures stéréochimiques des alcaloïdes (Fournier, 2001).

2.3. Les terpénoïdes

Les terpènes (C₅H₈) constituent une famille diversifiée de métabolites secondaires végétaux, caractérisés par une structure formée d'unités isoprènes. La synthèse de ces composés se fait principalement au sein des cellules végétales grâce à la voie de l'acide mévalonique, un processus indispensable à la production d'une multitude de biomolécules essentielles (Ben Miri et al., 2025) (Figure 11).

Les terpénoïdes, que l'on retrouve dans presque tous les êtres vivants, représentent le groupe de composés naturels le plus important et affichent une diversité structurale remarquable. Ils sont issus du squelette carboné du 2-méthylbuta-1,3-diène (unités isoprène,

C5) qui a été réarrangé en structures linéaires et cycliques. On les catégorise en monoterpènes (2 unités C5), sesquiterpènes (3 unités C5), diterpènes (4 unités C5), triterpènes (6 unités C5), etc., et on les distribue en six classes majeures : les tocophérols, les taxanes, les ingénanes, les artémisinines, les stérols et les cannabinoïdes. Parmi eux, plusieurs présentent une vaste gamme d'activités biologiques, incluant des propriétés anti-inflammatoires, antioxydantes, antimicrobiennes, anticancéreuses et antiallergiques (Câmara et al., 2024).

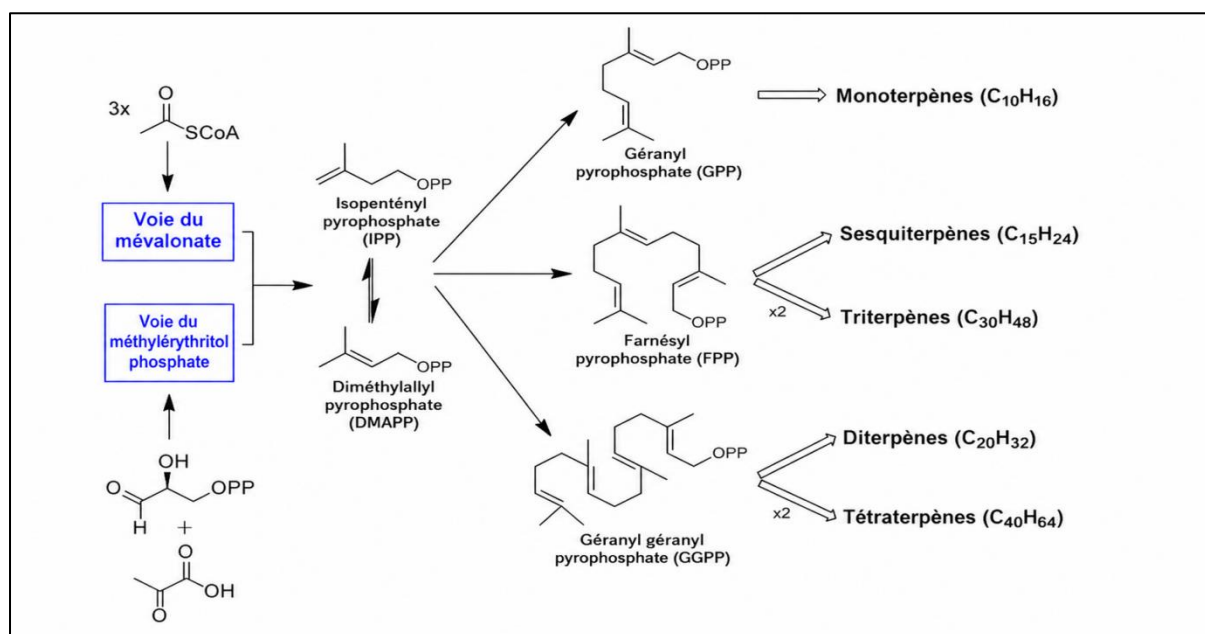


Figure 11: Schéma général de la biosynthèse des terpénoïdes (Ben Mir et al., 2025).

2.4. Les saponosides

Les saponines, provenant du latin « sapone » qui signifie savon, représentent une catégorie de composés à haute masse moléculaire, formés d'une section lipophile et d'une section hydrophile. Ces caractéristiques chimiques sont à l'origine de leur nature amphiphile. Ces composés ont la réputation de créer des solutions colloïdales dans l'eau, comme de la mousse et des dépôts de cholestérol, à cause de leur structure. La portion hydrophile est composée d'unités sucrées reliées à la portion lipophile par une liaison glycosidique, cette dernière étant formée d'aglycones hydrophobes (sapogénines), ce qui permet de catégoriser ces composés en deux sortes. Les saponines stéroïdiennes contiennent une sapogénine qui renferme un noyau stéroïde à quatre cycles, en plus de cycles hétérocycliques furanniques et pyraniques supplémentaires. Les saponines triterpéniques ont une structure constituée de cinq cycles (da Silva et al., 2024) (Figure 12).

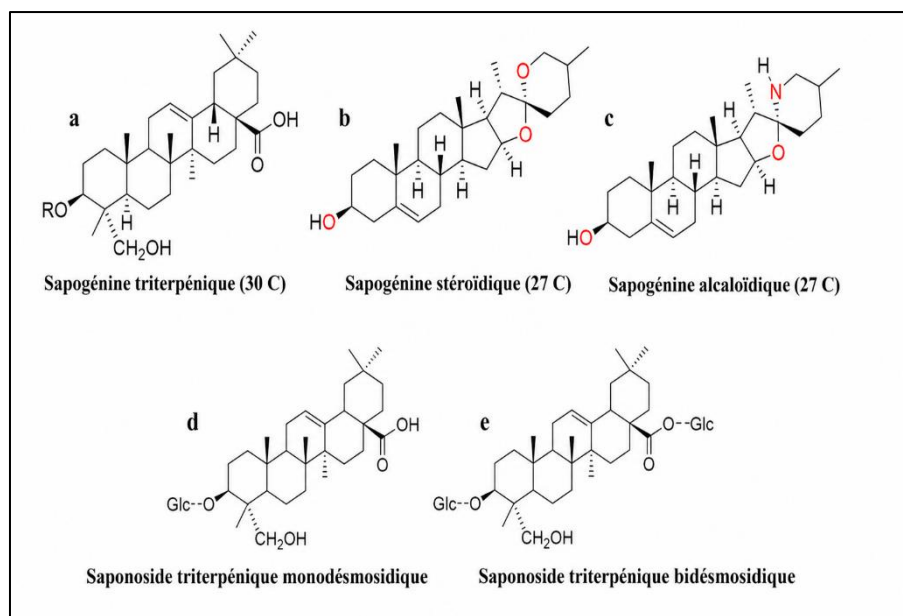


Figure 12: Structures chimiques de différents types de sapogénines et de saponines triterpénoïdes (Vincken et al., 2007).

3. L'importance des métabolites secondaire dans la lutte contre le stress oxydatif

Le potentiel préventif des composés phytochimiques tels que les tanins, les flavones, les triterpénoïdes, les stéroïdes, les saponines et les alcaloïdes face à l'émergence de maladies chroniques pourrait être associé à leur pouvoir antioxydant, capable de neutraliser les impacts délétères des oxydants produits en surplus, tels que les espèces réactives de l'oxygène et de l'azote. Au fil de l'histoire, les laboratoires pharmaceutiques ont recherché dans les produits végétaux naturels une source privilégiée pour l'élaboration de nouveaux médicaments (Muscolo, 2024). Des études récentes confirment que l'ingestion continue de polyphénols sur une durée prolongée peut servir de bouclier contre l'émergence et l'aggravation de ces soucis de santé. En particulier, les polyphénols ont montré être de potentiels agents anti-stress oxydatif, comme l'ont spécifiquement démontré des recherches *in vitro* qui ont mis en évidence leur efficacité pour contrer le stress oxydatif dans les cellules HepG2 (Muscolo, 2024).

1. Historique et origine de l'Eucalyptus

En 1788, le botaniste français Charles Louis L'Héritier de Brutelle a introduit le terme *Eucalyptus*, dérivé du grec *eu* « bien » et *kalyptos* « couvert ». Cette appellation fait référence à la structure particulière de la fleur, caractérisée par la présence d'un opercule qui recouvre les organes floraux, donnant l'impression d'une fleur dépourvue de pétales et de sépales visibles (Polito et al., 2022). Cette caractéristique morphologique constitue un élément important dans l'identification botanique des espèces appartenant à ce genre (Barboucha et al., 2024).

Le genre *Eucalyptus* fait partie de la famille des Myrtaceae qui regroupe plus de 700 espèces d'arbres et d'arbustes. Ce genre est largement étudié en botanique et en foresterie (Yip et al., 2024). Les espèces d'*Eucalyptus* viennent principalement d'Australie et de Tasmanie, qui sont considérées comme le centre d'origine et de diversité de ce type de plante (Ewansiha et al., 2024). Dans ces zones, les eucalyptus dominent de nombreux écosystèmes forestiers et jouent un rôle écologique clé dans la structure et la dynamique des forêts naturelles (Sharma et al., 2023) (Figure 13).



Figure 13: Origine des Eucalyptus (Benlazar, 2024).

2. Classification botanique :

Selon Ghidira et ses collaborateurs en 2008, l'*Eucalyptus* est classifié comme suit :

Règne : Plantae ;

Classe : Magnoliopsida

Sous-classe : Rosidae

Ordre : Myrtales

Sous-règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Famille : Myrtaceae

Genre : *Eucalyptus*

Espèce : *Eucalyptus camaldulensis*

3. Description botanique

L'*Eucalyptus camaldulensis* est un arbre de taille moyenne à grande, atteignant en moyenne 30 m de hauteur, bien que certains auteurs aient rapporté des spécimens de 45 m. Ses feuilles, gris-bleu, sont alternes, retombantes, de 8 à 22 cm de long et de 1 à 2 cm de large. Elles sont souvent incurvées ou en forme de faucille, effilées et pointues à la base. Ses fruits sont de très petites capsules de 5 à 8 mm de diamètre, portées par un pédoncule fin et contenant quatre valves et de minuscules graines. L'*Eucalyptus camaldulensis* est une plante vivace à feuillage persistant qui, peut vivre de 500 à 1000 ans. Elle pousse généralement sur les rives des rivières, qu'elles soient permanentes ou saisonnières, et domine généralement la communauté, formant des forêts ou des bois ouverts purs (Aleksic Sabo et al., 2019) (Figure 14).



Figure 14: *Eucalyptus camaldulensis* (Mesksem, 2018).

4. L'utilisation traditionnelle de la plante

Le genre *Eucalyptus* a suscité un grand intérêt scientifique grâce à sa grande diversité d'espèces et à ses diverses activités biologiques (Khedhri et al., 2023). En outre, certaines

espèces sont utilisées pour l'obtention d'huiles essentielles riches en composés bioactifs dont la composition est principalement du 1,8-Cinéole (**Haj Moussa et al., 2025**).

Des études multiples ont montré que les espèces d'Eucalyptus possèdent différentes activités biologiques, notamment des effets antioxydants (**Ez-Zriouli et al., 2023**).

L'*Eucalyptus camaldulensis* est un arbre de type persistant qui a été couramment employé en médecine traditionnelle pour soigner différentes affections de santé (**Ghareeb., 2018**). Les anciennes communautés aborigènes d'Australie employaient la plante *E. camaldulensis* en médecine pour traiter différents troubles gastro-intestinaux (y compris coliques, diarrhée et dysenterie), affections respiratoires (rhumes, toux, asthme, laryngalgie, laryngite, pharyngite, maux de gorge, trachéotomie), arrêter les hémorragies, soigner les blessures et les coupures, ainsi que la préparation de décoctions pour apaiser les spasmes, les courbatures et les douleurs musculaires, mais également les douleurs articulaires et même dentaires (**Sabo & Knezevic, 2019**).

Partie 02 : Matériel et méthodes

Nous avons réalisé notre travail au sein du laboratoire « Antibiotiques, Antifongiques, Physico-chimie : Synthèse et Activité Biologique », à la faculté SNV-STU de l'Université de Tlemcen. Ce travail s'articule autour de trois phases distinctes :

***La première phase** a été consacrée à la préparation et à l'extraction du matériel végétal, selon des protocoles appropriés visant à préserver l'intégrité des composés bioactifs.

***La deuxième phase** a porté sur l'analyse phytochimique des extraits obtenus, incluant la mise en évidence qualitative des principaux groupes de métabolites secondaires, ainsi que la quantification des polyphénols totaux et des flavonoïdes.

*** La troisième phase** a pour objectif d'évaluer l'activité antioxydante des extraits, en utilisant deux approches complémentaires : la méthode de piégeage du radical libre DPPH[•] et la méthode de réduction du fer (FRAP).

