

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة عمار تليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT
كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES
قسم البيولوجيا
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Sciences Biologiques

Option : Biochimie appliquée

Thème

Une méta-analyse de l'activité antioxydante des composés phénoliques de
quelques plantes de la famille des chénopodiacées

Présenté par :

- CHOUIREB Imane
- GHOUNI Fatima

Soutenu publiquement le 27/06/2024 devant les Membres de jury :

Mr. SIFI Ibrahim	MCA	Président
Mr. YUCEFI Mostafa	MCB	Examineur
Mr. BOUBRIMA Youcef	MAA	Rapporteur

Année Universitaire : 2023/2024

Résumé : Le but de ce travail est d'explorer et d'analyser l'activité antioxydante des composants phénoliques des plantes de la famille des Chenopodiaceae. Les extraits phénoliques des espèces *Beta vulgaris* L., *Chenopodium album* L., *Chenopodium quinoa* Willd., *Atriplex halimus* L., et *Hammada scoparia* montrent une activité antioxydante significative, mesurée par les tests DPPH, ABTS, FRAP et CUPRAC. Ces composés phénoliques peuvent jouer un rôle clé dans la prévention du stress oxydatif et des maladies associées, comme les maladies cardiovasculaires et certains cancers, suggérant leur potentiel pour améliorer la santé humaine et promouvoir un mode de vie sain.

Les mots clés : l'activité antioxydante - composants phénoliques - Chenopodiaceae - stress oxydatif - les mécanismes d'extraction.

Summary: The aim of this work is to explore and analyze the antioxidant activity of phenolic compounds from plants of the Chenopodiaceae family. The phenolic extracts from *Beta vulgaris* L., *Chenopodium album* L., *Chenopodium quinoa* Willd., *Atriplex halimus* L., and *Hammada scoparia* show significant antioxidant activity, measured by DPPH, ABTS, FRAP, and CUPRAC assays. These phenolic compounds can play a key role in preventing oxidative stress and associated diseases, such as cardiovascular diseases and certain cancers, suggesting their potential to improve human health and promote a healthy lifestyle.

Keywords: antioxidant activity - phenolic compounds - Chenopodiaceae - oxidative stress - extraction mechanisms.

ملخص : الهدف من هذا العمل هو استكشاف وتحليل النشاط المضاد للأكسدة للمركبات الفينولية من نباتات عائلة القطيفية (Chenopodiaceae). تظهر المستخلصات الفينولية من *Beta vulgaris* L., *Chenopodium album* L., *Chenopodium quinoa* Willd., *Atriplex halimus* L., و *Hammada scoparia* نشاطاً مضاداً للأكسدة بشكل كبير، وذلك وفقاً للاختبارات DPPH، ABTS، FRAP و CUPRAC. يمكن أن تلعب هذه المركبات الفينولية دوراً رئيسياً في الوقاية من الإجهاد التأكسدي والأمراض المرتبطة به، مثل أمراض القلب والأوعية الدموية وبعض أنواع السرطان، مما يشير إلى إمكاناتها في تحسين صحة الإنسان وتعزيز نمط حياة صحي.

الكلمات المفتاحية: النشاط المضاد للأكسدة - المكونات الفينولية - القطيفية - الإجهاد التأكسدي - آليات الاستخراج

Remerciement

Nous remercions ALLAH, Tout-Puissant, Maître des cieux et de la terre, qui nous a permis de mener à bien ce travail.

Tout d'abord, nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à notre encadrant, M. BOUBRIMA Youcef, qui nous a fait l'honneur de réaliser ce travail sous sa direction. Nous le remercions pour sa grande patience, sa disponibilité et ses conseils judicieux.

Nous remercions également Mr. SIFI Ibrahim d'avoir accepté de présider le jury.

Nous remercions Mr. YUCEFI Mostafa d'avoir accepté de juger ce modeste travail et de participer au jury.

Nous remercions également tous nos enseignants pour leur soutien tout au long de nos années d'études.

Enfin, nos remerciements vont à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci infiniment.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mon très cher père

Ma très chère mère

Mes chers frères et sœurs

A mes meilleures amies : Safa , Leïla , Djourí

Imane

Dédicace

En premier lieu je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail

Je dédie ce travail :

À ma chère mère Kheira , qui a joué un grand rôle dans mon parcours et ma réussite. Je te dédie, ô trésor de ma vie, ce travail en hommage à toi, à tes efforts, ton soutien et tes conseils tout au long de mes études.

À mon cher père Salem, grâce à qui je suis ce que je suis aujourd'hui et j'ai atteint ce que je voulais grâce à son soutien dans toutes les circonstances.

À mes frères Mohammed, Ahmed, Hamza et à mes belles sœurs Fadhila, Hanane et Siham qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager à toujours donner le meilleur.

À mon beau-frère Abderrahmane pour son aide et ses conseils.

Et à ma chère amie Dalil Abir qui n'a pas hésité à partager ses connaissances et son savoir avec moi au fil des années.

À mon binôme IMANE de m'avoir partagé ce travail, nous avons partagé d'agréable moments inoubliables tout au long de notre cursus universitaire

Aux petits de la famille : Abdennour, Islam, Layan, Cham, Salem.

À toute la famille Ghouini et Zerguin, je vous dédie ce travail.

Sommaire

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des abréviations

Introduction 1

Chapitre I : Présentation des espèces Chénopodiacées étudiées

I. Famille des Chénopodiacées / Amaranthacées 3

I.1. Description et Caractéristiques 3

I.1.1. Taxonomie 4

I.1.2. Morphologie 4

I.1.3. Genres les plus connus 4

I.2. Présentation des espèces de chénopodiacées étudiées 5

I.2.1. *Beta vulgaris* L 5

I.2.2. *Chenopodium album* L 8

I.2.3. *Chenopodium quinoa* Willd 10

I.2.4. *Atriplex halimus* L 13

I.2.5. *Hammada scoparia* 16

Chapitre II : Généralités sur les Composés Phénoliques

II. Généralités sur les Composés Phénoliques 19

II.1. Introduction sur les métabolites secondaires 19

II.2. Définition des composés phénoliques 19

II.2.1. Composés phénoliques dans la plante 20

II.2.2. Répartition cellulaire, tissulaire dans les différents organes de la plante 20

II.2.3. Les rôles des polyphénols dans le métabolisme de la plante 21

II.2.4. Facteurs influençant la teneur des plantes en composés phénoliques 22

II.3. Principales formes et classes des composés phénoliques 23

II.3.1. Les formes simples 23

II.3.2. Phénols simples 23

II.3.3. Formes condensées 28

II.4. Biosynthèse des composés phénoliques 28

II.5. Propriétés des composés phénoliques 29

II.5.1. Propriétés physicochimiques 29

II.6. Activité antioxydante des composés phénoliques 30

Sommaire

II.7. Activité anti-inflammatoire	31
II.8. Activité antibactérienne	31
II.9. Activité anticancéreuse	31

Chapitre III : Généralités sur l'activité antioxydante

III. Généralités sur l'activité antioxydante	33
III.1. Introduction.....	33
III.2. Définition de L'activité antioxydante	33
III.3. Le stress oxydatif	33
III.4. Les Radicaux libres	34
III.5. Les espèces réactives	35
III.6. Les mécanisme de protection et élimination de ROS (EOA) dans l'organisme	36
III.7. Classification des antioxydants	37
III.7.1. Les antioxydants naturels.....	37
III.7.2. Les antioxydants synthétiques	38

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV. Matériels et méthodes.....	39
IV.1. L'Approche de la méta-analyse	39
IV.3. Matériel.....	40
IV.4. Méthodes.....	40
IV.4.1. Extraction.....	40
IV.4.2. Quantification des polyphénols totaux	45
IV.4.3. Evaluation de l'activité antioxydant <i>in vitro</i>	46
IV.4.4. Pourquoi observe-t-on une couleur particulière dans une réaction chimique antioxydant-oxydant ?.....	49
IV.5. Tests utilisés pour évaluer l'activité antioxydante	50
IV.5.1. Test de capacité de piégeage des radicaux 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH)	50
IV.5.2. L'activité de piégeage du radical ABTS	51
IV.5.3. Pouvoir antioxydant réducteur d'ions ferriques (FRAP)	53
IV.5.4. Capacité antioxydante réductrice du cuivre (CUPRAC)	54

Chapitre V : Résultats et discussion

V. Résultats et discussion	56
V.1. Analyse visuelle des activités antioxydantes des composants phénoliques des plantes de la famille des chénopodiacées	56
V.1.1. Analyse des parties de la plante utilisée	56

Sommaire

V.1.2. Analyse des Méthodes d'Extraction Utilisée	58
V.1.3. Analyse des Solvants Utilisés pour l'Extraction des Composants Phénoliques	61
V.1.4. Analyse de l'utilisation des polyphénols dans l'évaluation de l'activité antioxydante	63
V.1.5. Analyse des Tests d'Évaluation de l'Activité Antioxydante	65
V.1.6. Analyse des Activités Biologiques des Composés Phénoliques chez les Chénopodiacées	67
Conclusion et Perspectives	70
Références Bibliographiques	71
Annexe : Données de l'analyse statistique	

Liste des tableaux

<i>Tableau</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
II.1	Principaux acides hydroxybenzoïques	23
II.2	Principaux acides hydroxycinnamiques	24
II.3	Tableau: Principaux types de coumarines	24
II.4	Principales classes des flavonoïdes	26
II.5	Activités biologiques de quelques composés phénoliques	30
III.1	Principales sources de production des radicaux libres.	35
III.2	Représentation générale sur les activateurs et les inhibiteurs	37
IV.1	Différentes techniques utilisées pour mesurer l'activité antioxydante .	49

Table des figures

<i>Figure</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
I.1	Illustration botanique vintage de deux plantes de la famille des Amaranthacées (anciennement Chénopodiacées).	3
I.2	Carte de distribution mondiale de la famille des Amaranthacées (anciennement Chénopodiacées).	5
I.3	Découverte des éléments constitutifs de Beta vulgaris.	6
I.4	Carte de distribution mondiale de Beta vulgaris L.	7
I.5	Morphologie du Chenopodium album L	9
I.6	Carte de distribution mondiale de Chenopodium album L.	9
I.7	Morphologie du Chenopodium quinoa Willd.	11
I.8	Carte de distribution mondiale de Chenopodium quinoa Willd.	12
I.9	Morphologie du Atriplex halimus L.	14
I.10	Carte de distribution mondiale de Atriplex halimus L.	15
I.11	Morphologie du Hammada scoparia	17
I.12	Carte de distribution mondiale de Hammada scoparia.	17
II.1	Structure du phénol (noyau aromatique).	20
II.2	Structure générale des composés flavonoïdes.	27
II.3	Structure du phénol et d'un polyphénol (L'acide ellagique).	29
II.4	Pouvoir antioxydant des polyphénols.	31
III.1	La formation d'un radical libre est provoquée par la perte d'un électron.	34
IV.1	Extracteur Soxhlet.	41

Table des figures

IV.2	L'extraction par solvant assistée par micro-ondes (ESMO).	42
IV.3	Représentation schématique du phénomène de cavitation acoustique.	43
IV.4	Les étapes constituant une extraction en phase solide .	43
IV.5	Schéma de l'appareil d'extraction de liquide sous pression (ELP).	45
IV.6	Test de Folin-Ciocalteu.	46
IV.7	Roue des couleurs.	50
IV.8	Mécanisme de réaction du 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH).	51
IV.9	Mécanisme de réaction du 2,20-azino-bis (acide 3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique) (ABTS).	52
IV.10	Mécanisme de réaction du pouvoir antioxydant réducteur ferrique (FRAP).	54
IV.11	Figure : Mécanisme de réaction de la capacité antioxydante réductrice du cuivre (CUPRAC).	55
V.1	Répartition des parties végétales utilisées dans les articles étudiés.	56
V.2	Répartition des méthodes d'extraction en laboratoire.	58
V.3	Répartition des solvants selon leur polarité et leur caractère Protique / Aprotique.	61
V.4	Répartition des types de polyphénols utilisés pour évaluer l'activité antioxydante.	63
V.5	Répartition des tests in Vitro pour l'évaluation des propriétés antioxydantes et biochimiques	65
V.6	Répartition des principales activités biologiques	67

Liste des abréviations

ROS	Reactive Oxygen Species (Espèces Réactives de l'Oxygène)
EOA	Enzyme Oxidative Antioxydant (Enzyme Antioxydante Oxydative)
ESMO	Extraction par Solvant Assistée par Micro-ondes
EAU	Extraction Assistée par Ultrasons
EPS	Extraction en Phase Solide
EFS	Extraction par Fluides Supercritiques
DPPH	2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl
ABTS	Acide 2,2'-azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)
FRAP	Ferric Reducing Antioxydant Power
CUPRAC	Cupric Ion Reducing Antioxydant Capacity
F-C	Folin-Ciocalteu
Na₂CO₃	Carbonate de Sodium
C18	Chaîne carbonée de 18 atomes
GHz	Gigahertz
kHz	Kilohertz

Introduction

Introduction

Les végétaux médicinaux jouent un rôle crucial dans la recherche pharmacologique et la fabrication de médicaments, non seulement lorsqu'ils sont utilisés directement comme agents thérapeutiques, mais aussi lorsqu'ils sont utilisés comme matières premières pour la production de médicaments ou comme modèles pour les composés pharmacologiquement actifs (Etame, 2018) , Elles renferment une multitude de substances antimicrobiennes et antioxydantes telles que les saponines, les tanins, les triterpénoïdes, les polyphénols et d'autres composés. (Kodjio *et al.*,2016).

Récemment, les herbes et les épices ont attiré l'attention en tant que sources d'antioxydants pouvant être utilisées pour se protéger contre les effets du stress oxydatif. (Mata *et al.*, 2007).

Le stress oxydatif se produit dans les cellules et les tissus des organismes vivants, où se produisent des processus oxydatifs et réducteurs. Cela est probablement dû à la génération d'espèces réactives de l'oxygène qui dépassent la capacité de neutralisation du système. (Halliwell, 1996).

L'étude des composés phénoliques, en particulier dans la famille des Chénopodiacées, se révèle être d'une importance significative. Les Chénopodiacées, une famille de plantes comprenant diverses espèces telles que les épinards, les betteraves et les quinoas, se distinguent par leur richesse en substances phénoliques (Kuti & Konuru, 2004; Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010). Cette caractéristique spécifique justifie la sélection de cette famille végétale pour explorer et comprendre les composés phénoliques et leur potentiel antioxydant.