1. Préparation des extraits

1.1. Matériel végétal

Nous avons recueilli l'*Eucalyptus camaldulensis* à la mi-février dans la région de la Wilaya de Tlemcen. Les feuilles ont été sélectionnées, séparées, puis lavées à l'eau. Par la suite, elles ont été mises à sécher dans un lieu frais, bien aéré et à l'abri de la lumière. Une fois séchés, elles ont été réduites en poudre.

❖ Préparation de l'extrait aqueux :

L'extrait analysé dans notre travail a été obtenu par le procédé d'extraction par macération (Figure 15).

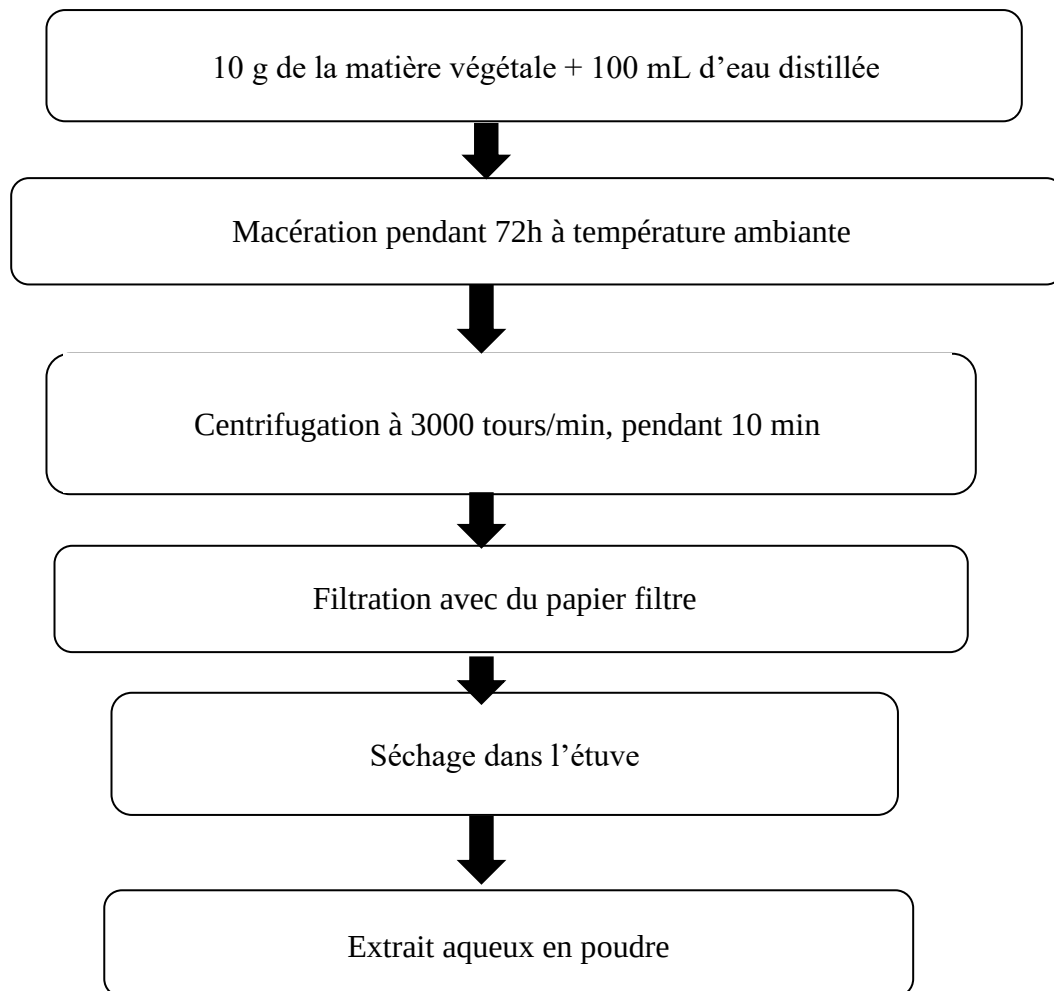


Figure 15: Protocole de préparation de l'extrait aqueux

- ❖ **Préparation de l'extrait hydroéthanolique** : L'extrait hydroéthanolique étudié a été obtenu par macération (**Figure 16**).

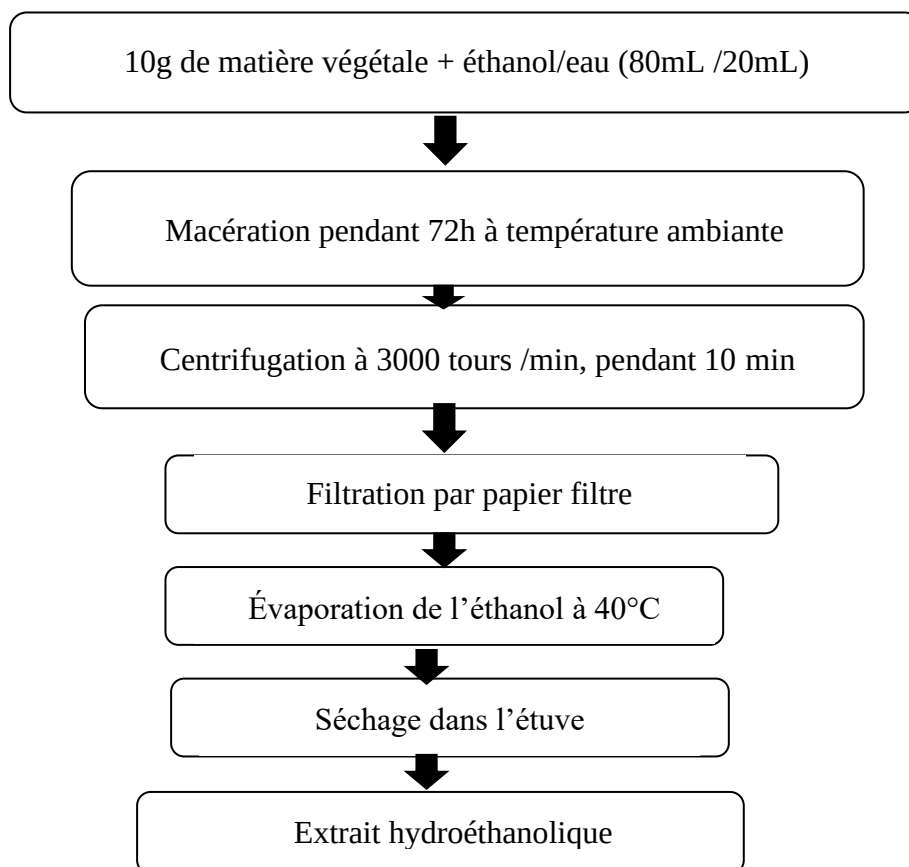


Figure 16: Protocole de préparation de l'extrait hydroéthanolique*

2. Calcul du rendement

Le rendement correspond au rapport entre la quantité de l'extrait évaporé du solvant et la masse de la matière végétale utilisée pour l'extraction, exprimé en pourcentage.

La formule suivante est utilisée pour calculer le rendement :

$$\text{Rendement (\%)} = (M_1/M_0) \times 100$$

M_0 : masse en gramme de la matière végétale initiale séchée.

M_1 : masse en gramme de l'extrait brut évaporé.

3. Les tests phytochimiques

Afin de mettre en évidence la présence ou l'absence de métabolites secondaires dans les extraits végétaux étudiés, une analyse qualitative a été réalisée, reposant sur des réactions de coloration,

de précipitation ainsi que sur le test de formation de mousse (El-Haoud et al., 2018 ; Haoulia, 2015).

❖ **Les alcaloïdes :**

On dépose 0,5 mL de l'extrait à examiner dans deux tubes. Par la suite, nous ajoutons 0,5 mL d'HCl (1%) puis 0,1 mL du réactif de Mayer dans le premier tube, tandis que dans le deuxième tube, nous y mettons 0,1 mL du réactif de Wagner. La formation d'un dépôt blanc ou brun signale la présence d'alcaloïdes.

❖ **Les tanins :**

Nous plaçons 1mL de l'extrait dans un tube à essai et incorporons 0,25 mL de chlorure de sodium FeCl_3 (1%). L'incubation du mélange a été réalisée pendant un quart d'heure à température ambiante. La présence de tanins se manifeste par une teinte verdâtre ou bleuâtre ou noirâtre.

❖ **Les flavonoïdes :**

Nous avons identifié la présence de flavonoïdes en incorporant 1mL de l'extrait à 1mL d'acide chlorhydrique concentré, ainsi que quelques fragments de magnésium. L'apparition de teintes rouges, oranges ou roses signale leur présence dans l'extrait.

❖ **Les quinones libres :**

Pour la recherche des quinones en intégrant 0,1 mL d'hydroxyde de sodium (NaOH à 1%) à 1 mL de l'extrait. L'apparition d'une coloration variant du jaune au rouge, voire au violet, indique la présence de quinones libres.

❖ **Anthraquinones :**

Mettre dans un tube 1 mL de l'extrait avec 1 mL de NH_4OH (10%) et agiter. L'apparition d'une couleur violette indique la présence d'anthraquinones.

❖ **Terpénoïdes (test de Slakowski):**

Mélangez 1 mL de l'extrait avec 0,4 mL de chloroforme et 0,6 mL d'acide sulfurique concentré. L'émergence d'une teinte brune et la formation de deux phases pendant l'interphase indiquent la présence de terpénoïdes.

❖ **Les composés réducteurs :**

Incorporez 1 mL de solution de Fehling (0,5 mL du réactif A et 0,5 mL du réactif B) à 1 mL de l'extrait, puis laissez incuber pendant 8 minutes dans un bain-marie à ébullition. La présence de composés réduits se manifeste par l'apparition d'une couleur rouge brique.

❖ Les saponines :

On agite 2 mL de l'extrait pendant 15 secondes, puis on le laisse reposer pendant 15 minutes. Une hauteur dépassant 1 cm signale la présence de saponines.

4. Dosage des polyphénols

La technique de Folin-Ciocalteu a été employée pour quantifier la teneur en polyphénols des extraits analysés. Ce réactif de couleur jaune, est constitué d'un mélange d'acide tungstique phosphoreux ($H_3PW_{12}O_{40}$) et d'acide phosphomolybdique ($H_3PMo_{12}O_{40}$). Durant le processus d'oxydation des polyphénols, le réactif de Folin-Ciocalteu est réduit, créant ainsi un complexe nouveau, le molybdène-tungstène qui présente une couleur bleue. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration des composés phénoliques oxydés, qui présentent une absorption maximale à 700 nm (**Zbadi et al., 2018**).

La gamme d'étalon est produite en parallèle dans les mêmes conditions opératoires à l'aide de l'acide gallique comme étalon positif à des concentrations allant de 25 à 1000 $\mu g/mL$.

La formule suivante est utilisée pour calculer la concentration totale de polyphénols :

$$[\text{Polyphénols}] = a.f/C$$

a : La concentration de polyphénols est déterminée sur la base de la courbe standard.

f : Taux de dilution.

C : Teneur initiale de l'extrait (1 mg/ml).

❖ Mode opératoire

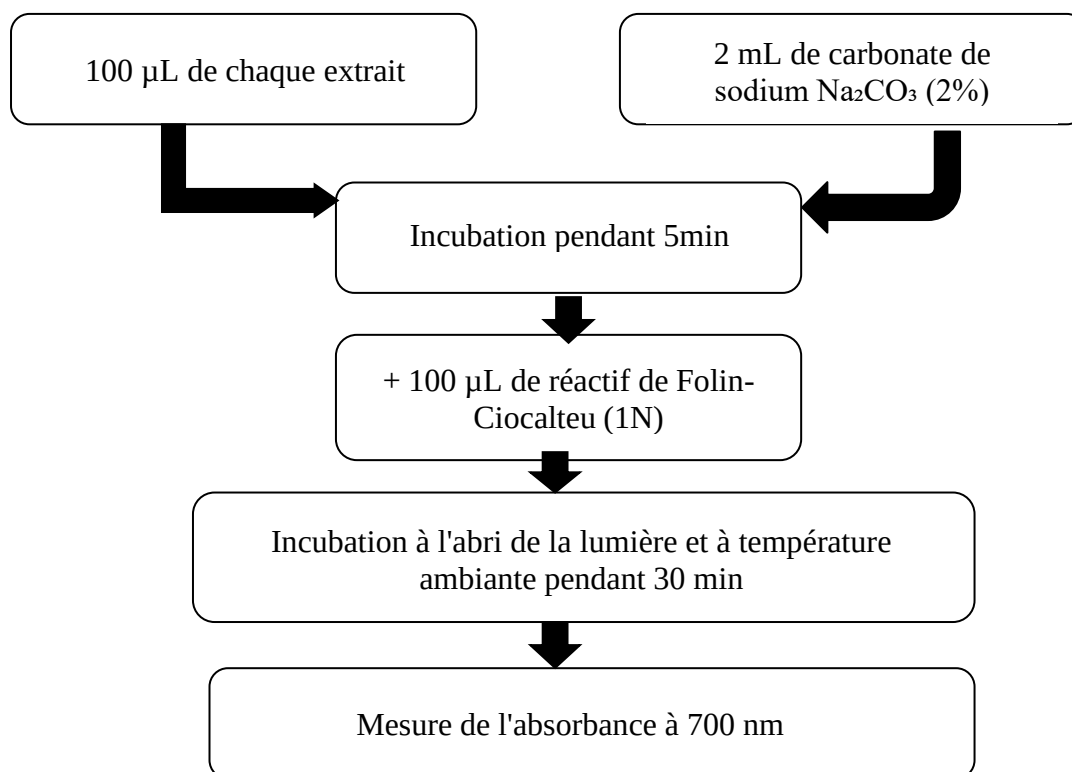


Figure 17: Protocole utilisé pour le dosage des polyphénols totaux.