Les raisons derrière le choix des Chénopodiacées sont multiples. Tout d'abord, la diversité au sein de cette famille offre une variété d'espèces pouvant être explorées pour leur teneur en substances phénoliques. De plus, ces plantes sont souvent cultivées et consommées par les êtres humains, ce qui souligne l'importance de comprendre comment les composés phénoliques présents dans ces cultures peuvent contribuer à la santé humaine (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010).

De ce fait, nous nous sommes intéressés à l'activité antioxydante des composés phénoliques de cinq plantes de la famille des Chénopodiacées, à savoir, *bêta vulgaris*, *Atriplex halimus L*, *Chenopodium album L*, *Chenopodium quinoa Willd* , *Hammada scoparia*, tout en essayant d'explorer les mécanismes sous-jacents à cette activité, mettant en relief leur impact potentiel sur la santé humaine et leur rôle dans la prévention des maladies.

L'objectif est d'approfondir notre compréhension des propriétés antioxydantes des Chénopodiacées, ouvrant ainsi la voie à des applications pratiques dans le domaine de la nutrition, de la médecine et de la promotion d'un mode de vie sain. L'étude est représentée par une synthèse quantitative d'articles scientifiques, qui combine les résultats de plusieurs études scientifiques indépendantes après avoir interrogé plusieurs bases de données (exple : PubMed, ResearchGate et Google Scholar). Notre mémoire est subdivisé en deux grandes parties : une partie bibliographique qui récapitule des données théoriques sur la famille des Chénopodiacées, les composés phénoliques et l'activité antioxydante. Une partie pratique qui est partagée en deux chapitres : matériel et méthodes utilisées au sein de ce travail, puis résultats et discussion. Enfin, le mémoire se termine par une conclusion et une liste de références bibliographiques.

Chapitre I : Présentation des espèces Chénopodiacées étudiées

I. Famille des Chénopodiacées / Amaranthacées

I.1. Description et Caractéristiques

Les Chénopodiacées forment une famille de plantes dicotylédones appartenant à l'ordre des Caryophyllales (Judd *et al.*, 2016). Cette famille regroupe environ 1500 espèces réparties dans 110 à 150 genres (Cronquist, 1981 ; Heywood *et al.*, 2007). Ce sont principalement des plantes herbacées annuelles ou vivaces, parfois ligneuses, souvent halophiles (adaptées aux milieux salés) (Heywood *et al.*, 2007).

NB : Les Chénopodiacées ne sont plus considérées comme une famille distincte. Au lieu de cela, ils sont désormais classés comme une sous-famille au sein de la famille plus large des Amaranthacées.

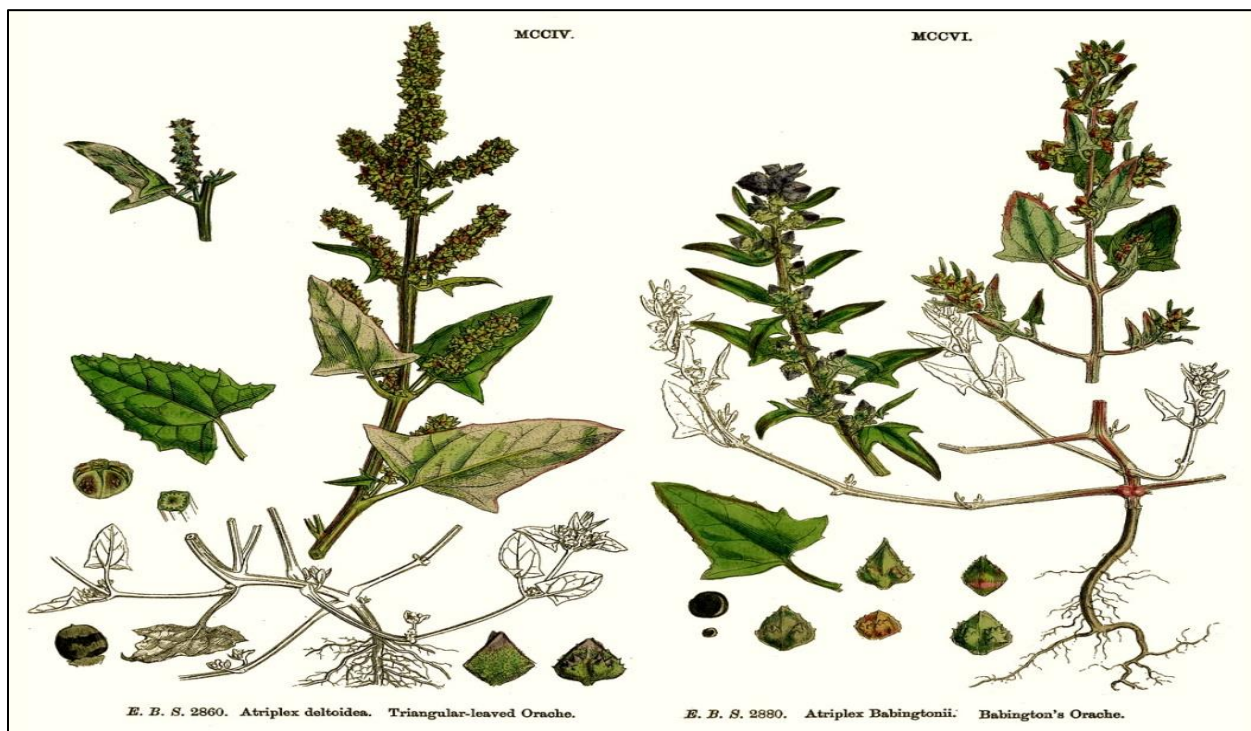


Figure I.1 : Illustration botanique vintage de deux plantes de la famille des Amaranthacées (anciennement Chénopodiacées). (Watson and Dallwitz, 1992).

I.1.1. Taxonomie (Judd et al., 2016)

- Règne: *Plantae*
- Sous-règne: *Tracheobionta*
- Division/Phylum: *Magnoliophyta*
- Classe: *Magnoliopsida*
- Ordre: *Caryophyllales*
- Famille: *Chenopodiaceae*

I.1.2. Morphologie

- **Habitus:** Herbacées annuelles ou vivaces, parfois ligneuses (Heywood et al., 2007).
- **Feuilles:** Simples, alternes, sans stipules, souvent charnues et succulentes (Judd et al., 2016 ; Stevens, 2001).
- **Fleurs:** Petites, souvent verdâtres ou rougeâtres, généralement hermaphrodites, rarement unisexuées (Heywood et al., 2007).
- **Périanthe:** Simple, à 5 (parfois 3-4) tépales soudés à la base (Judd et al., 2016).
- **Étamines:** En nombre égal ou inférieur aux tépales (Cronquist, 1981).
- **Ovaire:** Supère, uniloculaire, à un seul ovule (Heywood et al., 2007).
- **Fruit:** Sec, indéhiscent, souvent entouré du périanthe persistant (utricule) (Judd et al., 2016).

I.1.3. Genres les plus connus (Stevens, 2001).

Nom scientifique	Nom commun	Nom en arabe	Nom en dialecte algerien
Beta	Betterave	الشمندر	Betterave
Spinacia	Epinard	السبانخ	Alsajq
Chenopodium	Chénopode	السرمدق	Alzarbij
Atriplex	Arroche	القطف	Alqatf

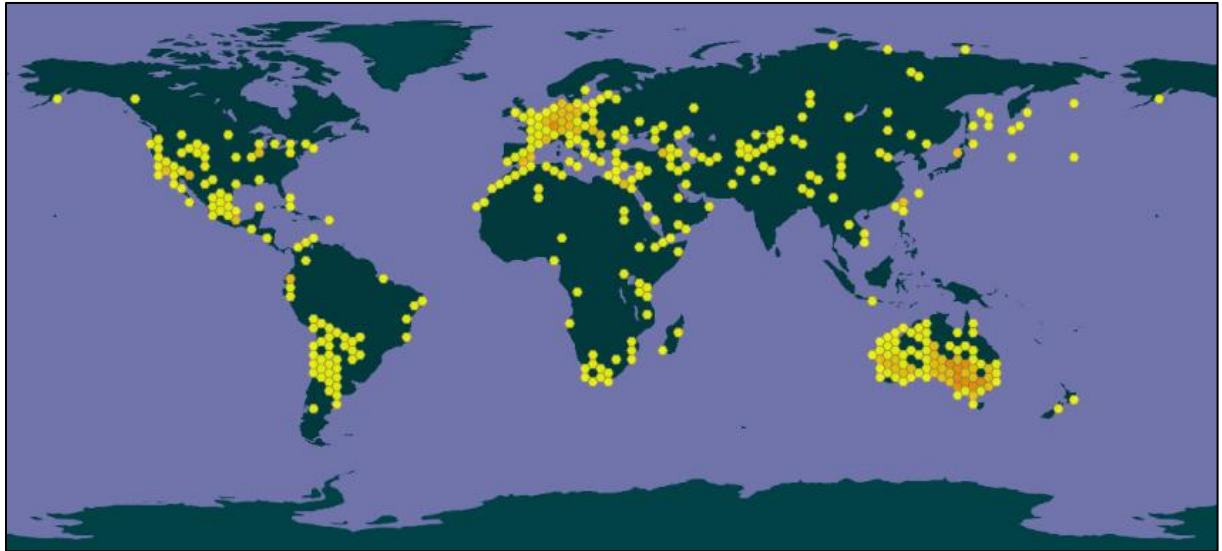


Figure I.2. : Carte de distribution mondiale de la famille des Amaranthacées (anciennement Chénopodiacées) .(<https://www.gbif.org/species/6719>)

Explication de la carte:

- *La carte représente la distribution géographique des espèces de la famille des Amaranthacées à travers le monde.*
- *Les zones en couleur indiquent les régions où les Amaranthacées sont présentes. L'intensité de la couleur correspond à la concentration d'espèces dans la région.*
- *Les zones grises représentent les régions où les Amaranthacées sont absentes ou très rares.*

I.2. Présentation des espèces de chénopodiacées étudiées

I.2.1. *Beta vulgaris* L

I.2.1.1. Taxonomie (<https://www.gbif.org/fr/species/8971274>)

- **Règne** : *Plantae*
- **Phylum** : *Tracheophyta*
- **Classe** : *Magnoliopsida*
- **Ordre** : *Caryophyllales*
- **Famille** : *Amaranthaceae*
- **Genre** : *Beta* L.
- **Espèce** : *Beta vulgaris* L

I.2.1.2. Caractéristiques botaniques

La betterave est une plante herbacée bisannuelle appartenant à la famille des Chénopodiacées (Chenopodiaceae) (Heywood *et al.*, 2007). C'est une espèce cultivée pour sa racine charnue comestible (Judd *et al.*, 2016).

- ✓ **Racine** : la partie comestible est une racine pivotante épaisse et charnue, pouvant atteindre 30 cm de long et 15 cm de diamètre (Cronquist, 1981 ; Heywood *et al.*, 2007).
- ✓ **Tige** : la tige aérienne est dressée, pouvant atteindre 50 à 100 cm de haut (Heywood *et al.*, 2007).
- ✓ **Feuilles** : les feuilles sont simples, alternes, à limbe large et charnu, pouvant mesurer de 10 à 30 cm de long (Judd *et al.*, 2016).
- ✓ **Fleurs** : les fleurs sont petites, hermaphrodites, verdâtres, groupées en inflorescences en grappes (Cronquist, 1981 ; Stevens, 2001).
- ✓ **Fruit** : le fruit est un akène entouré par le périanthe persistant (Judd *et al.*, 2016).

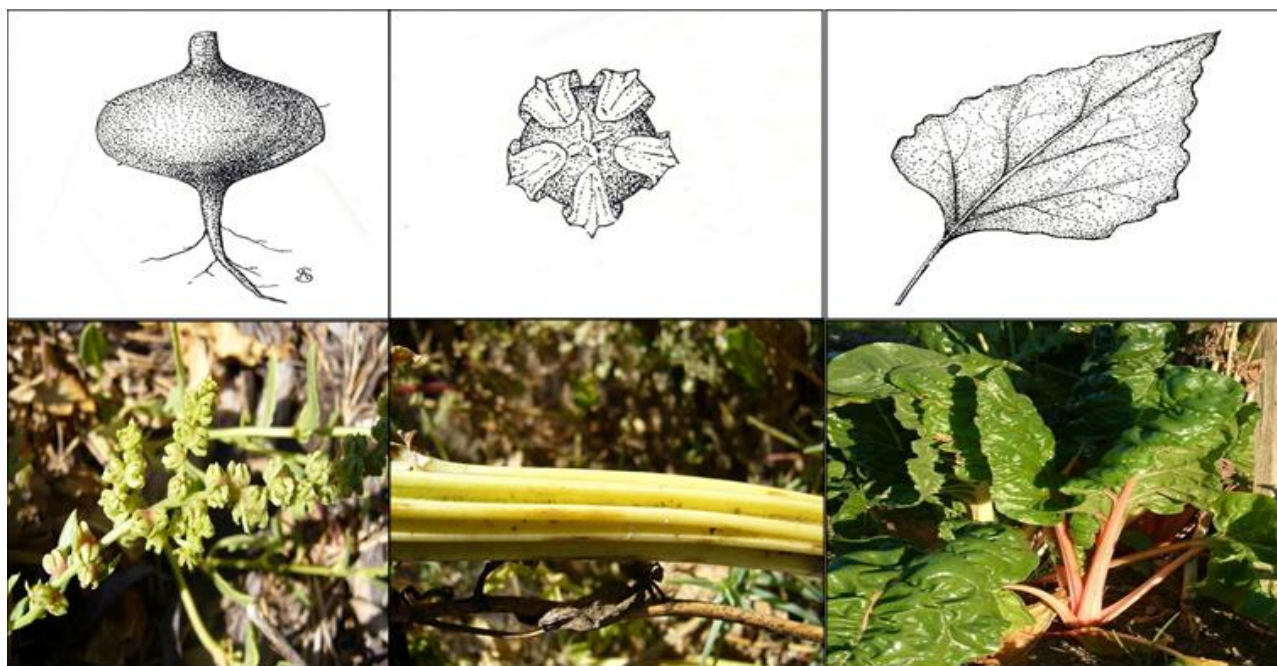


Figure I.3 : Découverte des éléments constitutifs de *Beta vulgaris*
.<https://gobotany.nativeplanttrust.org/species/beta/vulgaris/>

I.2.1.3. Répartition géographique

La betterave est originaire des régions méditerranéennes et du Moyen-Orient (Heywood *et al.*, 2007). Elle est aujourd'hui cultivée dans de nombreuses régions tempérées à travers le monde, notamment en Europe, en Amérique du Nord et en Asie (Cronquist, 1981 ; Heywood *et al.*, 2007).

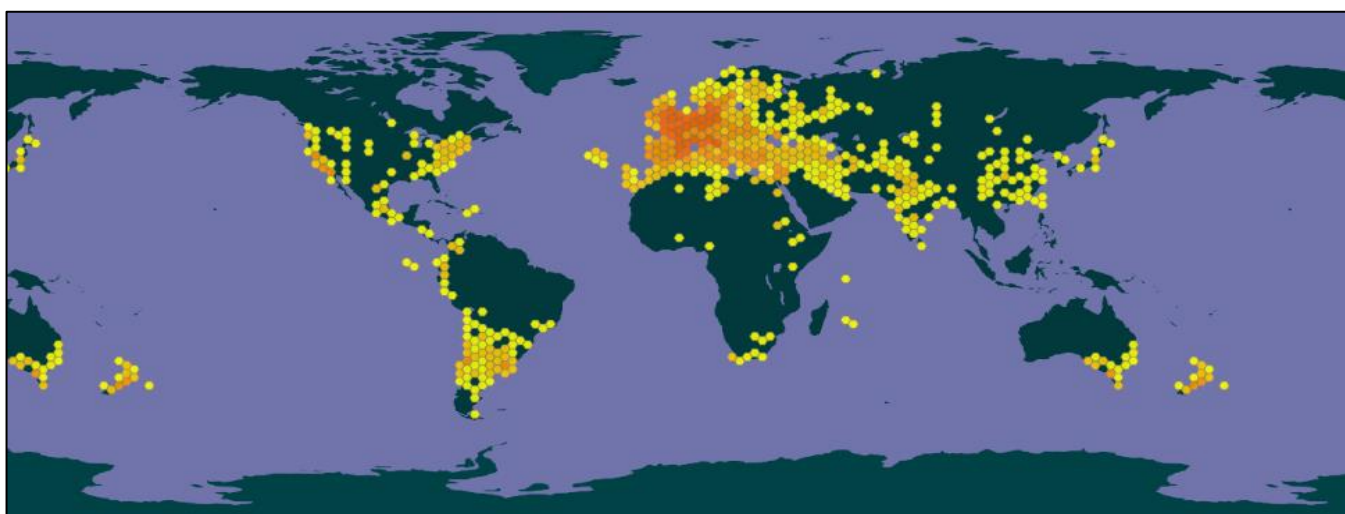


Figure I.4 : Carte de distribution mondiale de *Beta vulgaris* L (2024).(<https://www.gbif.org/species/8971274>)

Explication de la carte

- *Couleurs vives: Forte concentration de Beta vulgaris L.*
- *Couleurs pâles: Concentration moyenne de Beta vulgaris L.*
- *Gris: Absence ou présence très rare de Beta vulgaris L.*

I.2.1.4. L'intérêt thérapeutique de *Beta vulgaris* L

Depuis toujours, les légumes et les fruits ont été perçus comme des sources bénéfiques et essentielles dans la médecine traditionnelle. *Beta vulgaris* fait partie de ces plantes utilisées dans le domaine médical. Les betteraves peuvent se déguster crues ou cuites, ainsi que sous forme de jus.

La richesse de *Beta vulgaris* en composés bioactifs tels que les glucides, les vitamines, les oligo-éléments et les phénols, y compris les flavonoïdes, lui confère divers rôles précieux en médecine. 80% des pigments présents dans cette plante sont des bétacyanines, principalement la bétanine. Ces pigments azotés, appelés bétalaïnes, possèdent des propriétés antimicrobiennes,

anti-inflammatoires, antivirales, antioxydantes et anticancéreuses. Des recherches récentes ont démontré que le jus de betterave réduit le risque d'hypertension, principale cause de maladies cardiaques. D'autres vertus de la plante *Beta vulgaris* incluent l'élimination des toxines, le traitement des maladies liées au stress et à l'inquiétude, ainsi que la prévention du diabète, de l'obésité et de l'anémie (Nikan & Manayi, 2019 ; <https://www.vulgaris-medical.com/phytotherapie/betterave/>).

I.2.2. *Chenopodium album* L

I.2.2.1. Taxonomie (<https://www.gbif.org/fr/species/3083838>)

- Règne : *Plantae*
- Phylum : *Tracheophyta*
- Classe : *Magnoliopsida*
- Ordre : *Caryophyllales*
- Famille : *Amaranthaceae*
- Genre : *Chenopodium* L
- Espèce : *Chenopodium album* L

I.2.2.2. Caractéristiques botaniques

Le *Chenopodium album*, également connu sous le nom de chénopode blanc ou ansérine blanche, est une plante herbacée annuelle appartenant à la famille des Chénopodiacées (*Chenopodiaceae*) (Judd *et al.*, 2016).

- ✓ **Tige** : la tige dressée peut atteindre 10 à 100 cm de haut, souvent striée de lignes rougeâtres (Cronquist, 1981 ; Heywood *et al.*, 2007).
- ✓ **Feuilles** : les feuilles sont simples, alternes, de forme variable (triangulaire, rhomboïdale ou lancéolée), mesurant de 2 à 10 cm de long, recouvertes d'une pruine blanchâtre (Judd *et al.*, 2016 ; Stevens, 2001).
- ✓ **Inflorescence** : les fleurs verdâtres, petites et hermaphrodites, sont regroupées en glomérules formant des épis terminaux et axillaires (Cronquist, 1981 ; Heywood *et al.*, 2007).
- ✓ **Fruit** : le fruit est un akène entouré par le périanthe persistant (Judd *et al.*, 2016).



Figure I.5 : Morphologie du *Chenopodium album* L

(<https://gobotany.nativeplanttrust.org/species/chenopodium/album/>)

I.2.2.3. Répartition géographique

Le *Chenopodium album* est une espèce cosmopolite, native d'Europe et d'Asie (Heywood et al., 2007). Elle est aujourd'hui naturalisée dans de nombreuses régions tempérées à tropicales du globe, étant considérée comme une adventice (plante envahissante) dans de nombreux milieux perturbés (Cronquist, 1981 ; Heywood et al., 2007).

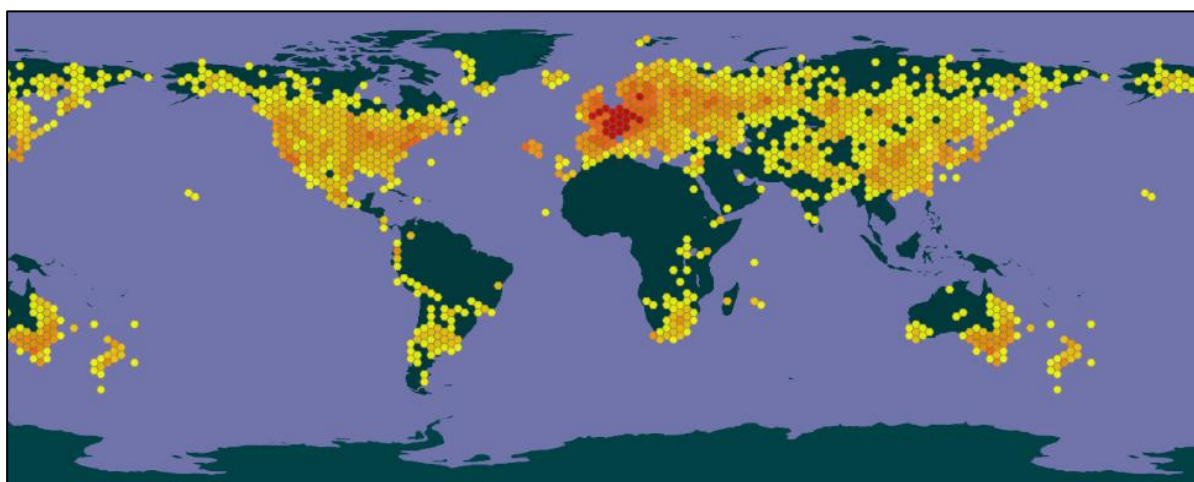


Figure I.6 : Carte de distribution mondiale de *Chenopodium album* L

(2024).(<https://www.gbif.org/fr/species/3083838>)

Explication de la carte

- **Rouge foncé:** Concentration la plus élevée de *Chenopodium album* L.
- **Rouge clair:** Concentration moyenne de *Chenopodium album* L.
- **Orange:** Concentration plus faible de *Chenopodium album* L.
- **Jaune:** Absence ou présence très rare de *Chenopodium album* L.

I.2.2.4. L'intérêt thérapeutique de *Chenopodium album* L

La plante a été traditionnellement utilisée comme purificateur de sang, diurétique, sédatif, hépatoprotecteur, laxatif antiscorbutique et comme anthelminthique contre les vers ronds et les ankylostomes. Des études pharmacologiques ont révélé que la plante possède des propriétés anthelminthiques, immobilisantes pour les spermatozoïdes et contraceptives. On prétend également qu'elle est antiprurigineuse et antinociceptive. Par conséquent, le *C. album* a un grand potentiel pour une évaluation biologique approfondie. Aucun travail significatif n'a jamais été réalisé sur les paramètres de traitement de cette plante potentiellement utile. (Poonia et al., 2015).

I.2.3. *Chenopodium quinoa* Willd

I.2.3.1. Taxonomie (<https://www.gbif.org/species/3083935>)

- **Règne :** *Plantae*
- **Phylum :** *Tracheophyta*
- **Classe :** *Magnoliopsida*
- **Ordre :** *Caryophyllales*
- **Famille :** *Amaranthaceae*
- **Genre :** *Chenopodium* L
- **Espèce :** *Chenopodium quinoa* Willd

I.2.3.2. Caractéristiques botaniques

Le *Chenopodium quinoa*, communément appelé quinoa, est une plante herbacée annuelle appartenant à la famille des Chénopodiacées (*Chenopodiaceae*) (Judd et al., 2016).

- ✓ **Tige :** la tige dressée peut atteindre 0,5 à 2,5 mètres de hauteur, souvent teintée de rouge ou de pourpre (Heywood et al., 2007).
- ✓ **Feuilles :** les feuilles sont simples, alternes, de forme variable (triangulaire, rhomboïdale ou lancéolée), mesurant de 4 à 15 cm de long, recouvertes d'une pruine blanchâtre (Cronquist, 1981 ; Judd et al., 2016).
- ✓ **Inflorescence :** les fleurs verdâtres, petites et hermaphrodites, sont regroupées en panicules terminales (Heywood et al., 2007).

- ✓ **Fruit** : le fruit est un akène entouré par le périanthe persistant, mesurant 2 à 3 mm de diamètre (Judd *et al.*, 2016).



Figure I.7 :Morphologie du *Chenopodium quinoa* Willd

(https://www.gbif.org/occurrence/gallery?taxon_key=3083935)

I.2.3.3. Répartition géographique

Le *Chenopodium quinoa* est originaire des régions andines d'Amérique du Sud, notamment de Bolivie, du Pérou et de l'Équateur (Heywood *et al.*, 2007 ; Jacobsen, 2003). Bien qu'il ait été cultivé depuis des siècles par les peuples andins, le quinoa a connu un regain d'intérêt et de popularité au niveau mondial ces dernières années (Jacobsen, 2003 ; Repo-Carrasco-Valencia, 2011).

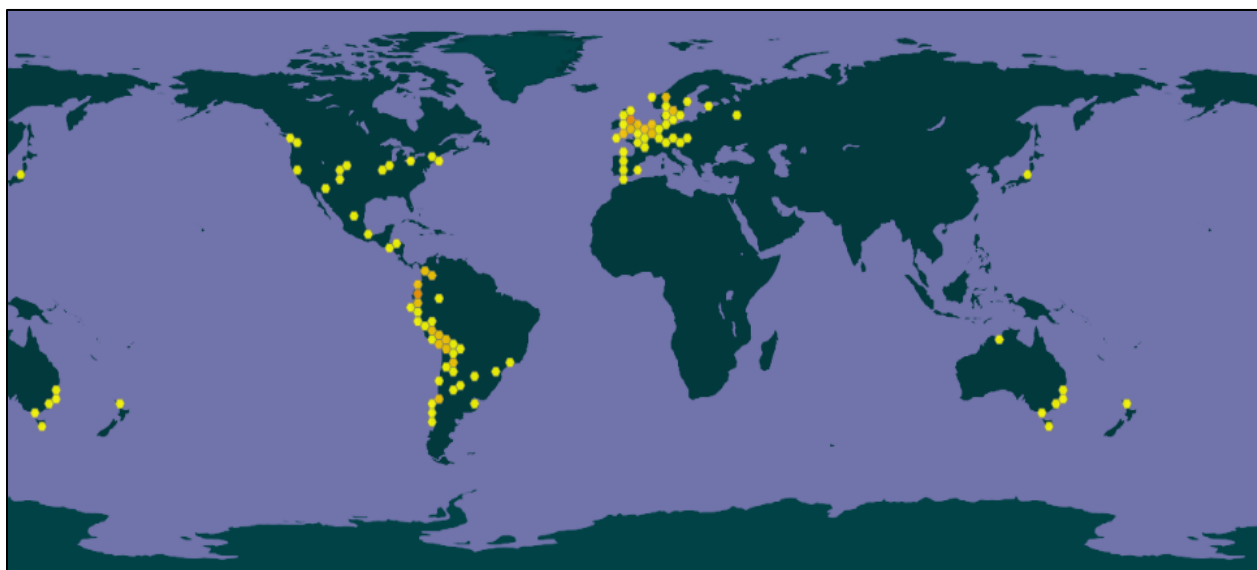


Figure I.8 : Carte de distribution mondiale de *Chenopodium quinoa* Willd (2023).(<https://www.gbif.org/species/3083935>)

Explication de la carte

- *Orange foncé : Concentration la plus élevée de Chenopodium quinoa Willd.*
- *Nuances plus claires d'orange : Concentration modérée de Chenopodium quinoa Willd.*
- *Jaune : Concentration plus faible ou absence de Chenopodium quinoa Willd.*

I.2.3.4. L'intérêt thérapeutique de *Chenopodium quinoa* Willd

Le fait que le quinoa ne contienne pas de gluten est bénéfique pour les personnes de tous âges, y compris les enfants, les adultes, les athlètes de haut niveau, les consommateurs intolérants au lactose, les femmes ostéoporotiques et ceux qui souffrent d'anémie, de diabète, de dyslipidémie, d'obésité ou de maladie cœliaque. Les feuilles de quinoa contiennent des phénoliques, qui améliorent la santé en modulant le métabolisme des glucides et des lipides, en améliorant la fonction des cellules bêta du pancréas, en stimulant l'excrétion d'insuline et en réduisant l'hyperglycémie, la dyslipidémie et la résistance à l'insuline. Elles ont également des propriétés préventives contre le cancer, réduisent l'inflammation, contrôlent ou réduisent l'obésité et possèdent des propriétés cardio-protectrices. Les feuilles ont également des effets anticancéreux in vitro et inhibent la prolifération, la motilité et la compétence cellulaire des cellules cancéreuses. (Shah,2022)

I.2.4. *Atriplex halimus* L

I.2.4.1. Taxonomie (<https://www.gbif.org/species/3083718>)

- Règne : *Plantae*
- Phylum : *Tracheophyta*
- Classe : *Magnoliopsida*
- Ordre : *Caryophyllales*
- Famille : *Amaranthaceae*
- Genre : *Atriplex* L
- Espèce : *Atriplex halimus* L

I.2.4.2. Caractéristiques botaniques

Atriplex halimus, également connue sous le nom de soude arbustive ou halimione, est un arbuste vivace de la famille des Chenopodiaceae (ou Amaranthaceae selon la classification récente). C'est une plante halophile, c'est-à-dire qu'elle tolère et croît bien dans les milieux salins (Shanahan *et al.*, 2007).