5. Dosage des flavonoïdes

L'évaluation de la concentration en flavonoïdes des divers extraits a été réalisée en utilisant la méthode colorimétrique à base de trichlorure d'aluminium (AlCl₃). Il s'agit d'un complexe très stable formé avec le nitrite de sodium (NaNO₂). En présence de flavonoïdes, il crée un composé de couleur rose qui absorbe à 510 nm (**Zbadi et al., 2018**).

Une courbe d'étalonnage est établie simultanément dans les mêmes conditions expérimentales en utilisant la catéchine comme standard, avec des concentrations allant de 25 à 1000 µg/mL.

Le calcul de la concentration en flavonoïdes se fait selon la formule ci-après :

$$[\text{Flavonoïdes}] = a.f/C$$

a : Détermination de la concentration des flavonoïdes basée sur la courbe standard.

f : Taux de dilution.

C : Concentration de départ de l'extrait (1 mg/mL)

❖ Mode opératoire

La figure illustre le protocole employé pour mesurer les flavonoïdes.

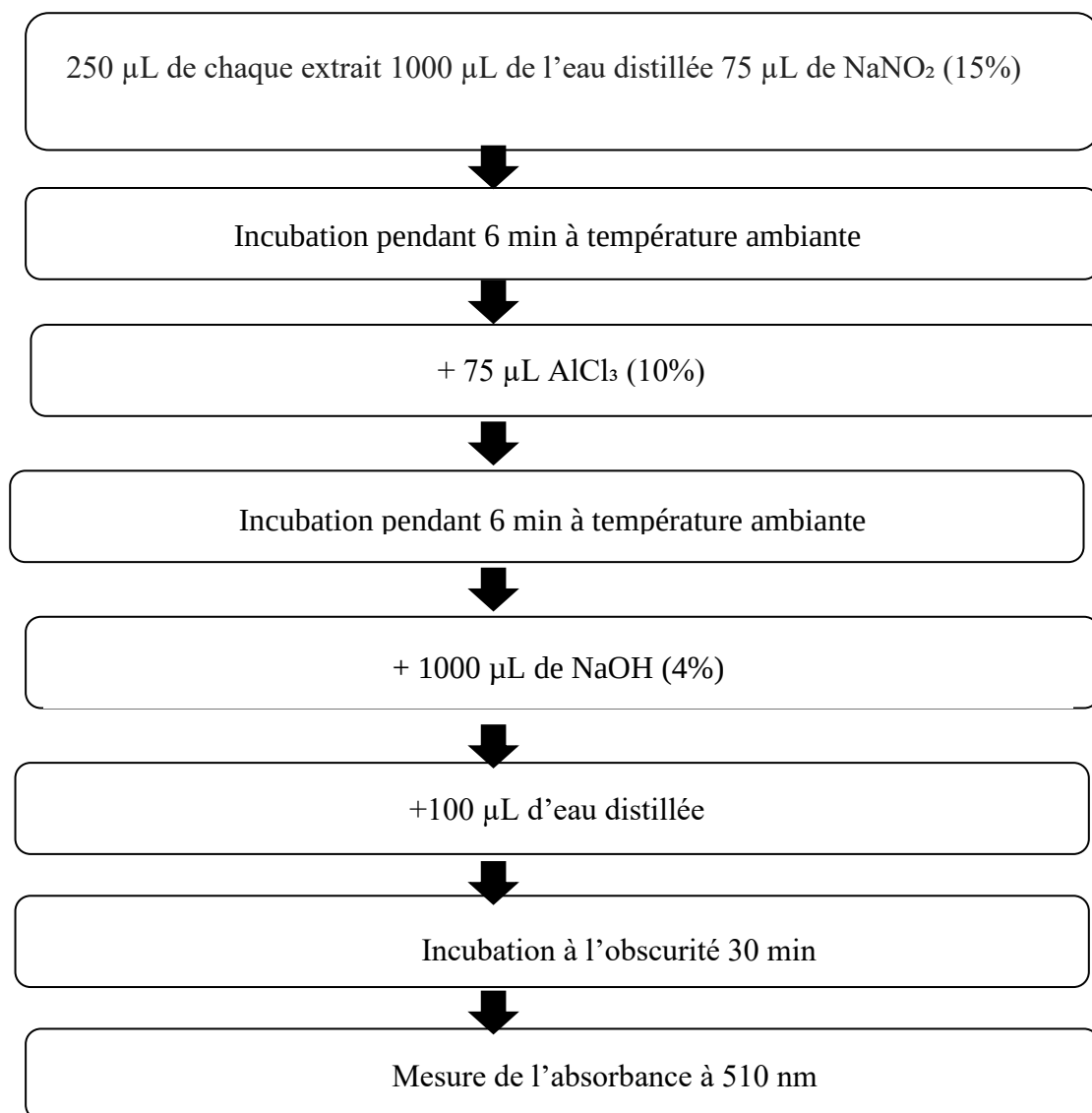


Figure18: Protocole utilisé pour le dosage des flavonoïdes.

6. Évaluation de l'activité antioxydante

6.1. Piégeage du radical libre DPPH[•]- (2,2-diphényle-1-picrylhydrazyl):

La molécule (2,2 Diphényle-1-Picryl-Hydrazyle (DPPH[•])) est couramment employée pour l'évaluation de l'activité antioxydante en raison de sa simplicité, de sa rapidité et de son faible coût. Ce composé est un radical libre stable (**Djeblahi, 2021**).

L'expérimentation repose sur la réduction du radical DPPH (violet) par un antioxydant (A-OH), qui lui cède un atome d'hydrogène, conduisant à la formation de la 2,2-diphényl-1-picrylhydrazine (DPPH-H), une forme non radicalaire de couleur jaune. L'évaluation de

l'activité antiradicalaire est effectuée en suivant la diminution de l'absorbance de la solution violette à 517 nm dans le domaine de visible. Les réactions se font à température ambiante et dans un milieu méthanolique, ce qui favorise la solubilité de nombreux composés antioxydants (Kleinrichert & Alappat, 2019)

❖ Mode opératoire

Le protocole d'activité anti-radicalaire du DPPH[•] est schématisé dans la **Figure 19**

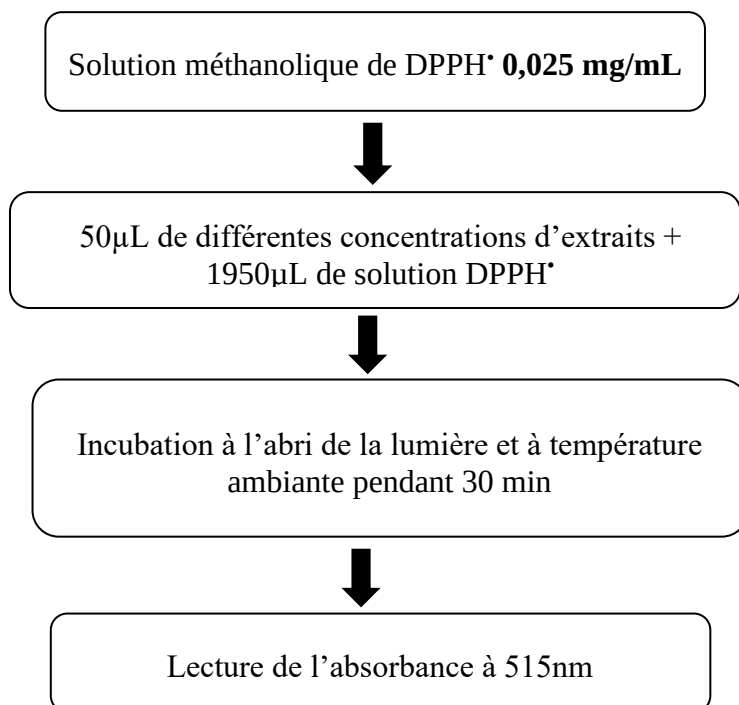


Figure19:Protocole suivi pour l'évaluation de l'activité anti-radicalaire du DPPH[•].

Il a été préparé un témoin négatif en associant 50 µL de méthanol à 1950 µL de solution DPPH[•].

Le calcul du taux de piégeage du radical est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\% I = [(AC - AE) / AC] \times 100$$

% I : Taux d'inhibition.

AC : Absorbance du témoin (Absorbance moyenne du radical seul).

AE : Absorbance de l'échantillon (Absorbance du radical libre en présence de l'antioxydant).

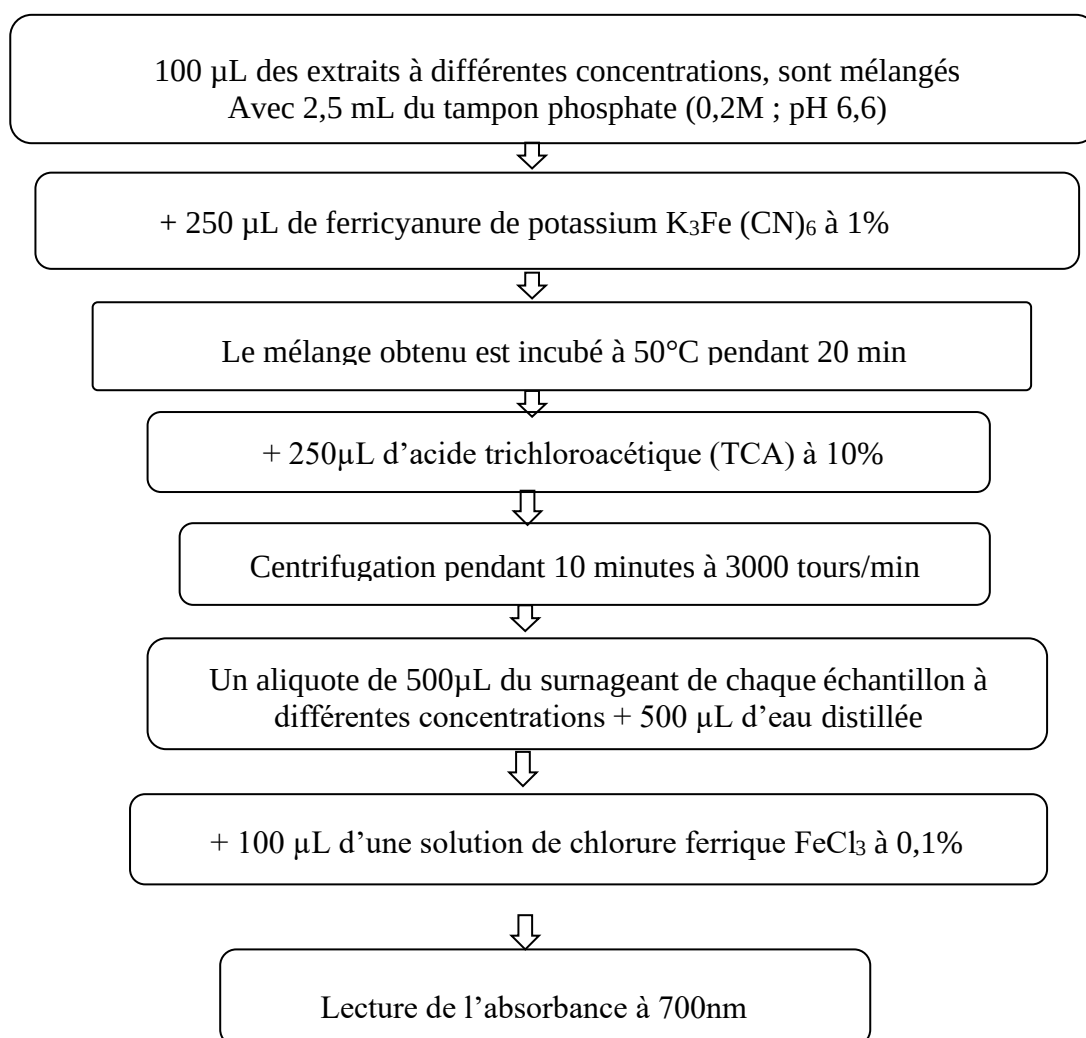
6.1.1. Calcul des IC_{50}

La concentration qui diminue le DPPH[•] de moitié est représentée par la valeur d' IC_{50} , estimée graphiquement pour chaque extrait en se basant sur la courbe montrant l'inhibition du DPPH[•] en relation avec la concentration de l'extrait (Samarth et al., 2008).

6.2. Réduction du fer par la méthode FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power)

La technique de réduction du fer s'appuie sur le pouvoir des antioxydants pour convertir le fer ferrique (Fe^{3+}) en fer ferreux (Fe^{2+}), ce qui se traduit par l'émergence d'une couleur bleue (Amarowicz et al., 2010).

❖ **Mode opératoire :** Le protocole suivi est schématisé dans la **figure 20**



:

Figure 20: Protocole suivi pour l'évaluation de l'activité antioxydante par la méthode FRAP.

L'acide ascorbique est utilisé comme référence dans divers niveaux de concentration, dans les mêmes conditions expérimentales.

6.2.1. Calcul d'EC₅₀

En appliquant la technique FRAP, une hausse de l'absorbance signale un renforcement du pouvoir réducteur du fer par les échantillons examinés. Afin d'effectuer une comparaison entre ces échantillons, nous déterminons le EC₅₀ (concentration efficace), qui représente la concentration requise pour parvenir à une absorbance de **0,5** sur les graphiques [Absorbances=f(concentrations)] à 700 nm (**Tamuly et al., 2014**).

Partie 03 : Résultats et interprétations

1. Analyse phytochimique

1.1. Rendement des extraits d'*Eucalyptus camaldulensis*

Les extraits de feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis* montrent des rendements et des caractéristiques physiques distincts (aspect, couleur, solubilité). Les résultats sont répertoriés dans le **tableau 3**.

Tableau 3: Rendements, et caractéristiques des extraits d'*Eucalyptus camaldulensis*.

Extraits	Rendements	Aspect	Couleur	Solubilité
Eau/éthanol	8,681%	Pâteux	Vert	Éthanol et eau distillée
Aqueux	7,888%	Poudre	Marron	Eau distillée

Les données indiquent que l'extrait hydro-éthanolique d'*Eucalyptus camaldulensis* affiche un taux d'extraction légèrement plus élevé (8,681 %) comparé à l'extrait aqueux (7,88 %). Cela suggère que l'association eau-éthanol est plus efficace pour l'extraction des composés contenus dans les feuilles.

1.2. Criblage phytochimique

Des tests phytochimiques sur les extraits de la plante ont révélé la présence de plusieurs métabolites secondaires, par des réactions colorées ou de précipitation par des réactifs chimiques spécifiques. Les résultats sont présentés dans le **tableau 4**.

Tableau 4: Résultats des tests phytochimiques effectués sur les deux extraits : aqueux et hydroéthanolique de la plante *Eucalyptus camaldulensis*.

Composés / extraits	Extrait aqueux	Extrait hydroéthanolique
Alcaloïdes	–	+
Tanins	+	+
Flavonoïdes	+	+
Quinones libres	+	+
Anthraquinones	–	–
Terpénoïdes (Test de Slakowski)	–	+
Saponines	+	+
Composés réducteurs	+	–

Les résultats sont interprétés comme suit : (-) réaction négative et (+) réaction positive.

L'étude phytochimique des extraits aqueux et hydroalcoolique de l'*Eucalyptus camaldulensis* a démontré la présence de tanins, flavonoïdes, quinones libres et saponines dans les deux types d'extraits. Seul l'extrait hydroéthanolique a révélé la présence d'alcaloïdes et de terpénoïdes, alors que seuls des composés réducteurs ont été constatés dans l'extrait aqueux. En revanche, les extraits ne contenaient aucune anthraquinone. Ces observations indiquent que le type de solvant utilisé a un impact sur l'extraction des divers métabolites secondaires contenus dans la plante.

1.3. Teneur en polyphénols totaux et flavonoïdes

On a estimé les niveaux de polyphénols totaux et de flavonoïdes dans les extraits d'*Eucalyptus camaldulensis* grâce à l'utilisation des équations de régression linéaire des courbes standard pour l'acide gallique et la catéchine, respectivement (**Figures 21 et 22**).

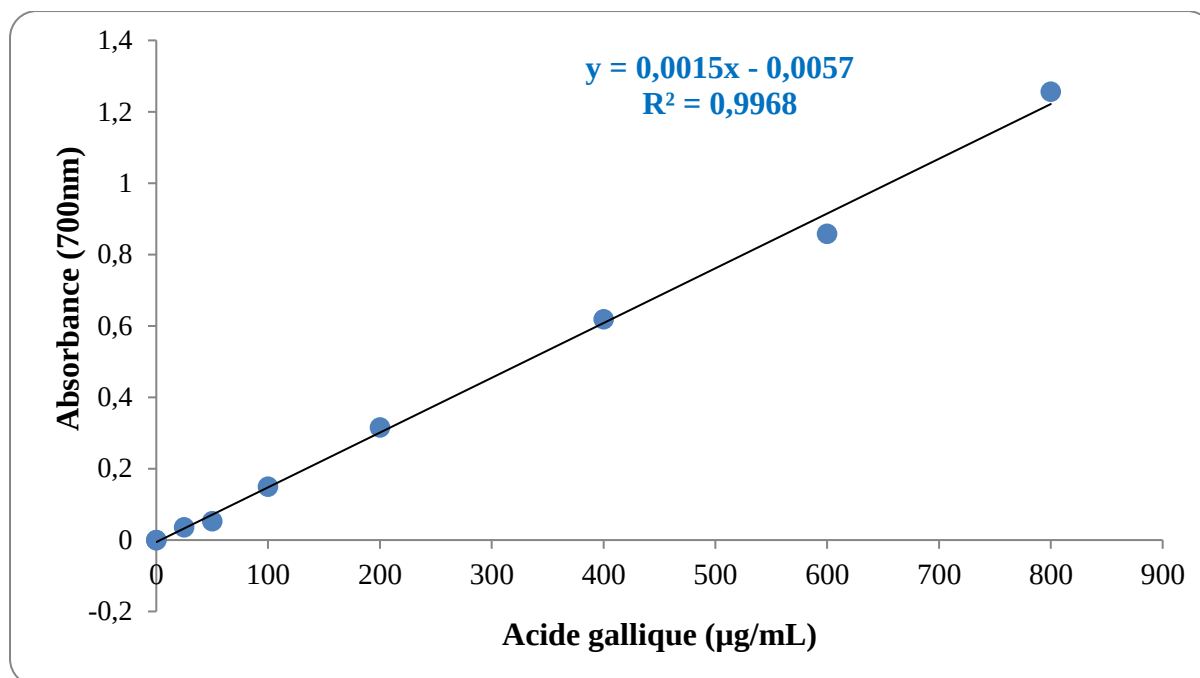


Figure 21: Courbe d'étalonnage de l'acide gallique pour le dosage des polyphénols totaux.

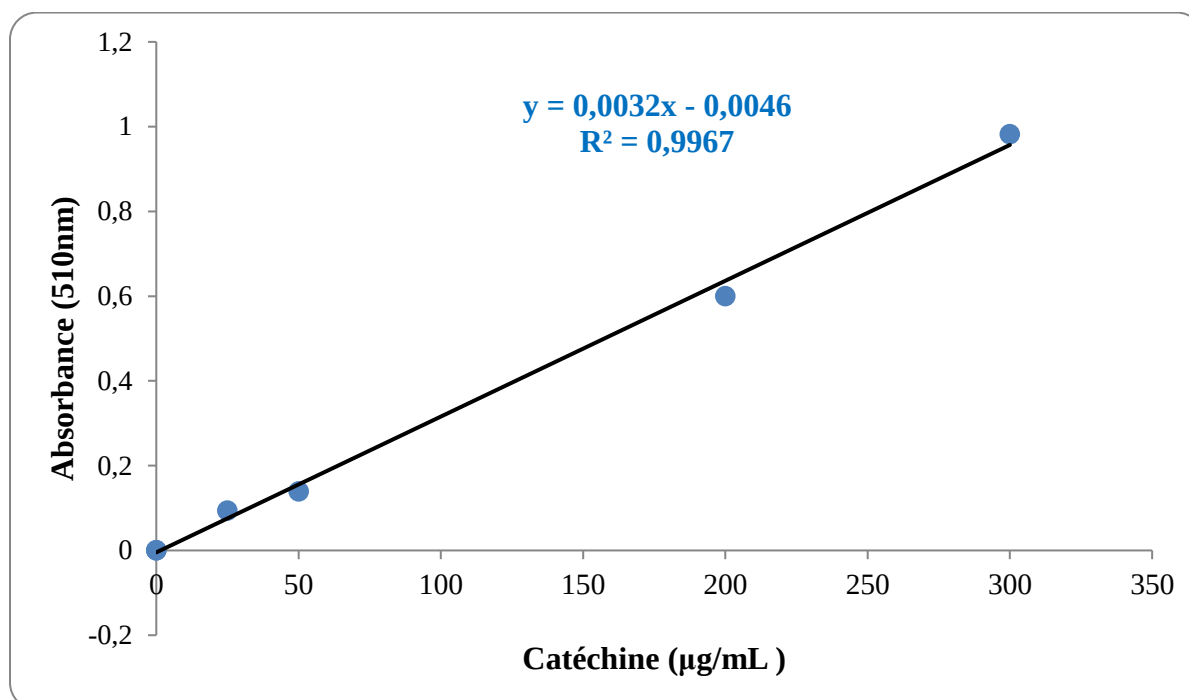


Figure 22: Courbe d'étalonnage de la catéchine pour le dosage des flavonoïdes.

Les résultats des dosages des composés phénoliques sont regroupés dans le **Tableau 5**

Tableau 5: Dosage des polyphénols totaux et flavonoïdes des extraits d'*Eucalyptus camaldulensis*

Extraits	Teneurs en polyphénols totaux (µg EAG/g ES)	Teneurs en flavonoïdes (µg EQC/g ES)
Extrait aqueux	5762,53± 0,025	208,125±0,006
Extrait hydroéthanolique	9574,40±0,007	358,12±0,007

Les données d'analyse indiquent que l'extrait hydro-alcoolique d'*Eucalyptus camaldulensis* contient une plus grande quantité de polyphénols totaux (**9574,40 µg EAG/g ES**) et de flavonoïdes (**358,12µg EQC/g ES**) que l'extrait à base d'eau, qui affiche des concentrations respectives de **5762,53µg EAG/g ES** et **208,125 µg EQC/g ES**. Ces données suggèrent que l'extraction des composés phénoliques et flavonoïdes de cette plante est plus efficace lorsque réalisée avec un solvant hydroéthanolique. Cette abondance de métabolites bioactifs pourrait donner à l'extrait hydro-éthanolique un potentiel antioxydant supérieur à celui de l'extrait aqueux.

2. L'activité antioxydante

2.1. Piégeage du radical libre DPPH•

Le test de DPPH utilisé pour évaluer l'activité antioxydante des extraits d'*Eucalyptus camaldulensis* a permis d'obtenir les graphiques ci-dessous, illustrant la variation du pourcentage d'inhibition en fonction de la concentration de chaque extrait (**Figures : 23 à 24**).

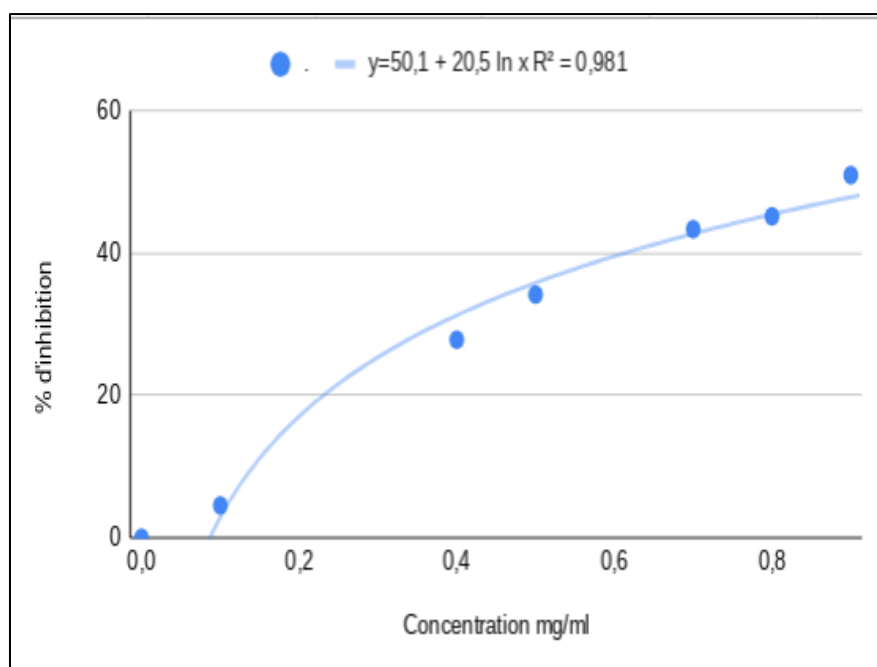


Figure 23: Pourcentage d'inhibition du radical DPPH• en fonction de différentes concentrations de l'extrait hydroéthanolique d'*Eucalyptus camaldulensis*.