- ✓ **Tige** : Dressée et pouvant atteindre 0,5 à 2 mètres de hauteur, souvent teintée de rouge ou de pourpre, ligneuses à la base. (Baumann *et al.*, 1993).
- ✓ **Feuilles** : Alternes, épaisses, de forme lancéolée à ovale, de couleur grise-blanchâtre. (Baumann *et al.*, 1993).
- ✓ **Fleurs** : Petites, verdâtres et regroupées en inflorescences en forme de panicules terminales. (Le Houérou, 1992)
- ✓ **Fruit** : Akène entouré de bractées persistantes. (Castroviejo, 1990).



Figure I.9 :Morphologie du *Atriplex halimus* L

(https://www.gbif.org/occurrence/gallery?taxon_key=3083718)

I.2.4.3. Répartition géographique

L'aire de répartition naturelle d'*Atriplex halimus* s'étend principalement autour de la Méditerranée, depuis les côtes atlantiques du Maroc jusqu'en Turquie, ainsi que dans les îles méditerranéennes. Cette espèce est également présente dans certaines régions du Moyen-Orient et d'Asie centrale (*Divya et al., 2011*) *Atriplex halimus* affectionne particulièrement les zones côtières, les dunes, les marais salants et les terrains salins intérieurs. Elle est notamment très commune sur les rivages de la Mer Méditerranée, de la Mer Noire et de la Mer Caspienne (*Papanastasis et al., 2008*)

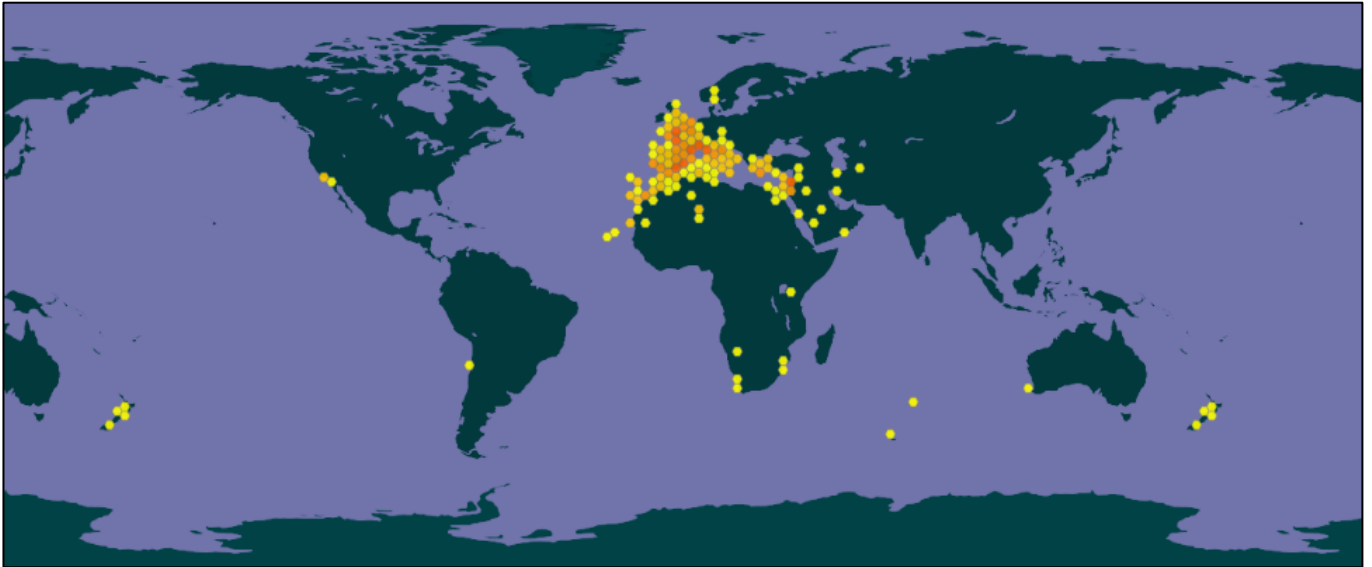


Figure I.10 : Carte de distribution mondiale de *Atriplex halimus* L (2024).(<https://www.gbif.org/species/3083718>)

Explication de la carte

- *Orange foncé* : Concentration la plus élevée de *Atriplex halimus* L.
- *Nuances plus claires d'orange* : Concentration modérée de *Atriplex halimus* L.
- *Jaune* : Concentration plus faible ou absence de *Atriplex halimus* L.

I.2.4.4. L'intérêt thérapeutique de *Atriplex halimus* L

L'*Atriplex* est une plante à haute valeur nutritive, riche en protéines (Franclet & Le Houérou, 1971), en vitamines C, A et D, ainsi qu'en sels minéraux (Benrebiha, 1987). Elle est également utilisée dans la médecine traditionnelle comme plante médicinale (Dutuit *et al.*, 1991). Traditionnellement, elle était recommandée aux patients présentant des symptômes diabétiques. Au Sahara occidental, les cendres d'*Atriplex halimus*, mélangées à de l'eau, sont utilisées pour traiter l'acidité gastrique, tandis que les graines sont consommées comme vomitif (Bellakhdar, 1997). L'*Atriplex halimus* est reconnue pour ses propriétés médicinales, notamment son action contre les coliques, son effet antidiarrhéique, antispasmodique, antiseptique, anti-rhumatismal, ainsi que sa capacité à dilater les vaisseaux et à stimuler les centres respiratoires (Hallard, 1988)

I.2.5. *Hammada scoparia*

I.2.5.1. Taxonomie (<https://www.gbif.org/species/3758785>)

- Règne : *Plantae*
- Phylum : *Tracheophyta*
- Classe : *Magnoliopsida*
- Ordre : *Caryophyllales*
- Famille : *Amaranthaceae*
- Genre : *Haloxylon Bunge*
- Espèce : *Hammada scoparia (Pomel) Iljin*

I.2.5.2. Caractéristiques botaniques

Hammada scoparia, également connue sous le nom de soude balai ou spirobase, est un arbuste vivace de la famille des Chenopodiaceae (ou Amaranthaceae selon la classification récente). C'est une plante xérophile, adaptée aux conditions de sécheresse (**Ozenda, 1977**).

- ✓ **Tige:** Ligneuse, dressée et très rameuse, lui donnant un aspect balai, pouvant atteindre entre 0,3 et 1,5 mètre de hauteur (**Aidoud, 1983**).
- ✓ **Feuilles:** Petites, écailleuses, sessiles et squamiformes, de couleur vert grisâtre (**Aidoud, 1983**).
- ✓ **Fleurs:** Petites et hermaphrodites, à 5 tépales soudés à la base, de couleur rougeâtre, regroupées en épis terminaux (**Quezel & Santa, 1962-1963**).
- ✓ **Fruit:** Akène entouré du périanthe persistant (**Ozenda, 1983**).



Figure I.11: Morphologie du *Hammada scoparia*

(https://www.gbif.org/occurrence/gallery?taxon_key=3758941)

I.2.5.3. Répartition géographique

L'aire de répartition naturelle de *Hammada scoparia* s'étend principalement dans les zones désertiques et semi-désertiques d'Afrique du Nord et d'Asie occidentale. On la retrouve notamment au Maroc, en Algérie, en Tunisie, en Libye, en Egypte, au Moyen-Orient et en Asie centrale (Aidoud-Lounis, 1990)

Cette espèce affectionne particulièrement les steppes et les hamadas (plateaux désertiques caillouteux) des zones arides et hyperarides, sur des sols salés ou gypseux. Elle est très résistante à la sécheresse et tolérante à la salinité du sol (Ozenda, 1977)



Figure I.12 : Carte de distribution mondiale de *Hammada scoparia* (2010).

(<https://www.gbif.org/species/3758785>)

Explication de la carte

- *Orange foncé : Concentration la plus élevée de Hammada scoparia.*
- *Nuances plus claires d'orange : Concentration modérée de Hammada scoparia.*
- *Jaune : Concentration plus faible ou absence de Hammada scoparia.*

I.2.5.4. L'intérêt thérapeutique de Hammada scoparia

Haloxylon scoparium, connue sous le nom de "Remth" en Algérie et en Tunisie, est une plante largement utilisée dans la phytothérapie traditionnelle en Afrique du Nord. Elle est réputée pour ses propriétés médicinales variées et est employée pour traiter plusieurs affections.

En phytothérapie, Haloxylon scoparium est couramment utilisée pour soigner les maladies oculaires comme les infections et les inflammations oculaires. Elle est également employée pour traiter les affections cutanées telles que l'eczéma et le psoriasis. Des études ont également suggéré son efficacité dans le traitement du diabète sucré en aidant à réguler les niveaux de sucre dans le sang (**Allali et al., 2008**).

En outre, Haloxylon scoparium est considérée comme bénéfique pour lutter contre l'hypertension artérielle. Ses extraits ont montré des propriétés hypotensives, contribuant ainsi à abaisser la pression artérielle élevée. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes d'action impliqués (**Eddouks et al., 2002**).

Cette plante est également étudiée pour son potentiel dans le traitement du cancer, des hépatites, des inflammations et de l'obésité. Les résultats préliminaires suggèrent que certains composés présents dans Haloxylon scoparium pourraient avoir des effets anticancéreux, hépatoprotecteurs, anti-inflammatoires et anti-obésité. Cependant, des études cliniques supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ces effets et déterminer les doses optimales (**Allali et al., 2008 ; Eddouks et al., 2002**).

Chapitre II :
Généralités sur les Composés
Phénoliques

II. Généralités sur les Composés Phénoliques

II.1. Introduction sur les métabolites secondaires

Les métabolites secondaires sont des substances produites par les plantes qui ne jouent pas un rôle direct dans la production d'énergie ou la croissance primaire, mais qui interviennent dans les interactions entre les plantes et leur environnement. Ces composés incluent des pigments et des arômes tels que les flavonoïdes, les caroténoïdes et les terpénoïdes, qui sont souvent essentiels pour les interactions bénéfiques entre les plantes et les animaux, comme la pollinisation et la dissémination des graines.

En outre, la majorité de ces molécules possèdent des activités biologiques variées. Elles sont utilisées depuis longtemps dans la médecine traditionnelle et continuent de jouer un rôle important dans la médecine allopathique moderne, que ce soit sous forme de molécules purifiées ou issues de processus d'hémisynthèse chimique. Les composés phénoliques, en particulier, sont reconnus pour leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires, antibactériennes et anticancéreuses, illustrant ainsi leur importance pour la santé humaine et leur potentiel thérapeutique. (Bourgaud *et al.*, 2001; Rao *et al.*, 2002).

II.2. Définition des composés phénoliques

Les composés phénoliques, également connus sous le nom de polyphénols, sont des produits du métabolisme secondaire des plantes, qui sont largement répartis. Ils contiennent plusieurs groupements phénoliques, ce qui peut avoir d'autres fonctions. Ils comprennent au moins 8000 structures différentes connues, allant des molécules phénoliques simples de faible poids moléculaire comme les acides phénoliques, aux composés hautement polymérisés comme les tannins. Ceux-ci sont indispensables à l'alimentation humaine et animale.

Les polyphénols sont des composés naturels présents dans les plantes, souvent sous forme conjuguée et/ou glycosylée. Comme leur nom l'indique, ils se distinguent par la présence de plusieurs groupements phénoliques liés en structures plus ou moins complexes, généralement de poids moléculaire élevé. Il est probable qu'ils soient fabriqués en tant que métabolites secondaires qui sont responsables de diverses propriétés organoleptiques des végétaux, notamment la couleur et l'astringence. Ils peuvent également servir de détergents normaux pour le pâturage des animaux et d'agents antimicrobiens (Laurent C *et al.*, 2008).

La particularité de ces produits réside dans la présence d'au moins un motif phénolique (cycle aromatique) sur lequel se greffer un ou plusieurs groupements OH.



Figure II.1 : Structure du phénol (noyau aromatique).

(Structures chimiques à l'aide de ChemDraw)

II.2.1. Composés phénoliques dans la plante

Les composés phénoliques ont un rôle essentiel dans les caractéristiques sensorielles et nutritionnelles des produits végétaux, car ils sont présents dans la majorité des organes et des tissus utilisés ou consommés par l'homme. Mais, comme pour la plupart des métabolites dits secondaires, il y a en fait une grande variété de répartition de ces composés selon les espèces et selon les organes et les tissus d'une plante. (**Sarni Manchado *et al.*, 2006**).