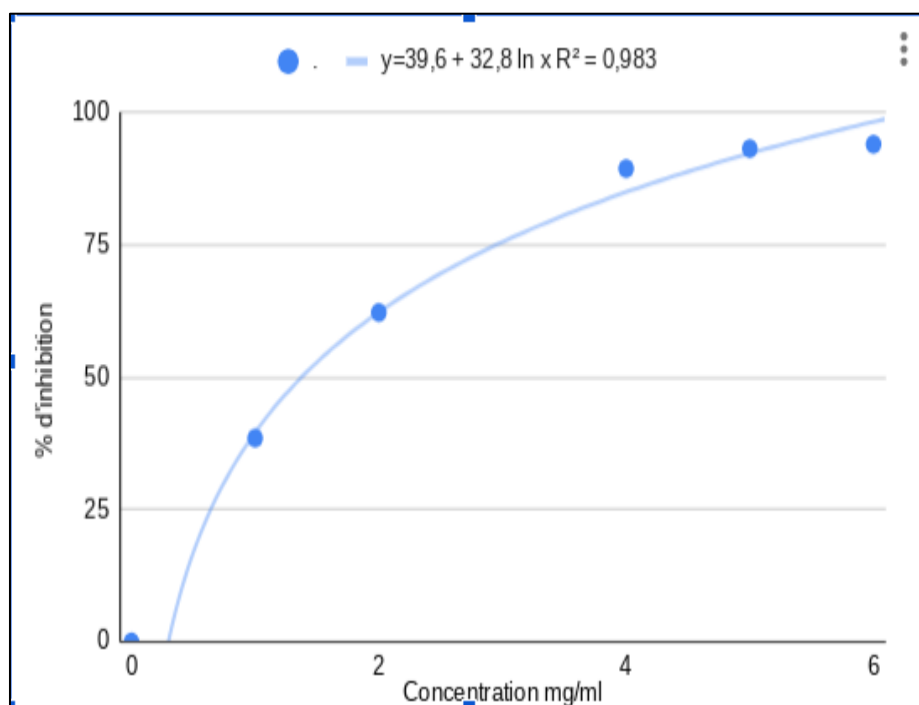


Figure 24: Pourcentage d'inhibition du radical DPPH• en fonction de différentes concentrations de l'extrait aqueux d'*Eucalyptus camaldulensis*.

La molécule de référence, l'acide ascorbique, utilisée pour piéger le radical libre DPPH• présente des pourcentages d'inhibition illustrés dans la **figure 25**.

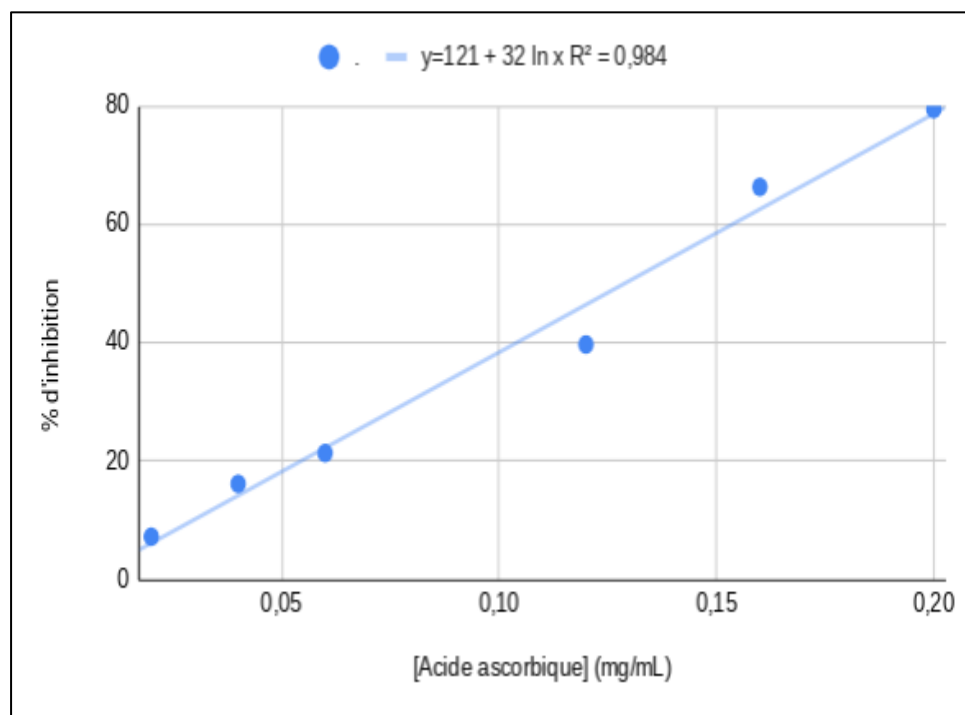


Figure 25: Pourcentage d'inhibition du radical DPPH• en fonction de différentes concentrations de l'acide ascorbique.

À partir des équations des régressions logarithmique obtenues, nous avons déterminé les IC₅₀ (Concentrations qui inhibent 50% du radical libre DPPH•) qui sont regroupées dans le **tableau 6**.

Tableau 6: Les valeurs d'IC₅₀ des deux extraits avec la molécule de référence (Acide ascorbique).

Extraits	IC ₅₀ (mg/mL)
Aqueux	1,37
Hydro-éthanolique	0,995
Acide ascorbique	0,12

L'expérimentation sur le radical DPPH• indique que l'activité antioxydante progresse parallèlement à l'accroissement de la concentration pour ce qui concerne les deux

extraits d'*Eucalyptus camaldulensis*, tout comme l'acide ascorbique. Les valeurs d'IC₅₀ déterminées se chiffrent à **1,37 mg/mL** pour l'extrait aqueux, **0,99 mg/mL** pour l'extrait hydroéthanolique, et **0,12 mg/mL** pour l'acide ascorbique.

La valeur la plus basse d'IC₅₀ observée pour l'acide ascorbique témoigne d'une activité antioxydante intense, renforçant sa réputation de composé de référence efficace. Par rapport à l'extrait aqueux, l'extrait hydroéthanolique issu d'extraits de plantes montre une puissance antioxydante plus importante, comme l'indiquent ses valeurs IC₅₀ plus basses.

2.2. Pouvoir réducteur du fer

On a comparé l'aptitude des extraits d'*Eucalyptus camaldulensis* à diminuer le fer avec celle de la molécule de référence, à savoir l'acide ascorbique. Des courbes de la régression linéaire ont été utilisées pour représenter les absorbances des diverses concentrations de référence ou des extraits préparés (Figures 26 à 28).

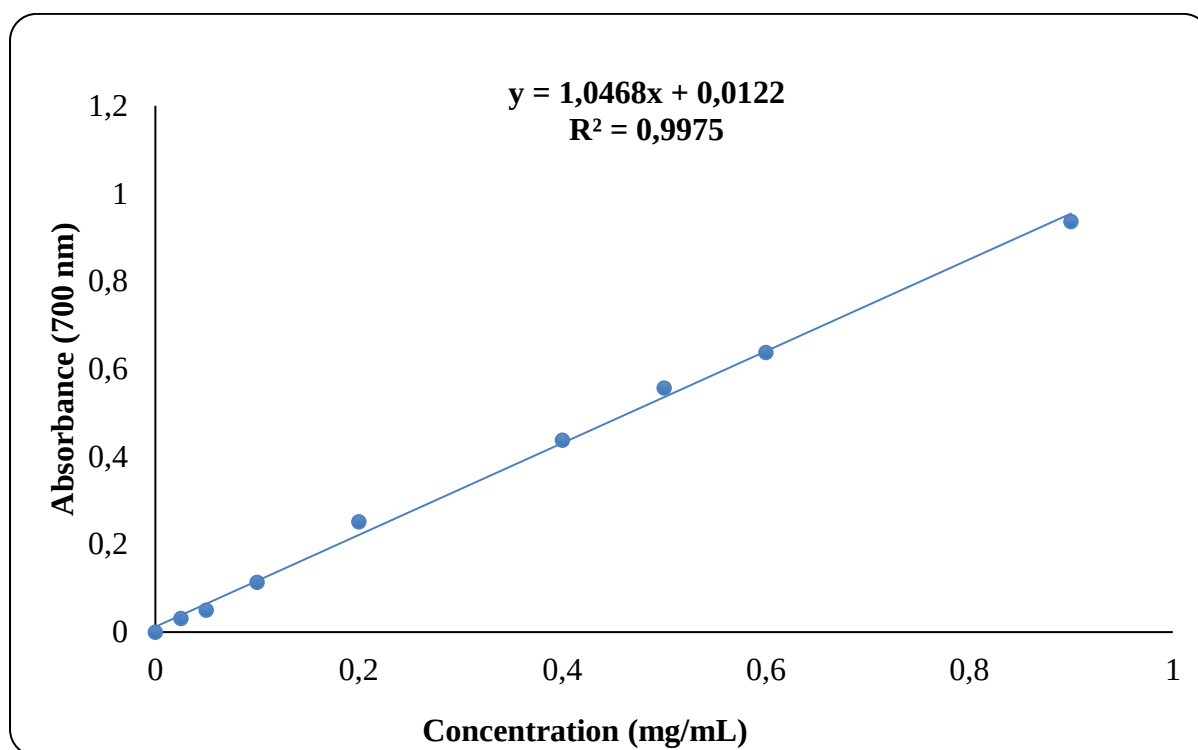


Figure 26: Pouvoir de réduction de fer par l'extrait aqueux d'*Eucalyptus camaldulensis*.

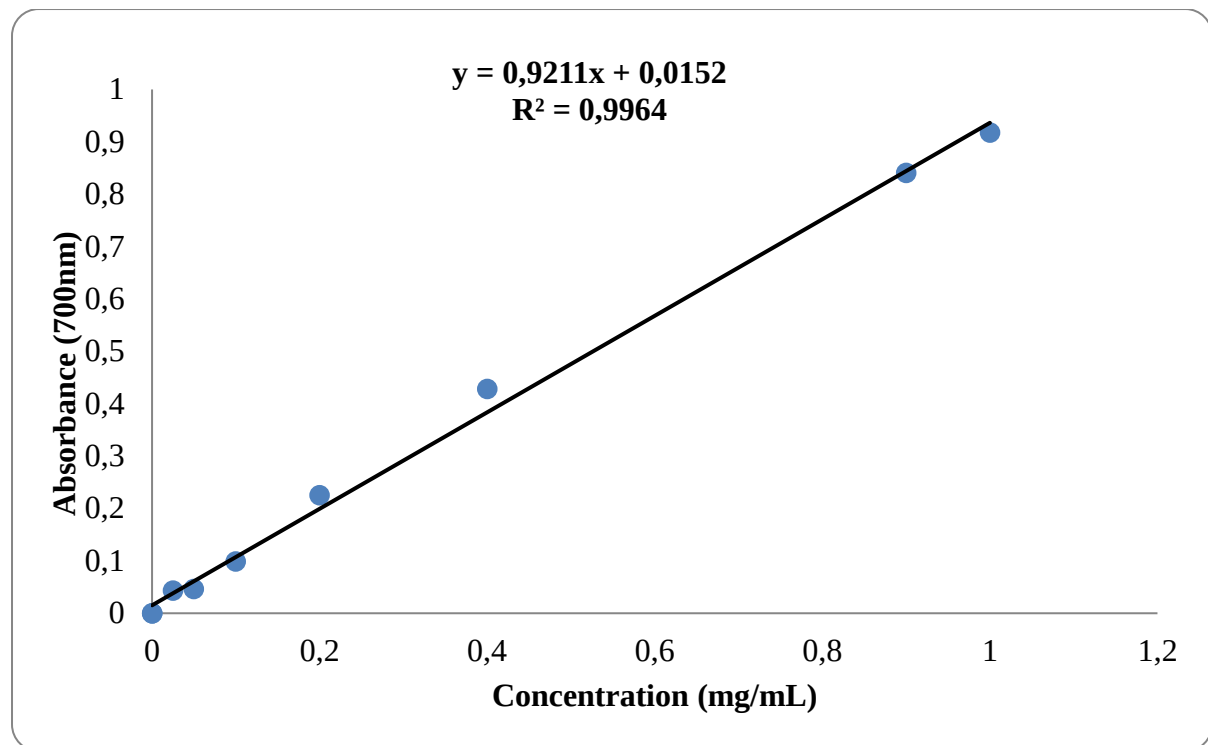


Figure 27: Pouvoir de réduction de fer par l'extrait hydroéthanolique d'*Eucalyptus camaldulensis*.