II.2.2. Répartition cellulaire, tissulaire dans les différents organes de la plante

Le degré d'accumulation des composés phénoliques dans les divers tissus et organes de la plante semble toujours être le résultat de leur biosynthèse, dont nous venons de rappeler les principaux aspects, et de leur utilisation et/ou de leur dégradation.

La distribution des composés phénoliques est très spécifique à l'échelle cellulaire. Ils se regroupent surtout dans deux zones : d'une part, la paroi cellulaire où se trouvent les lignines (et parfois certains flavonoïdes et des molécules liées aux lignines comme l'acide férutique) et d'autre part, la vacuole où se trouvent les phénols solubles (acide chlorogénique, anthocyane, flavonols, tanins...). On peut également trouver des flavonoïdes (Quercétine, Kaempférol) au niveau du noyau et de la membrane plasmique. (**Sarni-Manchado *et al.*, 2006**) , Cependant, il faut toujours être prudent lorsque des perturbations membranaires surviennent, que ce soit lors de certaines évolutions physiologiques ou après différents traitements. La présence de brunissement est souvent la conséquence.

Des distributions très inégales des composés phénoliques sont également observées à l'échelle tissulaire (**Sarni-Manchado *et al.*, 2006**). Les anthocyanes et les pigments flavonols sont donc habituellement présents dans les couches cellulaires externes des organes végétaux, notamment dans les épidermes des fruits et des feuilles.

Il existe aussi des divergences très évidentes entre les divers organes d'une plante spécifique, chacun d'entre eux (feuille, fruit, graine, racine...) pouvant souvent se distinguer par son profil polyphénolique (Sarni-Manchado *et al.*, 2006).

II.2.3. Les rôles des polyphénols dans le métabolisme de la plante

Les polyphénols sont des composés organiques omniprésents dans le règne végétal, jouant un rôle crucial dans divers aspects du métabolisme des plantes. Ces molécules, souvent responsables des couleurs vives des fleurs et des fruits, sont aussi des acteurs essentiels dans les interactions des plantes avec leur environnement biotique et abiotique.

1. Protection contre les Stress Environnementaux

Les polyphénols sont des antioxydants puissants, permettant aux plantes de se protéger contre les stress oxydatifs induits par des facteurs environnementaux tels que la lumière UV, les agents pathogènes et les herbivores. En neutralisant les radicaux libres, ces composés aident à prévenir les dommages cellulaires et contribuent à la résistance des plantes aux stress abiotiques et biotiques (Crozier *et al.*, 2009).

2. Défense contre les Pathogènes

Les polyphénols jouent un rôle défensif majeur contre les attaques de pathogènes. Ils peuvent inhiber la croissance des micro-organismes nuisibles en perturbant leurs membranes cellulaires ou en interférant avec leurs enzymes vitales. Les tanins, un sous-groupe de polyphénols, sont particulièrement efficaces dans ce rôle, formant des complexes avec les protéines des pathogènes, ce qui réduit leur activité et leur croissance (Beckman, 2000)

3. Régulation de la Croissance et du Développement

Les polyphénols influencent également divers aspects de la croissance et du développement des plantes. Par exemple, les flavonoïdes, un groupe de polyphénols, régulent la croissance des racines et des feuilles, ainsi que la pigmentation des fleurs, ce qui est crucial pour l'attraction des pollinisateurs. De plus, certains polyphénols sont impliqués dans la signalisation hormonale, modifiant les réponses des plantes aux phytohormones comme les auxines et les gibberellines (Harborne *et al.*, 2000).

4. Interactions Symbiotiques

Les polyphénols sont également impliqués dans les interactions symbiotiques entre les plantes et d'autres organismes. Par exemple, ils jouent un rôle clé dans la formation des nodules

racinaires chez les légumineuses, facilitant ainsi la fixation biologique de l'azote par les bactéries rhizobiales. Ces interactions sont essentielles pour la nutrition des plantes et l'amélioration de la fertilité des sols (Dakora *et al.*, 2002).

II.2.4. Facteurs influençant la teneur des plantes en composés phénoliques

Les composés phénoliques présents dans les végétaux varient considérablement en fonction de divers facteurs génétiques, physiologiques et environnementaux (Benard, 2009).

II.2.4.1. Facteurs physiologiques

Selon le stade physiologique, on observe des différences qualitatives et quantitatives très spécifiques dans la quantité de polyphénols présentes dans les plantes. Selon (Macheix *et al.*, 2005), les organes jeunes sont parfois plus riches en composés phénoliques que les organes âgés, dont la quantité de ces composés tend à diminuer pendant la croissance.

II.2.4.2. Facteurs génétiques

Les phénols végétaux présentent des variations qualitatives et quantitatives marquées non seulement à différents stades physiologiques et de développement, mais aussi à différents niveaux génétiques (entre et au sein des espèces et des clones). L'évaluation des variations saisonnières et génétiques de la teneur phénolique et de l'activité permet de choisir le meilleur moment pour récolter la plante. (Nurzyńska-Wierdak, 2023)

II.2.4.3. Facteurs externes

La présence de facteurs externes tels que la lumière et la température peut avoir une influence significative sur la quantité de polyphénols présents dans les plantes, en affectant leur métabolisme phénolique. Effectivement, il y a deux facteurs qui influencent la lumière : d'une part, l'intensité du flux lumineux et, d'autre part, la nature des radiations qui la composent (Sarni-Manchado *et al.*, 2006).

La température joue aussi un rôle dans la régulation de l'expression du métabolisme phénolique, le plus souvent en interaction avec la lumière (Rhodes *et al.*, 1981). Cependant, la présence d'organismes pathogènes dans le végétal entraîne également une forte augmentation des concentrations en composés phénoliques, ce qui correspond à la mise en œuvre du mécanisme de défense de la plante (Dixon *et al.*, 1995).

II.3. Principales formes et classes des composés phénoliques

II.3.1. Les formes simples

Les structures chimiques des formes phénoliques les plus simples varient du simple phénol en C6 (non présent naturellement chez les végétaux) aux flavonoïdes en C15 et à des molécules proches (Macheix *et al.*, 2005).

II.3.2. Phénols simples

D'après (Bruneton *et al.*, 1993), les phénols simples (catéchol, guaiacol, phloroglucinol...) sont assez rares dans la nature, à l'exception de l'hydroquinone qui se rencontre dans plusieurs familles (Ericaceae, Rosaceae...etc).

II.3.2.1. Les acides phénoliques simples

II.3.2.1.1. Acides hydroxybenzoïques

- Ils proviennent de l'acide benzoïque
- Ils présentent une structure générale de base de type (C6-C1)
- Ils se présentent fréquemment sous forme d'esters ou de glycosides.

Les plus nombreux acides hydroxybenzoïques sont présents dans le tableau II.1 .

Structure	R1	R2	R3	R4	Acides phénoliques
	H	H	H	H	Acide benzoïque
	H	H	OH	H	Acide p hydroxy benzoïque
	H	OH	OH	H	Acide Protocatechique
	H	OCH3	OH	H	Acide vanillique
	H	OH	OH	OH	Acide gallique
	H	OCH3	H	OCH3	Acide syringique
	OH	H	H	H	Acide salicylique
	OH	H	H	OH	Acide gentisique

Tableau II.1 : Principaux acides hydroxybenzoïques (Sarni-Manchado *et al.*, 2006).

(Structures chimiques créées à l'aide de ChemDraw)

II.3.2.1.2. Acides hydroxycinnamiques

- Ils sont produits par l'acide cinnamique
- Ils présentent une structure générale de base de type (C6-C3)
- Ils se présentent fréquemment sous forme combinée avec des molécules organiques.
- Les degrés d'hydroxylation et de méthylation du cycle benzénique conduisent à une réactivité chimique importante de ces molécules, le tableau II représente les principaux acides hydroxycinnamiques (tableau II.2)

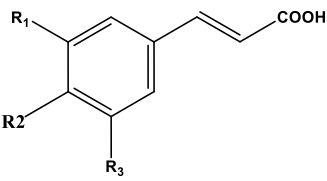
Structure	R1	R2	R3	Acides phénoliques
	H	H	H	Acide cinnamique
	H	OH	H	Acide p coumarique
	OH	OH	H	Acide caféique
	OCH3	OH	H	Acide férulique
	OCH3	OH	OCH3	Acide sinapique

Tableau II.2 : Principaux acides hydroxycinnamiques (Sarni-Manchado et al., 2006).

(Structures chimiques créées à l'aide de ChemDraw)

II.3.2.2. Coumarines

Les coumarines proviennent des acides hydroxycinnamiques grâce à une cyclisation interne de la chaîne latérale. Les coumarines jouent souvent un rôle écologique ou biologique. (Tableau II.3)

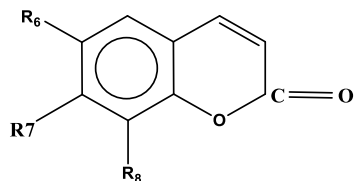
Structure	R6	R7	R8	Acides phénoliques
	H	OH	H	Umbelliférol
	OH	OH	H	Aescultol
	OCH3	OH	H	Scopolétole
	OCH3	OH	OH	Fraxétole
	H	OH	OH	Daphnétole

Tableau II.3 : Principaux types de coumarines (Macheix et al., 2005).

(Structures chimiques créées à l'aide de ChemDraw)

II.3.2.3. Les flavonoïdes

II.3.2.3.1. Généralités

Selon **Piquemal (2008)**, le nom flavonoïde provenait du mot flavedo, qui désigne la couche externe des écorces d'orange. Toutefois, certains auteurs affirmaient que le mot flavonoïde a été plutôt inspiré du flavus ; (flavus étant le symbole du jaune) (**Karaali et al., 2004 ; Malesev et al., 2007**). Les flavonoïdes ont été découverts en 1814 par le scientifique E.CHERVREUL, mais ne sont réellement identifiés qu'en 1930 par Albert Szent-Györgyui, sous le nom de vitamine P, en raison de leur capacité à normaliser la perméabilité des vaisseaux sanguins. Cette appellation fut supprimée après avoir constaté que ces substances ne correspondaient pas à la définition officielle des vitamines, il est maintenant évident que ces substances font partie des flavonoïdes (**Nijveldt et al., 2001**). Les études sur les flavonoïdes ont été nombreuses depuis la découverte du fameux "french paradox" qui concerne un faible taux de mortalité cardiovasculaire observé chez les personnes vivant dans les régions méditerranéennes, en lien avec une consommation excessive de vin rouge et une consommation élevée de graisses saturées (**Ghedira, 2005 ; Malsev et al., 2007**). On a recensé environ 4000 flavonoïdes (**Medic Saric et al., 2004**)

Chapitre II : Généralités sur les Composés Phénoliques

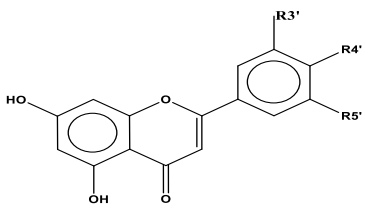
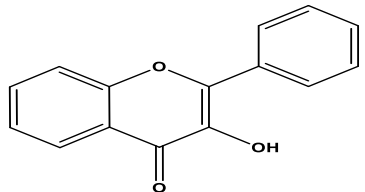
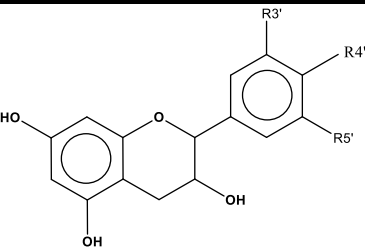
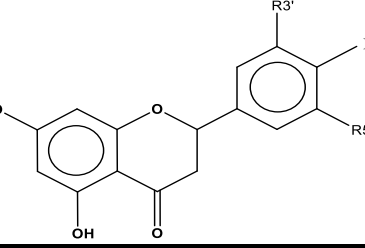
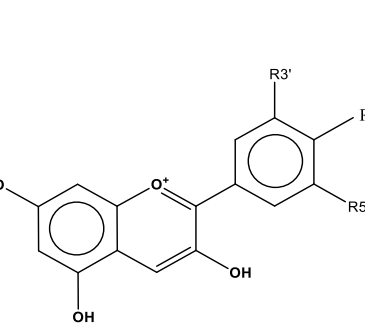
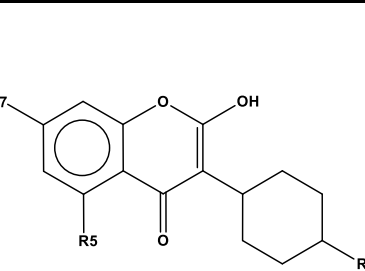
Classes	Structure chimique	R3'	R4'	R5'	exemples
Flavones		H	OH	H	Apigénine
		OH	OH	H	Lutéoline
		OH	OCH3	H	Diosmétine
Flavonols		H	OH	H	Kaempférol
		OH	OH	H	Quercétine
		OH	OH	OH	Myrecétine
Flavanols		OH	OH	H	Catéchine
Flavanones		H	OH	H	Naringénine
		OH	OH	H	Eriodictyol
Anthocyanidines		H	OH	H	Pelarganidine
		OH	OH	H	Cyanidine
		OH	OH	OH	Delphénidine
Isoflavones		R5	R7	R4'	
		OH	OH	OH	Genisteine
		H	O-Glu	OH	Daidezine

Tableau II.4 : Principales classes des flavonoïdes (Narayana *et al.*, 2001; W- Erdman *et al.*, 2007).

(Structures chimiques créées à l'aide de ChemDraw)

II.3.2.3.2. Structure

Les flavonoïdes sont les polyphénols les plus fréquents dans notre alimentation, les plus nombreux (plus de 5000 molécules isolées) et les plus connus. Chacun d'entre eux présente la même structure chimique de base, avec un squelette carboné composé de quinze atomes de carbone, composé de deux cycles aromatiques (A) et (B) reliés entre eux par une chaîne en C3, formant ainsi l'hétérocycle (C) (Erdman *et al.*, 2007).

Le système C6-C3-C6 est généralement utilisé pour représenter la structure des flavonoïdes (Emerciano *et al.*, 2007). Cette structure présente une structure diphenyle propane où des groupements hydroxyles, oxygènes, méthyles ou sucres peuvent être attachés aux noyaux de cette molécule (Narayana, 2001 ; Malsev *et al.*, 2007).

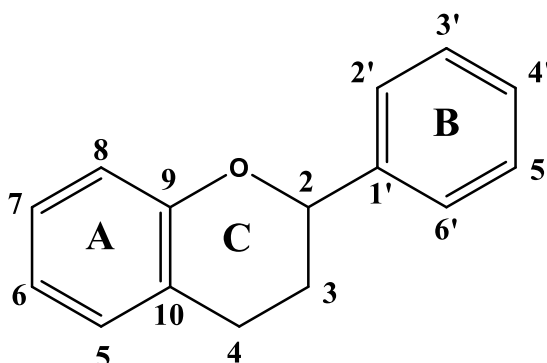


Figure II.2 : Structure générale des composés flavonoïdes.

(Structures chimiques créées à l'aide de ChemDraw)

II.3.2.3.3. Localisation

Les flavonoïdes participent à de nombreuses interactions entre les plantes et les conditions biotiques et abiotiques de leur environnement. D'après (Hutzler *et al.*, 1998), ces substances se rassemblent dans diverses parties cellulaires et tissulaires de la plante pendant l'organogénèse, sous l'effet de divers facteurs stimulants.

En ce qui concerne la cellule, les flavonoïdes sont synthétisés dans les chloroplastes, puis ils migrent et se dissolvent dans les vacuoles (Piquemal, 2008).

Les accumulations de ces composés sont très localisées, en général liées à une fonction physiologique ou à l'interaction de la plante avec son environnement. Pour cette raison, les flavonoïdes présents sur l'épiderme jouent un rôle d'écran contre les rayonnements solaires,

tandis que ceux qui participent aux mécanismes de défense se trouvent sous l'épiderme (Boudet, 2000).

II.3.2.3.4. Distribution

On peut trouver des flavonoïdes dans toutes les parties des végétaux supérieurs : les racines, les tiges, les feuilles, les fruits, les graines, le bois et les pollens (Verhoeyen *et al.*, 2002). On les trouve également dans certaines boissons et chez certains fourrages (par exemple : le trèfle) (Urquiaga *et al.*, 2000).

II.3.3. Formes condensées

Ces formes sont souvent le fruit de la condensation de certaines des formes simples mentionnées précédemment. En fonction de la nature des composants impliqués et du type de condensation, on obtient des composés plus ou moins complexes qui peuvent encore être suffisamment hydrosolubles pour être présents dans la vacuole (tannins, certains produits de brunissement) ou au contraire développer un caractère lipophile marqué et s'accumuler dans les structures pariétales (lignine, formes présentes dans la cutine et la subérine...) (Macheix *et al.*, 2005).

II.3.3.1. Les tannins

Les tanins sont des composés polyphénoliques présents dans de nombreuses plantes, comme les écorces d'arbres et les fruits (raisin, datte, café, cacao). Selon (Hemingway, 1992), leur structure complexe est constituée d'unités répétitives monomériques qui diffèrent en fonction de leurs centres asymétriques et de leur degré d'oxydation.

On regroupe les tanins en deux catégories :

- Les tanins condensés, constitués de proanthocyanidines (sous forme d'oligomères).
- Les tanins hydrolysables, composés d'acides phénoliques et de glucose.

II.3.3.2. Les lignines

Il s'agit de composés moléculaires de grande masse qui se rassemblent au niveau des parois cellulaires et des vaisseaux de sève, où ils jouent un rôle essentiel dans leur rigidité. (Macheix *et al.*, 2005).

II.4. Biosynthèse des composés phénoliques

Les composés phénoliques des végétaux sont issus de deux grandes voies d'aromagenèse (Bruneton., 1999) :

- ✓ Voie de l'acide shikimique.
- ✓ Voie de l'acétate.

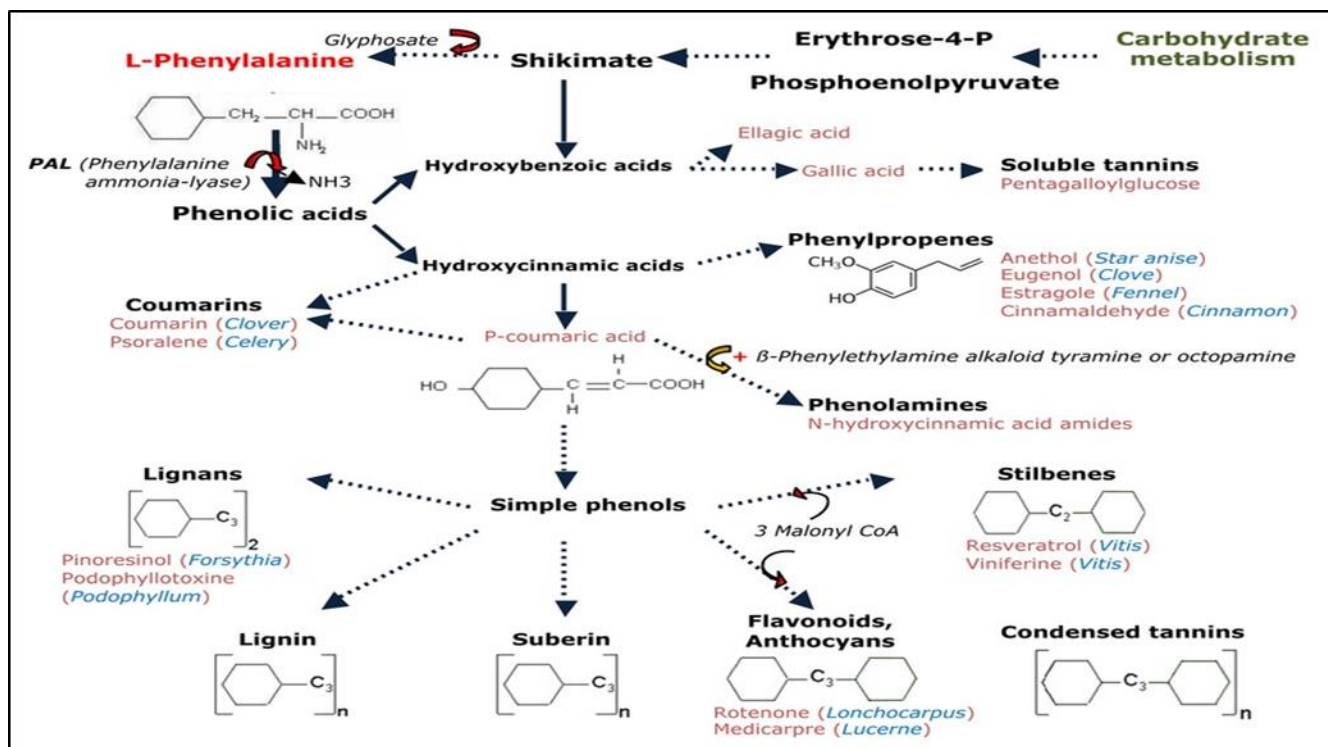


Figure II.3 : Structure du phénol et d'un polyphénol (L'acide ellagique)

II.5. Propriétés des composés phénoliques

II.5.1. Propriétés physicochimiques

1.Solubilité : Tous les composés phénoliques présentent un ou plusieurs cycles benzéniques hydroxylés, ce qui explique certaines propriétés communes utilisées pour les extraire à partir du matériel végétal. En général, les polyphénols sont extraits en utilisant des solvants polaires tels que l'éthanol, le méthanol, l'acétone et l'eau, en fonction de leur solubilité. Toutefois, cette solubilité diffère d'une classe de composés à une autre en fonction des substitutions (méthylation ou glycosylation) sur les groupements hydroxyles (**Macheix et al., 2005**).

2.Absorption UV-visible : Les polyphénols absorbent fortement dans la région UV-visible, généralement entre 200 et 400 nm, ce qui est utilisé pour leur détection et quantification. Cette propriété est due à la présence de systèmes conjugués d'électrons dans les groupes phénoliques (**Manach et al., 2004**).

3.Stabilité thermique : La stabilité thermique des polyphénols varie selon leur structure spécifique. Les polyphénols simples sont souvent plus stables que les complexes, bien que des températures élevées puissent provoquer une dégradation (**Scalbert et al., 2005**).

II.5.2. Propriétés biologique

En interagissant avec les différentes hormones végétales de croissance, les polyphénols jouent un rôle dans le contrôle de la croissance et du développement des plantes. Ils offrent aux plantes la possibilité de se protéger contre les rayons ultraviolets. D'autres sont des phytoalexines telles que les isoflavonols qui combattent les infections causées par les champignons ou les bactéries (Makoi *et al*, 2007).

Les pigments non azotés jouent un rôle crucial dans la pollinisation en attirant les insectes pollinisateurs ou en dessinant des formes qui éloignent les prédateurs. Certains de ces pigments agissent comme inhibiteurs d'enzymes et contribuent à la protection de l'homme contre certaines maladies. Les polyphénols, quant à eux, sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire en tant qu'additifs, colorants, arômes ou agents de conservation (Bruneton., 1999). De nombreuses propriétés et fonctions sont attribuées aux composés phénoliques.

Le tableau II.5 illustre les rôles attribués aux différentes classes de polyphénols

Composés phénoliques	Activité biologique
Ac. Phénols (Ac. caféique, Ac. calicylique)	Antibactérienne, antifongique et antioxydante
Tanins (Tanin gallique, Proanthocyanidine)	Effet stabilisant sur le collagène, antioxydant, anti-diarrhéique, effet antiseptique, effet vasoconstricteur
Flavonoïdes (Lutéoline, Catéchine, Hespéridine, Quercetine, Naringénine)	Antitumorale, anticarcinogène, anti - inflammatoire, antioxydante, antiallergique, antiulcéreuse, antivirale, antimicrobienne, hypotenseur diurétique
Coumarines (Dicoumarol)	Anticoagulant, antioxydant, protectrice vasculaire et anti-oedémateuse

Tableau II.5 : Activités biologiques de quelques composés phénoliques (Bruneton 1999 ; Hennebelle, 2006).

II.6. Activité antioxydante des composés phénoliques

Les polyphénols sont bien connus pour leur activité antioxydante. Ils sont en effet les antioxydants les plus abondants dans l'alimentation et jouent un rôle majeur dans le contrôle des réactions d'oxydation *in vivo*, notamment en piégeant les radicaux libres (effet scavenger) (Manna *et al.*, 1997). Les antioxydants sont des substances qui retardent ou inhibent l'oxydation

d'un substrat lorsqu'ils sont présents à une concentration beaucoup plus faible que celle du substrat (Berger *et al.*, 2001 ; Antolovich *et al.*, 2002 ; Berger, 2006).

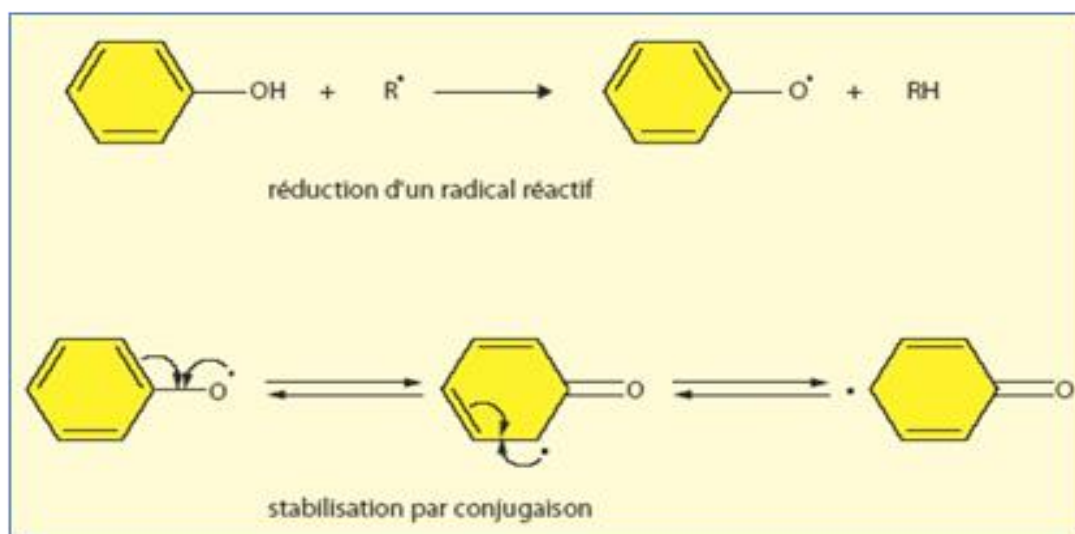


Figure II.4: Pouvoir antioxydant des polyphénols (Rolland, 2004).

II.7. Activité anti-inflammatoire

Les propriétés anti-inflammatoires des composés polyphénoliques peuvent être attribuées à leur capacité à inhiber les enzymes impliquées dans les processus inflammatoires (Škerget *et al.*, 2005) ainsi qu'à leurs activités antioxydantes.

La matricaire, également connue sous les noms de camomille allemande ou camomille commune, est une plante médicinale utilisée pour ses propriétés antispasmodiques et anti-inflammatoires (Marcheix *et al.*, 2005).

II.8. Activité antibactérienne

Les polyphénols, en particulier les flavonoïdes et les tanins, sont connus pour leur toxicité envers les microorganismes (Basli *et al.*, 2012). Le mécanisme de toxicité peut être lié à l'inhibition des enzymes hydrolytiques, telles que les protéases et les carbohydrases, ou à d'autres interactions qui inactivent les adhésines microbiennes, les protéines de transport et les composants de l'enveloppe cellulaire (Cowan., 1999).

II.9. Activité anticancéreuse

Les flavonoïdes et autres composés phénoliques peuvent jouer un rôle préventif dans le développement du cancer (Genoux, 2011).

Ils interviennent dans la phase d'initiation en piégeant les mutagènes électrophiles ou en stimulant la réparation de l'ADN muté. Durant les phases de promotion et de progression, ils

agissent comme agents supprimeurs de tumeurs par divers mécanismes, tels que l'induction de l'apoptose et l'inhibition de la prolifération cellulaire (Gerber *et al.*, 2002).