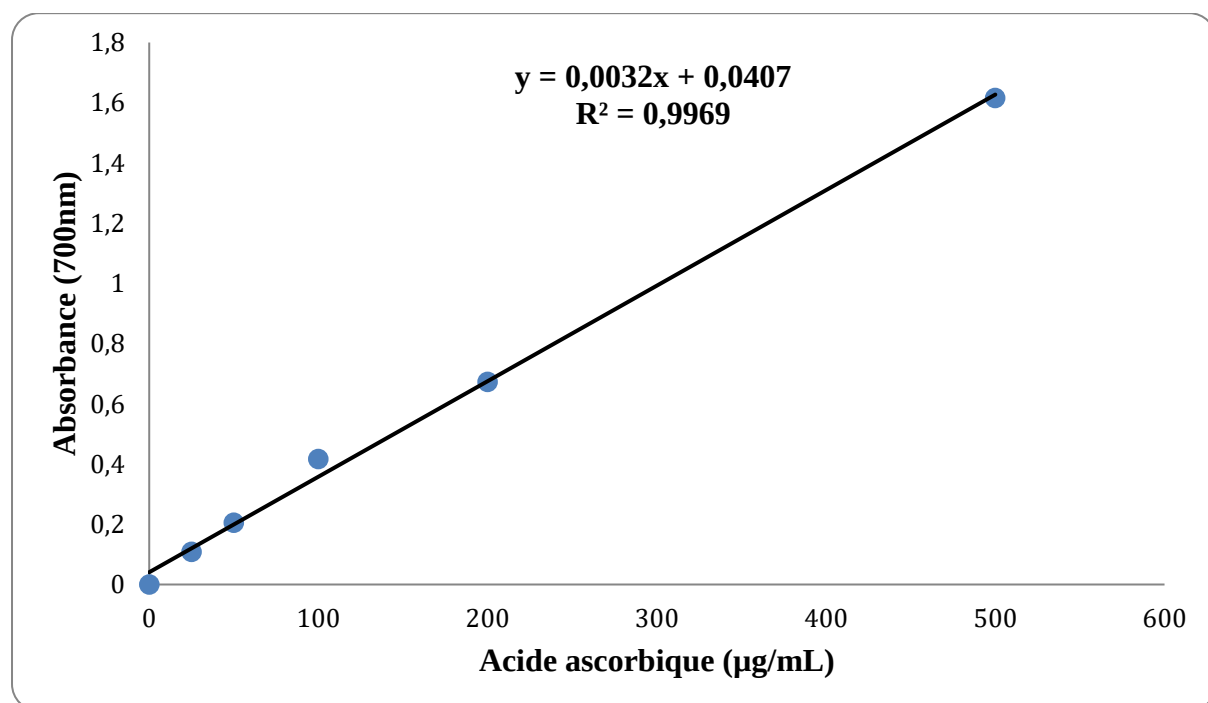


Figure 28: Pouvoir de réduction de fer par l'acide ascorbique.

Les valeurs d'EC₅₀ quantifient et évaluent l'activité réductrice des extraits en comparaison avec la molécule de référence. Elles sont graphiquement définies à partir des courbes de régression linéaires d'absorbance en relation avec les diverses concentrations des extraits analysés (**Tableau 7**)

Tableau 7: Les valeurs d'EC₅₀ des extraits d'*Eucalyptus camaldulensis*.

Extraits	EC ₅₀ (mg/mL)
Aqueux	0,42
Hydro-éthanolique	0,47
Acide ascorbique	0,240

Les résultats obtenus concernant le pouvoir réducteur du fer montrent que l'activité antioxydante s'intensifie avec la montée de la concentration, tant pour les deux extraits d'*Eucalyptus camaldulensis* que pour l'acide ascorbique. Les valeurs d'EC₅₀ déterminées sont **0,42 mg/mL** pour l'extrait aqueux, **0,47 mg/mL** pour l'extrait hydro-éthanolique et **0,24 mg/mL** pour l'acide ascorbique. La valeur EC₅₀ la plus basse décelée pour l'acide ascorbique témoigne d'une activité réductrice supérieure à celle des extraits de plantes. Les activités antioxydantes des extraits aqueux et hydro-éthanoliques, étant très similaires, laissent penser que les deux contiennent une forte concentration de composés à même de réduire les ions ferriques.

Partie 04 : Discussion

Discussion

L'analyse effectuée sur les feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis* a conduit à une évaluation de leur composition phytochimique, de la concentration en composés phénoliques, ainsi que de l'activité antioxydante des extraits aqueux et hydroéthanoliques. Les données recueillies indiquent que le type de solvant utilisé pour l'extraction a une grande influence sur le rendement, la composition chimique et les attributs biologiques des extraits.

L'extrait hydroéthanolique, ayant donné un rendement d'extraction supérieur, pourrait s'expliquer par la capacité des solvants polaires à extraire de manière efficiente les composés bioactifs présents dans les feuilles.

Cette constatation concorde avec les travaux de **Alvarez et al. (2021)**, démontrant que des solvants hautement polaires, comme l'éthanol, le méthanol et l'eau, offrent les meilleurs rendements d'extraction pour diverses espèces d'*Eucalyptus*. L'extrait brut hydrométhanolique possède le rendement le plus important, suivi de près par l'extrait brut aqueux (**Sekkal, 2025**).

L'étude phytochimique des extraits aqueux et hydroéthanolique réalisés à partir des feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis* a mis en évidence la présence de tanins dans les deux types d'extraits. Cette constatation indique que ces composés phénoliques ont une affinité notable tant pour l'eau que pour le mélange hydroéthanolique. Les tanins sont réputés pour leur pouvoir antioxydant, découlant principalement de leur aptitude à donner des électrons ou des atomes d'hydrogène pour neutraliser les espèces réactives de l'oxygène. **Nguyen et ses collaborateurs en (2020)** ont présenté des observations analogues, corroborant la détection de tanins comme l'un des principaux métabolites secondaires présents dans les feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis* et reliant leur présence à l'activité antioxydante de cette plante.

Plusieurs études précédentes se sont accordées sur le fait que des flavonoïdes sont présents dans les extraits aqueux et hydroéthanoliques d'*Eucalyptus camaldulensis*. Selon **Anigboro et al. (2020)**, la qualité des flavonoïdes a été mise en lumière dans l'extrait aqueux des feuilles d'*E. camaldulensis*. De même, **Nguyen et al. (2020)** ont vérifié l'existence de ces métabolites secondaires dans les infusions à l'eau et à l'éthanol, l'infusion éthanolique ayant une concentration en flavonoïdes supérieure à celle de l'infusion aqueuse. Cette divergence peut être due à la polarité du mélange hydroalcoolique, qui facilite le prélèvement des éléments phénoliques et flavonoïdes. Les flavonoïdes, réputés pour leurs effets antioxydants, anti-inflammatoires et antimicrobiens, pourraient participer aux actions biologiques observées chez *Eucalyptus camaldulensis*.

L'extrait hydroéthanolique d'*Eucalyptus camaldulensis* a révélé la présence d'alcaloïdes lors du criblage phytochimique, alors que l'extrait aqueux n'en contenait aucun. On peut

attribuer cette variation à la capacité supérieure du mélange hydroéthanolique à extraire certains métabolites secondaires, en raison de sa polarité intermédiaire. Ces résultats concordent avec ceux rapportés par **Sani et al. (2014)**, qui ont également mis en évidence la présence d'alcaloïdes dans les extraits éthanoliques, tandis qu'aucune détection n'a été observée dans les extraits aqueux de cette espèce. De plus, divers facteurs peuvent affecter la variabilité de la composition phytochimique, dont le lieu d'origine de la plante, les conditions écologiques et la technique d'extraction employée. La présence d'alcaloïdes dans l'extrait hydroéthanolique pourrait participer aux qualités biologiques attribuées à l'*Eucalyptus camaldulensis*, prenant en compte le grand éventail d'activités pharmacologiques reconnues pour cette plante.

La détection des quinones dans les extraits hydroéthanoliques et aqueux d'*Eucalyptus camaldulensis* est conforme aux informations littéraires indiquant la présence de cette catégorie de métabolites secondaires au sein de cette espèce (**Nguyen et al., 2021**). Les quinones sont connues pour leurs multiples activités biologiques, y compris leurs vertus antimicrobiennes et antioxydantes. Leur identification dans ces deux extraits témoigne d'une extractibilité efficace avec les solvants employés et pourrait expliquer les activités biologiques observées chez *Eucalyptus camaldulensis*.

La détection des saponines dans les extraits aqueux et hydroéthanoliques d'*Eucalyptus camaldulensis* est en accord avec les travaux de **Sani et al. (2014)**, qui avaient également identifiant ces composés dans les extraits aqueux et éthanoliques de cette même espèce.

Notre étude, qui a révélé l'absence d'anthraquinones dans les extractions aqueuses et hydroéthanoliques d'*Eucalyptus camaldulensis*, concorde avec les résultats de **Shayoub et al. (2015)** qui ont aussi signalé une absence totale de ces composés dans les extraits de feuilles de cette variété. Il se pourrait que ce manque soit dû à la faible concentration naturelle d'anthraquinones dans *Eucalyptus camaldulensis*, ou à des fluctuations associées à la provenance de la plante, aux conditions écologiques et aux techniques d'extraction mises en œuvre.

L'extrait hydroéthanolique d'*Eucalyptus camaldulensis* contient une concentration en polyphénols totaux et en flavonoïdes (**9574,40±0,007µg EAG/ g ES** et **358,12±0,007µg EQC/ g ES**) supérieure à celle de l'extrait aqueux (**5762,53± 0,025µg EAG/ g ES** et **208,125±0,006µg EQC/g ES**). Cette variation peut être due à l'efficacité de l'association eau-éthanol, dont la polarité intermédiaire stimule l'extraction d'un large éventail de composés phénoliques. Effectivement, l'éthanol facilite la dissolution des molécules phénoliques faiblement polaires tout en préservant la propriété de l'eau à extraire les substances les plus polaires.

Ces observations rejoignent celles de **Nguyen et al. (2020)**, qui ont signalé que les extraits hydroalcooliques d'*Eucalyptus camaldulensis* contiennent plus de polyphénols et de flavonoïdes que les extraits aqueux.

De nombreux travaux ont établi un lien entre la quantité de composés phénoliques et l'activité antioxydante, les polyphénols et flavonoïdes ayant la capacité d'inactiver les radicaux libres grâce à leurs hydroxyles. Par conséquent, l'*Eucalyptus camaldulensis* est considéré comme une source significative de composés bioactifs possédant un potentiel antioxydant, selon les résultats rapportés par **Sekkal (2025)**, l'extrait brut hydrométhanolique présente les concentrations les plus importantes en polyphénols totaux, suivi par l'extrait aqueux. En revanche, ce dernier renferme la plus faible concentration en flavonoïdes parmi les extraits étudiés.

L'évaluation du potentiel antioxydant à l'aide de la technique de piégeage du radical libre DPPH^{*} a révélé que les deux extraits d'*Eucalyptus camaldulensis* ont une capacité à neutraliser les radicaux libres en fonction de leur concentration.

L'activité antioxydante de l'extrait hydroéthanolique a été plus marquée (**IC₅₀ = 0,995 mg/mL**) comparativement à celle de l'extrait aqueux (**IC₅₀ = 1,37 mg/mL**). Effectivement, un faible niveau d'IC₅₀ indique une grande aptitude à capturer les radicaux libres.

Ces observations concordent avec celles de **Nguyen et al. (2020)**, qui ont signalé une forte activité antioxydante des extractions d'*Eucalyptus camaldulensis*, liant cette propriété à leur richesse en composés phénoliques et en flavonoïdes. De même, **Trabolsi et al. (2021)** ont souligné l'énorme potentiel antioxydant des extraits d'*Eucalyptus*, attribué principalement à la présence de polyphénols aptes à céder des électrons ou des atomes d'hydrogène, ce qui permet de stabiliser les radicaux libres.

La supériorité de l'activité antioxydante notée pour l'extrait hydroéthanolique peut se justifier par sa concentration plus élevée en polyphénols globaux (**9574,40±0,007µg EAG/ µg ES**) et en flavonoïdes (**358,12±0,007µg EQC/ µg ES**) comparativement à l'extrait aqueux. La littérature a largement documenté la corrélation entre la présence de composés phénoliques et l'activité antioxydante. Cependant, l'activité des deux extraits reste inférieure de celle de l'acide ascorbique (**IC₅₀ = 0,12 mg/mL**), considéré comme référence du fait de son puissant pouvoir antioxydant.

L'évaluation du pouvoir réducteur du fer a révélé que les extraits aqueux et hydroéthanoliques d'*Eucalyptus camaldulensis* démontrent une activité antioxydante qui s'intensifie avec la concentration. Les EC₅₀ mesurées (**0,42 mg/mL** pour l'extrait aqueux et **0,47**

mg/mL pour l'extrait hydroéthanolique) témoignent d'une forte capacité à réduire les ions ferriques, même si elle reste inférieure à celle de l'acide ascorbique (**0,24 mg/mL**).

Cette activité est sans doute due à la présence de composés phénoliques et flavonoidiques, capables de transférer des électrons et de neutraliser les espèces oxydantes. La similarité des valeurs d'EC₅₀ entre les deux extraits indique que les substances à l'origine de cette activité se trouvent dans les deux.

Ces conclusions concordent avec celles de **Thuyet al. (2020)**, ayant démontré que les extraits de feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis* les plus riches en polyphénols totaux et flavonoïdes affichent les activités antioxydantes les plus fortes. Une liaison positive a été remarquée par les chercheurs entre le niveau de composés phénoliques et l'aptitude des extraits à neutraliser le radical DPPH[•] libre. Ils ont déterminé que les polyphénols et les flavonoïdes sont les principales substances à l'origine de l'activité antioxydante de cette espèce. Par conséquent, l'activité la plus favorable observée pour l'extrait hydroéthanolique dans notre analyse pourrait être attribuée à sa plus grande concentration en composés phénoliques et flavonoïdes. **Nasr et ses collègues (2019)** ont démontré que les extraits de feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis*, qui contiennent une grande quantité de composés phénoliques, possèdent une activité antioxydante significative. Les chercheurs ont noté une association positive entre la quantité de polyphénols, les tanins condensés et l'activité réductrice des extraits. Ils ont déterminé que les composés phénoliques ont un rôle prépondérant dans la réduction des ions ferriques et la neutralisation des espèces réactives de l'oxygène, en raison de leur aptitude à céder des électrons.

Conclusion générale

Conclusion

Cette recherche a révélé la diversité phytochimique et le potentiel antioxydant des feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis* en analysant deux sortes d'extraits : aqueux et hydroéthanolique.

Les résultats ont indiqué que l'extrait hydroéthanolique a un rendement d'extraction supérieur (8,681 %) par rapport à l'extrait aqueux (7,888 %), validant ainsi l'efficacité du mélange eau-éthanol pour l'extraction des métabolites bioactifs. L'analyse phytochimique a montré la présence de divers composés biologiquement actifs, tels que les tanins, flavonoïdes, quinones libres et saponines dans les deux extraits, alors que seuls les alcaloïdes et les terpénoïdes ont été identifiés dans l'extrait hydroéthanolique.

L'analyse des composés phénoliques a révélé une concentration plus élevée de polyphénols totaux et de flavonoïdes dans l'extrait hydroéthanolique (**9574,40±0,007µg EAG/ g ES et 358,12±0,007µg EQC/g ES**) comparativement à l'extraction aqueuse (**5762,53± 0,025µg EAG/g ES et 208,125±0,006µg EQC/g ES**), indiquant une efficacité supérieure dans l'extraction des composés phénoliques avec ce solvant.

Le test DPPH^{*} a démontré que les deux extraits possèdent une capacité à capturer les radicaux libres qui varie en fonction de la concentration, confirmant ainsi leur pouvoir antioxydant. L'activité la plus élevée a été observée avec l'extrait hydroalcoolique, qui a présenté une IC₅₀ de **0,995 mg/mL** comparativement à **1,37 mg/mL** pour l'extrait à base d'eau. Ceci est sans doute dû à sa forte teneur en composés phénoliques et flavonoïdes.

En ce qui concerne l'activité réductrice du fer, les deux extraits ont montré une activité réductrice significative avec des valeurs d'EC₅₀ assez proches (**0,42 mg/mL** pour l'extrait aqueux et **0,47 mg/mL** pour l'extrait hydroéthanolique), tout en étant légèrement inférieures à celle de l'acide ascorbique.

Pour résumer, les feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis* représentent une ressource naturelle prometteuse pour obtenir des composés bioactifs à haute valeur antioxydante. Globalement, l'extrait hydroéthanolique a démontré la meilleure performance, tant en matière de concentration en composés phénoliques que d'efficacité antioxydante. Ces données renforcent l'idée que cette espèce pourrait être une source précieuse d'antioxydants naturels à valoriser dans le secteur pharmaceutique, alimentaire et cosmétique. Cependant, des recherches supplémentaires axées sur la détermination précise des molécules actives et l'étude de leurs actions biologiques *in vivo* sont indispensables pour optimiser son potentiel thérapeutique.

Références Bibliographiques

A

- **Aleksic Sabo V, Knezevic P. (2019).** Antimicrobial activity of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. plant extracts and essential oils: A review. *Ind Crops Prod.* 2019 Jun; 132:413-429. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.02.051. PMID: 32288268; PMCID: PMC7126574.
- **Alhumaydhi, F. A., Hina, Y., & Khan, M. A. (2025).** Catalase Functions and Glycation: Their Central Roles in Oxidative Stress, Metabolic Disorders, and Neurodegeneration. *Catalysts*, 15(9), 817.
- **Amarowicz, R., Estrella, I., Hernández, T., Robredo, S., Troszyńska, A., Kosińska, A., Pegg, R. B. (2010).** Free radical-scavenging capacity, antioxidant activity, and phenolic composition of green lentil (*Lens culinaris*). *Food chemistry*, 121(3), 705-711.
- **Amarowicz, R., & Pegg, R. B. (2024).** Condensed tannins—Their content in plant foods, changes during processing, antioxidant and biological activities. *Advances in food and nutrition research*, 110, 327-398.
- **Anigboro, A. A., Avwioroko, O. J., & Cholu, C. O. (2020).** Phytochemical constituents, antimalarial efficacy, and protective effect of *Eucalyptus camaldulensis* aqueous leaf extract in plasmodium berghei-infected mice. *Preventive nutrition and food science*, 25(1), 58.
- **Anwar, S., Alharbi, H. O. A., Babiker, A. Y., & Rahmani, A. H. (2026).** Oxidative Stress in Health and Disease: Mechanisms and Therapeutic Perspectives. *International Journal of Molecular Sciences*, 27(6), 2681.
- **Álvarez, X., Cancela, Á., Merchán, Y., & Sánchez, Á. (2021).** Anthocyanins, phenolic compounds, and antioxidants from extractions of six eucalyptus species. *Applied Sciences*, 11(21), 9818.

B

- **Baghli, F. Z., & Iles, M. (2024).** Contribution à l'étude de l'activité antioxydante des extraits de *Zingiber officinale* [Mémoire de master, Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers].
- **Barboucha, G., Rahim, N., Boulebd, H., Bramki, A., Andolfi, A., Salvatore, M. M., & Masi, M. (2024).** Chemical Composition, In Silico Investigations and Evaluation of Antifungal, Antibacterial, Insecticidal and Repellent Activities of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. Leaf Essential Oil from ALGERIA. *Plants*, 13(22), 3229.

- **Bas, T. G. (2026).** Dietary Polyphenols (Flavonoids) Derived from Plants for Use in Therapeutic Health: Antioxidant Performance, ROS, Molecular Mechanisms, and Bioavailability Limitations. *International Journal of Molecular Sciences*, 27(3), 1404.
- **Benlazar, H. (2024).** Effet des huiles essentielles extraites de deux plantes aromatiques sur la mortalité des larves de la pyrale *Plodia interpunctella* (Mémoire de maîtrise inédit). Université de Tlemcen.
- **Ben Miri Y. (2025).** Essential Oils: Chemical Composition and Diverse Biological Activities: A Comprehensive Review. *Natural Product Communications*, 20(1). doi:10.1177/1934578X241311790
- **Brihmat, L., & Djouablia, M. (2019).** Contribution à une étude phytochimique et une évaluation des activités biopharmacologiques de deux plantes cultivées dans l'Est Algérien (Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri Constantine 1, Algérie).

C

- **Câmara, J. S., Perestrelo, R., Ferreira, R., Berenguer, C. V., Pereira, J. A., & Castilho, P. C. (2024).** Plant-derived terpenoids: A plethora of bioactive compounds with several health functions and industrial applications—A comprehensive overview. *Molecules*, 29(16), 3861.
- **Chen, S., Wang, X., Cheng, Y., Gao, H., & Chen, X. (2023).** A review of classification, biosynthesis, biological activities and potential applications of flavonoids. *Molecules*, 28(13), 4982.

D

- **Da Silva, R. M. G., Kacew, S., & Granero, F. O. (2024).** Saponins: A class of bioactive natural products with wide applications in human health. *Studies in Natural Products Chemistry*, 82, 185-233.
- **De la Lastra, J. M. P., Andrés, C. M. C., Munguira, E. B., Juan, C. A., & Pérez-Lebeña, E. (2026).** Pathophysiology of reactive oxygen species (ROS). *Archives of Toxicology*, 1-39.
- **Djeblahi M. (2021).** Évaluation in vitro des activités antioxydante, antidiabétique et anti-Alzheimer des extraits naturels d'une plante de la famille des Apiaceae, Mémoire de master. Université de M'Sila.
- **Dong, M., Ming, X., Xiang, T., Feng, N., Zhang, M., Ye, X., ... & Wu, Q. (2024).** Recent research on the physicochemical properties and biological activities of quinones

and their practical applications: A comprehensive review. *Food & Function*, 15(18), 8973-8997.

- **Dulo, B., Phan, K., Githaiga, J., Raes, K., & De Meester, S. (2021).** Natural quinone dyes: A review on structure, extraction techniques, analysis and application potential. *Waste and Biomass Valorization*, 12(12), 6339-6374.

E

- **Eberhardt, M. V., Lee, C. Y., & Liu, R. H. (2000).** Antioxidant activity of fresh apples. *Nature*, 405(6789), 903-904.
- **El-Haoud H., Boufellous M., Berrani A., Tazougart H., Bebgueddour R. (2018).** Screening phytochimique d'une plante medicinale: *Mentha spicata* L., *American journal of innovative research and applied sciences*, 7 :226-233.
- **Elshafie, H. S., Camele, I., & Mohamed, A. A. (2023).** A comprehensive review on the biological, agricultural and pharmaceutical properties of secondary metabolites based-plant origin. *International journal of molecular sciences*, 24(4), 3266.
- **Ewansiha, J. U., Fori, A., Dahiru, U., & Ijabani, E. (2024).** Antibacterial Potentials and Phytochemical Screening of *Eucalyptus globulus* Leaves Extract against Selected Isolates. *Sahel Journal of Life Sciences FUDMA*, 2(3), 98-103.
- **Ez-Zriouli, R., ElYacoubi, H., Imtara, H., Mesfioui, A., ElHessni, A., Al Kamaly, O., Zuhair Alshawwa, S., Nasr, F. A., Benziane Ouaritini, Z., & Rochdi, A. (2023).** Chemical Composition, Antioxidant and Antibacterial Activities and Acute Toxicity of *Cedrus atlantica*, *Chenopodium ambrosioides* and *Eucalyptus camaldulensis* Essential Oils. *Molecules*, 28(7), 2974.

F

- **Finkel, T., & Holbrook, N. J. (2000).** Oxidants, oxidative stress and the biology of ageing. *Nature*, 408(6809), 239-247.
- **Flieger, J., Flieger, W., Baj, J., & Maciejewski, R. (2021).** Antioxidants: Classification, natural sources, activity/capacity measurements, and usefulness for the synthesis of nanoparticles. *Materials*, 14(15), 4135.
- **Fournier, J. (2001).** Découverte des alcaloïdes. Des marqueurs pour l'histoire de la chimie organique. *Revue d'histoire de la pharmacie*, 89(331), 315-332.