Chapitre III :

Généralités sur l'activité antioxydante

III. Généralités sur l'activité antioxydante

III.1. Introduction

Les antioxydants suscitent un vif intérêt scientifique en raison de leurs nombreux bienfaits, notamment anti-âge et anti-inflammatoires (**Zehiroglu & Ozturk, 2019**). Intégrés dans un système harmonieux de molécules et d'enzymes endogènes et exogènes, ils protègent la matière vivante contre l'oxydation induite par le stress oxydatif (**Karadag et al., 2009**). Leur rôle dans la prévention de diverses maladies est crucial (**Charles, 2013**).

On distingue plusieurs classes d'antioxydants selon leur mode d'action : systèmes enzymatiques, inhibiteurs d'enzymes oxydantes, chélateurs de métaux et piègeurs de radicaux libres (**Desmier, 2016**).

III.2. Définition de L'activité antioxydante

L'activité antioxydante fait référence à la capacité de certaines substances, appelées antioxydants, à neutraliser les radicaux libres et à prévenir le développement de maladies associées au stress oxydatif (**Sarr et al., 2015**). Un antioxydant est défini comme "toute substance présente en faible concentration retardant ou inhibant l'oxydation d'un substrat oxydable" (**Young & Woodside, 2001**). Ces substances inhibent ou retardent l'oxydation en intervenant à différents stades du processus, comme piéger les composés radicalaires, chélater les ions métalliques, neutraliser l'anion superoxyde ou réduire la concentration en O₂ (**Maurent, 2017 ; Nimse & Pal, 2015**).

Un antioxydant efficace doit agir spécifiquement sur les radicaux libres, chélater les métaux de transition, fonctionner en synergie avec d'autres antioxydants pour se régénérer, et opérer à des concentrations physiologiques relativement faibles (**Valko et al., 2006**). Il a la capacité de retarder, prévenir ou inhiber la génération d'oxydants toxiques, d'arrêter et inactiver ceux déjà produits, bloquant ainsi la réaction en chaîne (**Tang & Halliwell, 2010**).

III.3. Le stress oxydatif

Le stress oxydatif est un déséquilibre entre la production excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ROS/radicaux libres) dans les cellules et les tissus, et la capacité limitée du système biologique à détoxifier ces produits réactifs via les systèmes antioxydants (**Asouri et al., 2013; Defraigne & Pincemail, 2008**).

Les ROS sont généralement produites en faibles quantités par divers mécanismes physiologiques comme sous-produits du métabolisme de l'oxygène et ont certains rôles utiles comme la signalisation cellulaire (**Favier, 2003**). Cependant, les stress environnementaux, les xénobiotiques et d'autres facteurs exogènes peuvent entraîner une surproduction de ROS

Chapitre III : Généralités sur l'activité antioxydante

dépassant les capacités antioxydantes de l'organisme (Pizzino *et al.*, 2017). S'il n'est pas contrôlé, ce phénomène peut endommager les composants cellulaires comme les protéines, les lipides et l'ADN, contribuant ainsi au développement de maladies chroniques et dégénératives (cancer, maladie d'Alzheimer, maladie de Parkinson), accélérer le vieillissement cellulaire et causer d'autres pathologies aiguës (Pizzino *et al.*, 2017). Il résulte d'un déséquilibre où la production de ROS excède les défenses antioxydantes, que ce soit par une production excessive de ROS ou une diminution de la capacité antioxydante de l'organisme (Defrangne & Pincemail, 2008).

III.4. Les Radicaux libres

L'oxygène, molécule indispensable à la vie, est susceptible d'entraîner des effets dommageables dans l'organisme via la formation de radicaux libres et d'espèces oxygénées activées (EOA) (Haleng *et al.*, 2007).

Les radicaux libres sont des composés caractérisés par une structure électronique déséquilibrée qui leur confère une grande réactivité sur les constituants organiques et sur les structures cellulaires. Ils favorisent habituellement le bon fonctionnement de l'organisme et la santé des mammifères, mais leur excès peut être néfaste. En dehors de toute situation pathologique, leur production est stimulée par toute situation de stress, en particulier par la manipulation maladroite ou brutale des animaux, par l'exercice physique, par le froid, par des niveaux d'alimentation excessifs ou par des déséquilibres alimentaires (Aurousseau, 2002).

Elles participent au fonctionnement de certaines enzymes, à la transduction de signaux cellulaires, à la défense immunitaire contre les agents pathogènes, à la destruction par apoptose des cellules tumorales, au cycle cellulaire, à la différenciation cellulaire et la régulation de la dilatation capillaire, au fonctionnement de certains neurones et notamment ceux de la mémoire, à la fécondation de l'ovule et la régulation des gènes (Favier .,2003).

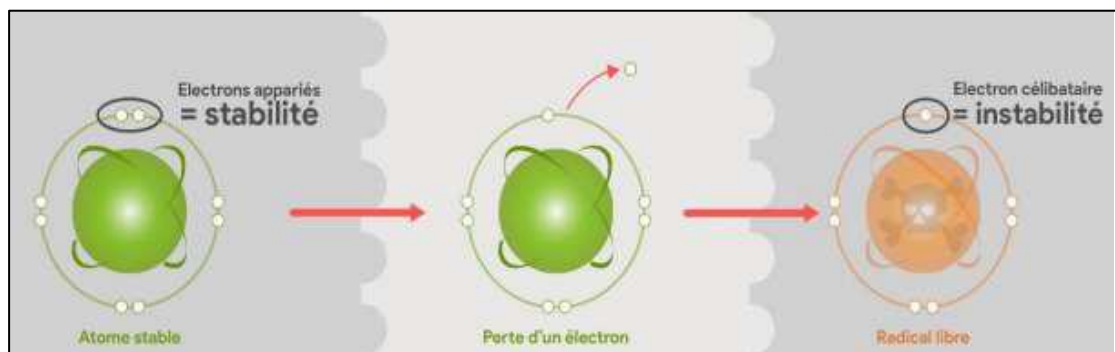


Figure III.1 : La formation d'un radical libre est provoquée par la perte d'un électron.

(<https://www.pensersante.fr/les-radicaux-libres-quest-ce-que-cest>)

III.5. Les espèces réactives

Les espèces réactives (**ER**) sont des atomes ou molécules générées par voie enzymatique ou par interactions chimiques. Il existe trois familles d'espèces réactives : les espèces réactives de l'azote ou **RNS**, les espèces réactives de chlore ou **RCS**, et l'espèce réactive la plus intéressante est les espèces réactives d'oxygène ou **ROS** (**Hamma et al., 2015**).

Les principales espèces réactives d'oxygène sont :

- l'anion superoxyde **O₂⁻**
- le radical hydroxyle **OH**
- monoxyde d'azote **NO**
- l'oxygène singulet **¹O₂**
- le peroxyde d'hydrogène (**H₂O₂**)
- le nitroperoxyde (**ONOOH**) (**Favier, 2003**).

La production de ces espèces oxydantes est une conséquence inévitable du métabolisme aérobie. En effet, l'organisme a besoin d'O₂ pour produire de l'énergie au cours des réactions dites de respirations oxydatives. Cependant, une faible partie de l'oxygène échappe à sa réduction en eau, au niveau de la mitochondrie. Elle peut alors être à l'origine de la production de radicaux libres oxygénés. (**Pastre, J., 2005**)

Les autres sources de production de radicaux libres sont représentées dans le tableau III.1 Elles sont classées en deux catégories :

- **Les sources endogènes** : les radicaux libres sont des produits des réactions de l'organisme,
- **Les sources exogènes** : les êtres vivants sont exposés quotidiennement à des polluants (fumée de cigarette, rayons ultraviolets, radiations...) susceptibles d'être à l'origine de la production de radicaux libres, une fois dans l'organisme. (**Pastre, J., 2005**).

Sources endogènes	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Production de radicaux libres lors des respirations ✓ oxydatives (mitochondries) ✓ Cellules phagocytaires ✓ Métabolisme de l'acide arachidonique ✓ Système xanthine/Xanthine oxydase
Sources exogènes	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rayonnement électromagnétique ✓ Métaux de transition ✓ Pesticides ✓ Médicaments...

Tableau III.1 : Principales sources de production des radicaux libres. (**Pastre, J., 2005**)

III.6. Les mécanisme de protection et élimination de ROS (EOA) dans l'organisme

Pour maintenir l'équilibre redox et prévenir les dommages oxydatifs, l'organisme a développé un réseau complexe de mécanismes de protection et d'élimination des ROS. Ces systèmes comprennent des antioxydants enzymatiques et non enzymatiques, des mécanismes de réparation cellulaire, et des systèmes de régulation de la production de ROS. L'efficacité de ces mécanismes dépend de divers facteurs, notamment des activateurs qui renforcent les défenses antioxydantes et des inhibiteurs qui peuvent compromettre ces systèmes de protection (**Birben et al., 2012**).

Les principaux mécanismes de protection et d'élimination des ROS incluent le système antioxydant enzymatique, le système antioxydant non enzymatique, la régulation de la production de ROS, les systèmes de réparation cellulaire, et la chélation des métaux. Chacun de ces systèmes est influencé par des activateurs qui améliorent leur efficacité et des inhibiteurs qui réduisent leur capacité à protéger l'organisme contre le stress oxydatif (**Halliwell & John, 2015**).

Par exemple, le système antioxydant enzymatique, qui comprend des enzymes telles que la superoxyde dismutase (SOD), la catalase et la glutathion peroxydase, peut être activé par le facteur de transcription Nrf2, l'exercice physique modéré et certains composés phytochimiques. En revanche, il peut être inhibé par un stress oxydatif chronique, certains polluants environnementaux et des carences en oligo-éléments essentiels (**Hybertson et al., 2011**).

De même, le système antioxydant non enzymatique, qui inclut des molécules comme les vitamines C et E, les caroténoïdes et le glutathion, est renforcé par une alimentation riche en fruits et légumes, mais peut être compromis par une mauvaise alimentation, le tabagisme et une exposition excessive aux UV (**Forman et al., 2014**).

La compréhension de ces mécanismes et de leurs régulateurs est cruciale pour le développement de stratégies visant à prévenir et à traiter les pathologies liées au stress oxydatif, ainsi que pour promouvoir un vieillissement en bonne santé (**Sies, 2015**).

Chapitre III : Généralités sur l'activité antioxydante

SYSTEME	ACTIVATEUR	INHIBITEUR	ENZYMES / ANTIOXYDANTS PRINCIPALES
1. Système antioxydant enzymatique	<ul style="list-style-type: none"> - Facteur de transcription Nrf2 - Exercice physique modéré - Certains composés phytochimiques (ex : sulforaphane) 	<ul style="list-style-type: none"> - Stress oxydatif chronique - Certains polluants environnementaux - Déficience en oligo-éléments essentiels (ex : sélénium, zinc) 	<ul style="list-style-type: none"> - Superoxyde dismutase (SOD) - Catalase - Glutathion peroxydase
2. Système antioxydant non enzymatique	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation riche en fruits et légumes - Supplémentation en vitamines et minéraux 	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise alimentation - Tabagisme - Exposition excessive aux UV 	<ul style="list-style-type: none"> - Vitamine C, E - Caroténoïdes - Polyphénols - Glutathion
3. Régulation de la production de ROS	<ul style="list-style-type: none"> - Inflammation chronique - Hypoxie - Certaines cytokines pro-inflammatoires 	<ul style="list-style-type: none"> - Exercice régulier - Restriction calorique - Mélatonine 	/
4. Systèmes de réparation cellulaire	<ul style="list-style-type: none"> - Sirtuines - Autophagie - Protéines de choc thermique (HSP) 	<ul style="list-style-type: none"> - Stress oxydatif sévère - Vieillesse - Certaines maladies chroniques 	/
5. Chélation des métaux	<ul style="list-style-type: none"> - Protéines de liaison au fer (ferritine, transferrine) - Protéines de liaison au cuivre (céruleplasmine) 	<ul style="list-style-type: none"> - Surcharge en fer ou en cuivre - Inflammation chronique 	/

Tableau III.2 : Représentation générale sur les activateurs et les inhibiteurs du système.

III.7. Classification des antioxydants

III.7.1. Les antioxydants naturels

Il s'agit de substances d'origine naturelle, principalement végétale. Les plantes médicinales contiennent les principaux antioxydants naturels tels que l'acide ascorbique, les

caroténoïdes, le glutathion et le tocophérol. Cependant, les polyphénols demeurent les molécules antioxydantes privilégiées. **(Karadag et al., 2009)** . Ces composés comprennent les acides phénoliques (acide gallique et caféique), les terpènes phénoliques (Carnosol et acide Carnosique), les flavonoïdes (Quercétine et Catéchine) et les huiles volatiles (Eugénol, Carvacrol, Thymol et Menthol). **(Thomas, 2016)**. Les aliments que nous consommons nous offrent des antioxydants puissants, parmi lesquels les plus essentiels sont la vitamine E, la vitamine C, la vitamine A, ainsi que les oligoéléments tels que le fer, le sélénium, le zinc, le magnésium et le cuivre. **(Brewer, 2011)**.

III.7.2. Les antioxydants synthétiques

La production industrielle d'antioxydants offre une grande diversité d'antioxydants synthétiques tels que le BHA (hydroxyanisole butylé), le BHT (hydroxytoluène butylé), le PG (gallate propylé), le TBHQ (tertiobutylhydroquinones) et les agents chélateurs de métaux tels que l'EDTA etc. Ces composants artificiels sont utilisés individuellement ou en association pour garantir une conservation optimale des aliments . **(Moussous, 2020)**

Dernièrement, il a été démontré que ces substances synthétiques ont des propriétés cancérogènes et/ou cytotoxiques, ce qui a entraîné une restriction de leur utilisation par des lois **(Gülçin, 2012)** , et orienté l'étude vers des antioxydants provenant de produits naturels, qui constituent une alternative avantageuse pour les systèmes biologiques.