G

- **Gao, Q., Jiang, L., Sun, Y., An, X., Sun, W., Tang, S., ... & Lian, F. (2025).** Oxidative stress: from molecular studies to clinical intervention strategies. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 12, 1638042.
- **Gardès-Albert M., Bonnefont-Rousselot D., Abedinzadeh Z., Jore D. (2003).** Espèces réactives de l'oxygène, Comment l'oxygène peut-il devenir toxique, mécanismes biochimiques, 5 :91-96.
- **Ghareeb, M. A., Habib, M. R., Mossalem, H. S., & Abdel-Aziz, M. S. (2018).** Phytochemical analysis of *Eucalyptus camaldulensis* leaves extracts and testing its antimicrobial and schistosomicidal activities. *Bulletin of the National Research Centre*, 42(1), 16.
- **Ghedira K ; Goetz P ; Le jeune R. (2008).** *Eucalyptus globulus* labill, monographie médicalisé *Phytotherapie* 6 : 197-200.
- **Gulcin, İ. (2025).** Antioxidants: a comprehensive review. *Archives of toxicology*, 99(5), 1893-1997.
- **Gutteridge, J.M.C. (1993).** Free radicals in disease processes: a compilation of cause and consequence. *Free Radical Research Communications*, 19, 141-158.

H

- **Haj Moussa, H., Sara, B., Benhalima, H., Benaliouche, F., Sbartaï, I., & Sbartaï, H. (2025).** Chemical characterization of *Eucalyptus* (*Eucalyptus globulus*) leaf essential oil and evaluation of its antifungal, antibacterial and antioxidant activities: Biological activities of *Eucalyptus* essential oil. *Cellular and Molecular Biology*, 70(12), 1–9.
- **Hamza, H., Lalmi, I., & Rasenadja, D. (2023).** Propriétés antimicrobiennes d'un *Eucalyptus* algérien et formulation d'un gel hydroalcoolique (Mémoire de master en toxicologie). Université Salah Bounider Constantine 3.
- **Haoulia A. (2015).** Test phytochimiques, dosage et recherche d'effet hémolytique des polyphénols totaux extraits de la partie aérienne d'*Ammodendron verticillata*., Mémoire de master. Université de Tlemcen.
- **Harborne, J. B. (1997).** Recent advances in chemical ecology. *Natural product reports*, 14(2), 83-98.
- **He, F., Pan, Q. H., Shi, Y., & Duan, C. Q. (2008).** Biosynthesis and genetic regulation of proanthocyanidins in plants. *Molecules*, 13(10), 2674-2703.

J

- **Jomova, K., Raptova, R., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H., Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2023).** Reactive oxygen species, toxicity, oxidative stress, and antioxidants: chronic diseases and aging. *Archives of toxicology*, 97(10), 2499-2574.
- **Jomova, K., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H., Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2024).** Several lines of antioxidant defense against oxidative stress: antioxidant enzymes, nanomaterials with multiple enzyme-mimicking activities, and low-molecular-weight antioxidants. *Archives of toxicology*, 98(5), 1323-1367.

K

- **Kamatou, GPP, Van Zyl, RL, Van Vuuren, SF, Figueiredo, AC, Hubert, A and Dorota Kr (2017).** Food Preservatives from Plants. Chapter 3, Food Additives, Edited by Desiree Nedra.
- **Khedhri, S., Polito, F., Caputo, L., De Feo, V., Khamassi, M., Kochti, O., Hamrouni, L., Mabrouk, Y., Nazzaro, F., Fratianni, F., & Amri, I. (2023).** Chemical Composition, Antibacterial Properties, and Anti-Enzymatic Effects of Eucalyptus Essential Oils Sourced from Tunisia. *Molecules*, 28(20), 7211.
- **Kheroua, M. (2015).** Étude phytochimique et activité antioxydante des extraits bruts d'une microalgue (*Encyonema* sp.) récoltée de la station de filtration d'eau de Bouhlou [Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, des Sciences de la Terre et de l'Univers].
- **Kleinrichert K., Bindhu A. (2019).** Comparative analysis of antioxidant and anti-amyloidogenic properties of various polyphenol rich phytoceutical extracts, *Antioxidants*, 10 :1-11.
- **Krishnamurthy, H. K., Pereira, M., Rajavelu, I., Jayaraman, V., Krishna, K., Wang, T., Rajasekaran, J. J. (2024).** Oxidative stress: fundamentals and advances in quantification techniques. *Frontiers in Chemistry*, 12, 1470458.

L

- **Liu, S., Liu, J., Wang, Y., Deng, F., & Deng, Z. (2025).** Oxidative stress: signaling pathways, biological functions, and disease. *MedComm*, 6(7), e70268.
- **Lobo, V., Patil, A., Phatak, A., & Chandra, N. (2010).** Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy reviews*, 4(8), 118.
- **Lykkesfeldt, Jens, & Carr, Anitra C. (2024).** Vitamin C. *Advances in Nutrition*, 15(1), Article 100155.

M

- **Meksem Nabila (2018).** Thèse de doctorat. Etude de l'effet Biopesticide des extraits naturels de deux plantes de la famille des Myrtacées : *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus camaldulensis*.
- **Mihaylova, R., Elincheva, V., Momekov, G., & Simeonova, R. (2025).** Unlocking the Therapeutic Potential of Ellagitannins: A Comprehensive Review of Key Representatives. *Molecules*, 30(22), 4328.
- **Molnar, M., Jakovljević Kovač, M., & Pavić, V. (2024).** A comprehensive analysis of diversity, structure, biosynthesis and extraction of biologically active tannins from various plant-based materials using deep eutectic solvents. *Molecules*, 29(11), 2615.
- **Muscolo, A., Mariateresa, O., Giulio, T., & Mariateresa, R. (2024).** Oxidative stress: the role of antioxidant phytochemicals in the prevention and treatment of diseases. *International journal of molecular sciences*, 25(6), 3264.
- **Mustafa, Y. F. (2025).** Coumarins from nature to nurture: a sustainable resource for drug discovery and beyond. *Appl Chem Eng*, 8(2), 5676.

N

- **Nasr, A., Saleem Khan, T., & Zhu, G. P. (2019).** Phenolic compounds and antioxidants from *Eucalyptus camaldulensis* as affected by some extraction conditions, a preparative optimization for GC-MS analysis. *Preparative biochemistry & biotechnology*, 49(5), 464-476.

O

- **OMS (Organisation mondiale de la Santé) (2013).** Stratégie de l'OMS pour la médecine traditionnelle pour 2014-2023. Genève. Organisation mondiale de la Santé.

P

- **Palazon, J., & Alcalde, M. A. (2025).** Secondary Metabolites in Plants. *Plants*, 14(14), 2146.
- **Pan, Y., Wang, K., Huang, S., Wang, H., Mu, X., He, C., Huang, F. (2008).** Antioxidant activity of microwave-assisted extract of longan (*Dimocarpus Longan* Lour.) peel. *Food chemistry*, 106(3), 1264-1270.

- **Polito, F., Kouki, H., Khedhri, S., Hamrouni, L., Mabrouk, Y., Amri, I., Nazzaro, F., Fratianni, F., & De Feo, V. (2022).** Chemical Composition and Phytotoxic and Antibiofilm Activity of the Essential Oils of *Eucalyptus bicostata*, *E. gigantea*, *E. intertexta*, *E. obliqua*, *E. pauciflora* and *E. tereticornis*. *Plants*, 11(22), 3017.
- **Powers, S. K., Ji, L. L., Kavazis, A. N., & Jackson, M. J. (2011).** Reactive oxygen species: impact on skeletal muscle. *Comprehensive physiology*, 1(2), 941-969.

R

- **Ren, Y., Li, J., & Dai, X. (2026).** Reactive oxygen species in health and disease. *Molecular Biomedicine*, 7(1), 30.

S

- **Sabo, V. A., & Knezevic, P. (2019).** Antimicrobial activity of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. plant extracts and essential oils: A review. *Industrial crops and products*, 132, 413-429.
- **Saini, N., Anmol, A., Kumar, S., Wani, A. W., Bakshi, M., & Dhiman, Z. (2024).** Exploring phenolic compounds as natural stress alleviators in plants-a comprehensive review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 133, 102383.
- **Samarth, R. M., Panwar, M., Kumar, M., Soni, A., Kumar, M., & Kumar, A. (2008).** Evaluation of antioxidant and radical-scavenging activities of certain radioprotective plant extracts. *Food chemistry*, 106(2), 868-873.
- **Sani, I., Abdulhamid, A., Bello, F., & Fakai, I. M. (2014).** *Eucalyptus camaldulensis*: Phytochemical composition of ethanolic and aqueous extracts of the leaves, stem-bark, root, fruits and seeds. *Journal of scientific and innovative Research*, 3(5), 523-526.
- **Sekkal, H. D. (2025).** Évaluation du pouvoir antibiofilm de *Eucalyptus camaldulensis* [Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et des Sciences de la Terre et de l'Univers].
- **Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015).** Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects—A review. *Journal of Functional Foods*, 18, 820-897.
- **Sharma, V., Ankita, Karnwal, A., Sharma, S., Kamal, B., Jadon, V. S., Gupta, S., & Sivanasen, I. (2023).** A Comprehensive Review Uncovering the Challenges and Advancements in the In Vitro Propagation of Eucalyptus Plantations. *Plants*, 12(17), 3018.

- **Shayoub, M. E. H., Dawoud, A., Abdelmageed, M. A. M., Ehassan, A. M., Ehassan, A. M. (2015).** Phytochemical analysis of leaves extract of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. Omdurman Journal of Pharmaceutical Science, 2(1), 64–72.
- **Sies, H. (1991).** Oxidative stress: from basic research to clinical application. The American journal of medicine, 91(3), S31-S38.
- **Stefanachi, A., Leonetti, F., Pisani, L., Catto, M., & Carotti, A. (2018).** Coumarin: A natural, privileged and versatile scaffold for bioactive compounds. Molecules, 23(2), 250.

T

- **Tamuly, C., Hazarika, M., Bora, J., & Gajurel, P. R. (2014).** Antioxidant Activities and Phenolic Content of *Piper wallichii* (Miq.) Hand.-Mazz. International journal of food properties, 17(2), 309-320.
- **Tang, H., Wang, Q., Xie, H., & Li, W. (2024).** The function of secondary metabolites in resisting stresses in horticultural plants. Fruit Research, 4(1).
- **Thuy, N. V., Tien, N. M., Quy, N. N., Cang, M. H., QUAN, P., BUI, L., Muoi, N. V. (2020).** Preliminary chemical, total polyphenol, total flavonoid contents and antioxidant activity of *eucalyptus camaldulensis* dehnh. Asian Journal of Chemistry, 32(5), 1230-1234.
- **Tong Zhao, Xinyu He, Xia Yan, Huijuan Xi, Yiting Li, Xingbin Yang (2024).** Recent advances in the extraction, synthesis, biological activities, and stabilisation strategies for β -carotene: a review. International Journal of Food Science and Technology, 59(4), 2136–2147.
- **Trabolsi, C., Takash Chamoun, W., Hijazi, A., Nicoletti, C., Maresca, M., & Nasser, M. (2021).** Study of neuroprotection by a combination of the biological antioxidant (eucalyptus extract) and the antihypertensive drug candesartan against chronic cerebral ischemia in rats. Molecules, 26(4), 839.

V

- **Vincken, J. P., Heng, L., de Groot, A., & Gruppen, H. (2007).** Saponins, classification and occurrence in the plant kingdom. Phytochemistry, 68(3), 275-297.

W

- **Wang, X., Xin, J., Sun, L., Sun, Y., Xu, Y., Zhao, F., Liu, S. (2024).** Exploring the biomedical potential of terpenoid alkaloids: Sources, structures, and activities. Molecules, 29(9), 1968.
- **Wink, M. (2015).** Modes of action of herbal medicines and plant secondary metabolites. Medicines, 2(3), 251-286.

Y

- **Yip, S. C., Ho, L. Y., Wu, T. Y., & Sit, N. W. (2024).** Chemical composition and bioactivities of Eucalyptus essential oils from selected pure and hybrid species: A review. *Industrial Crops and Products*, 222, 120118.

Z

- **Zbadi R., Mohti H., Moussaoui F. (2018).** Stress oxydatif : évaluation du pouvoir antioxydant de quelques plantes médicinales, *Médecine translationnelle*, 24(2) :134-141.
- **Zhang, X., Yang, H., Zhou, X., Xu, J., Chen, J., Liao, L., Duan, X. (2025).** Potential benefits of vitamin A and its derivatives in glaucoma. *European Journal of Medical Research*, 30(1), 527.
- **Zhuang, W. B., Li, Y. H., Shu, X. C., Pu, Y. T., Wang, X. J., Wang, T., Wang, Z. (2023).** The classification, molecular structure and biological biosynthesis of flavonoids, and their roles in biotic and abiotic stresses. *Molecules*, 28(8), 3599.