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV. Matériels et méthodes

IV.1. L'Approche de la méta-analyse

Dans le cadre de notre étude, nous avons examiné la littérature scientifique pour comprendre l'activité antioxydante des composés phénoliques présents dans les plantes de la famille des chénopodiacées. Voici les points clés que nous avons relevés :

- **Source des articles** : Nous avons consulté diverses sources pour recueillir des articles pertinents. Celles-ci incluent des bases de données académiques telles que **PubMed**, **ResearchGate** et **Google Scholar**. Ces plateformes nous ont permis d'accéder à une variété d'articles scientifiques sur le sujet.
- **Période des articles** : Les articles que nous avons examinés couvrent une période allant de 2001 à 2023. Cette plage de temps nous a permis d'obtenir une vue d'ensemble complète des recherches menées sur l'activité antioxydante des composants phénoliques dans les plantes de la famille des chénopodiacées.
- **Nombre d'articles** : Au total, nous avons analysé 50 articles pertinents. Ces études ont abordé divers aspects, tels que les méthodes d'extraction, les propriétés antioxydantes spécifiques des composés phénoliques et leurs applications potentielles.
- **Nombre de plantes** : cinq plantes à savoir *bêta vulgaris*, *Atriplex halimus*, *Chenopodium album*, *Chenopodium quinoa*, *Hammada scoparia*, et *Spinacia oleracea*.

Les mots-clés que nous avons utilisés dans nos recherches comprennent "antioxydante", "chénopodiacées", "bêta vulgaris", "Atriplex halimus", "Chenopodium album", "Chenopodium quinoa", "Hammada scoparia", "Spinacia oleracea", et d'autres termes spécifiques liés à notre sujet d'étude.

En résumé, notre synthèse d'articles met en lumière l'importance des composés phénoliques dans les plantes de la famille des chénopodiacées en tant qu'antioxydants naturels. Les résultats de ces études contribuent à notre compréhension des bienfaits potentiels de ces plantes pour la santé humaine.

IV.2. Les paramètres étudiés (Annexe : paramètres de l'analyse statistique).

Pour notre investigation, nous avons analysé plusieurs paramètres clés à partir des articles scientifiques de large gamme pour comprendre l'activité antioxydante des composants phénoliques des plantes de la famille des chénopodiacées. Les paramètres étudiés incluent :

- ✓ **Parties de la plante** : Les différentes parties de la plante (feuilles, tiges, racines, etc.) qui ont été analysées pour leur contenu en composés phénoliques.
- ✓ **Méthodes d'extraction** : Les différentes techniques utilisées pour extraire les composés phénoliques des plantes, telles que l'extraction aqueuse, l'extraction par solvant, l'extraction Soxhlet...etc.
- ✓ **Les solvants utilisés** : Les types de solvants utilisés pour l'extraction des composés phénoliques, par exemple l'eau, l'éthanol, le méthanol... etc.
- ✓ **Techniques in vitro** : Les méthodes in vitro employées pour évaluer l'activité antioxydante des extraits, comme les tests DPPH, ABTS, FRAP...etc.
- ✓ **Les principales activités biologiques** : Les activités biologiques principales observées, telles que l'activité antioxydante, antimicrobienne, anti-inflammatoire...etc.

L'ensemble des données de ces paramètres est illustré dans un tableau placé en annexe (**Annexe : paramètres de l'analyse statistique**).

IV.3. Matériel

La partie de la plante utilisée comme matériel végétale se diffère selon les études (feuilles, tiges, racines...etc.) Pour plus de détails voir tableau récapitulatif à l'annexe.

IV.4. Méthodes

IV.4.1. Extraction

IV.4.1.1 Méthodes classiques d'extraction

La technique de l'extraction consiste à séparer les parties actives des tissus végétaux ou animaux des éléments inactifs ou inertes en utilisant des solvants sélectifs. Les méthodes classiques sont celles qui utilisent les techniques de base les plus basiques pour extraire le principe actif. (Sacchi *et al.*, 2005).

IV.4.1.1.1 Extraction par macération

Elle consiste à mettre une plante ou partie de plante, dans de l'eau froide (macération aqueuse) ou une huile végétale (macération huileuse), pendant plusieurs heures, voir plusieurs jours, pour permettre aux constituants actifs de bien diffuser. Elle convient pour l'extraction de plantes contenant du mucilage, comme les graines de lin ou les graines du plantain des sables, leur forte concentration en amidon ou pectine peut causer une gélatinisation s'ils se préparent dans de l'eau bouillante. Egalement utilisée pour empêcher l'extraction de constituants indésirables qui se dissolvent dans l'eau chaude (Kraft & Hobbs, 2004). Elle concerne aussi les plantes dont les substances actives risquent de disparaître ou de se dégrader sous l'effet de la chaleur par ébullition (Baba-Aïssa, 2000).

IV.4.1.1.2 Soxhlet

L'extraction par l'appareil Soxhlet (nous allons l'appeler simplement Soxhlet) est une méthode simple et convenable nous permettant de répéter infiniment le cycle d'extraction avec du solvant frais jusqu'à épuisement complet du soluté dans la matière première, d'où vient son efficacité élevée (Penchev, 2010).

Cependant, le Soxhlet possède quelques désavantages comme, par exemple, le temps d'extraction relativement long, la possibilité de dégradation des composés à cause d'une surchauffe locale, le choix limité du solvant, les difficultés d'utilisation de mélanges de solvants, etc (Penchev, 2010)

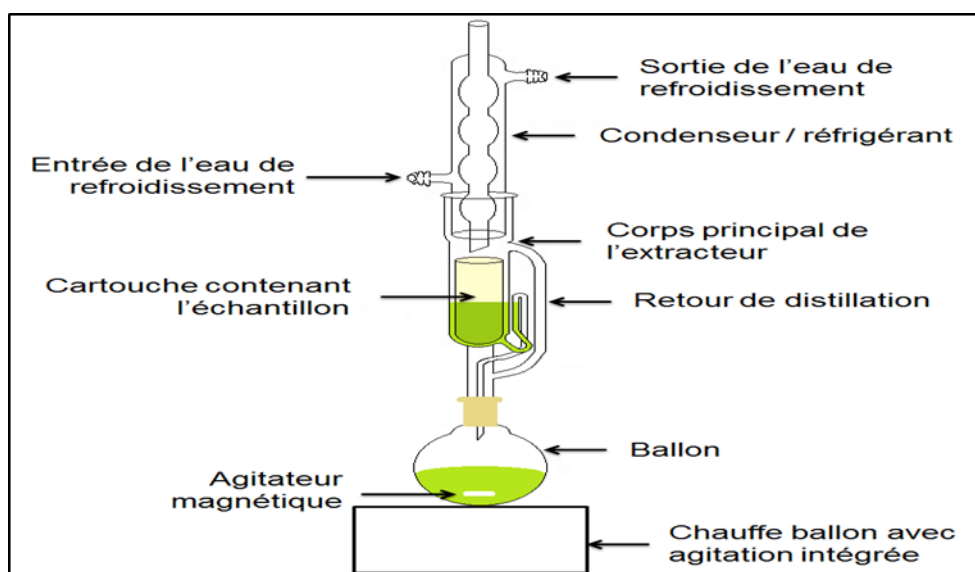


Figure IV.1: Extracteur Soxhlet (Do, 2016)

IV.4.1.2 Méthodes moderne d'extraction

IV.4.1.2.1 L'extraction par solvant assistée par micro-ondes (ESMO)

L'ESMO est une nouvelle technique d'extraction utilisée pour extraire des polyphénols et des tanins, et pour extraire les acides phénoliques et les flavonoïdes. Son principe consiste en la propagation des radiations électromagnétiques dans le matériau, pour atteindre les molécules polaires présentes dans la matière d'extraction. Ces molécules génèrent de la chaleur qui chauffe le matériau à cœur. Les radiations se propagent sous forme de vagues avec des fréquences allant de 0,3 à 300 GHz (Wang & Weller, 2006). La pression élevée provoque la rupture des cellules, ce qui facilite la pénétration du solvant (Mandal *et al.*, 2007). L'EAM présente l'intérêt d'être une source d'énergie contrôlable de façon instantanée et réglable avec précision. Elle permet d'accélérer la cinétique d'extraction et de réduire le ratio solvant/charge, ce qui permet de préserver les composés les plus thermolabiles des réactions de dégradation traditionnelles. De

plus, en raison de la rapidité du procédé, il y a une augmentation de la sélectivité de l'extraction par rapport à la méthode traditionnelle (Anizon *et al.*, 2003).

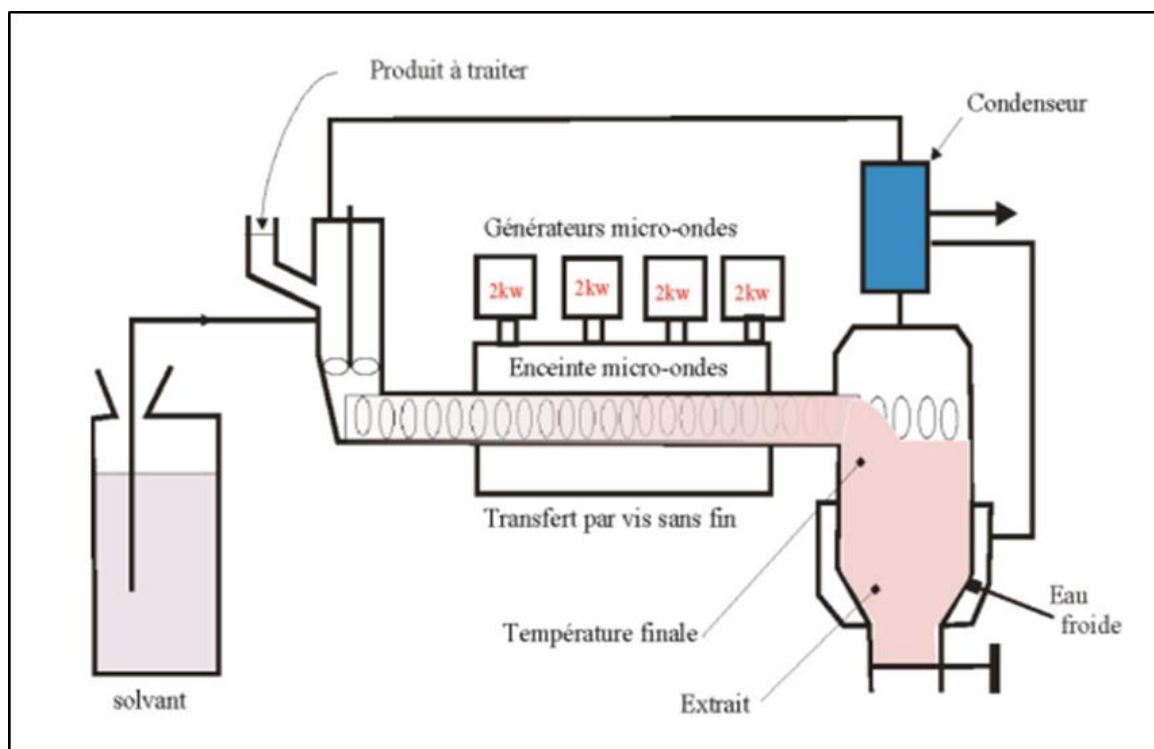


Figure IV.2 : L'extraction par solvant assistée par micro-ondes (ESMO). (Lucchesi, 2005)

IV.4.1.2.2 Extraction assistée par ultrasons (EAU)

Cette technique présente l'intérêt de faire des extractions à température ambiante, 20-25°C et pour des durées très courtes de 3-30 min, ce qui permet de préserver les composés thermolabiles (acide gras, polyphénols) (Routray & Orsat, 2012), des colorants, des antioxydants, des arômes ou aussi des caroténoïdes. Son principe consiste à la destruction des parois cellulaires par des fréquences d'ultrasons, ce qui permet une meilleure pénétration du solvant au cœur de la matière, et par conséquent un meilleur rendement d'extraction. Les fréquences utilisées sont généralement supérieures à 20 kHz. En milieu liquide, les ultrasons provoquent des cycles d'expansion et de compression des cellules formant ainsi des bulles. Le développement excessif des bulles microscopiques à proximité des parois cellulaires, entraîne une élévation de température et de pression, ce qui provoque l'explosion des bulles et la destruction des parois cellulaires (Perraut, 2013 ; Wang & Weller, 2006).

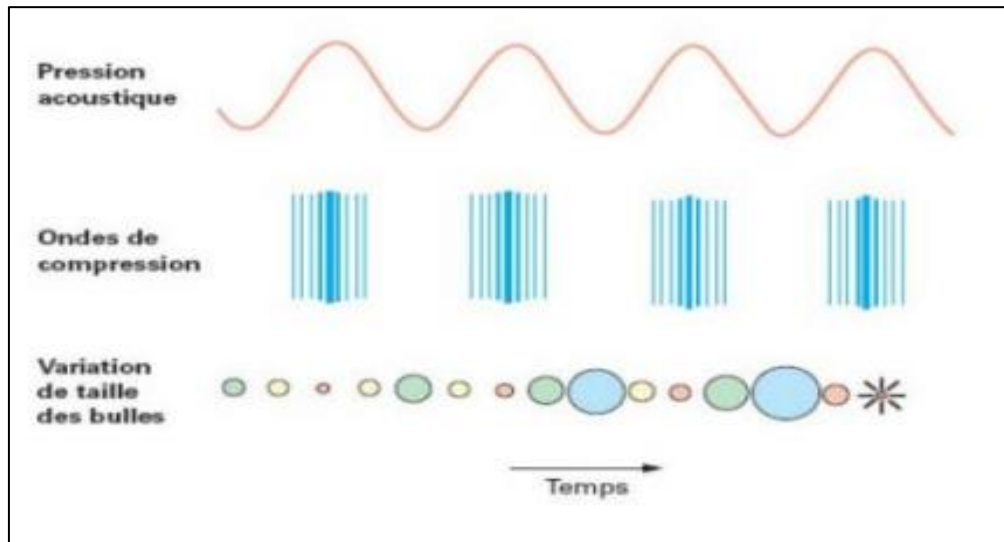


Figure IV.3 : Représentation schématique du phénomène de cavitation acoustique. (Draye *et al.*, 2009).

IV.4.1.2.3. Extraction en phase solide (EPS)

Cette technique peut être également employée pour le fractionnement et/ou la purification ou pour obtenir la concentration initiale des composés. En effet, l'extraction en phase solide avec des cartouches C18 a été régulièrement utilisée pour l'extraction sélective d'acides phénoliques et de flavonoïdes des vins rouges (Pinelo *et al.* , 2006). Cette méthode constitue aussi une autre option rapide et économique puisqu'elle réduit de manière significative le volume des solvants requis (Escribano-Bailon & Santos-Buelga, 2003).

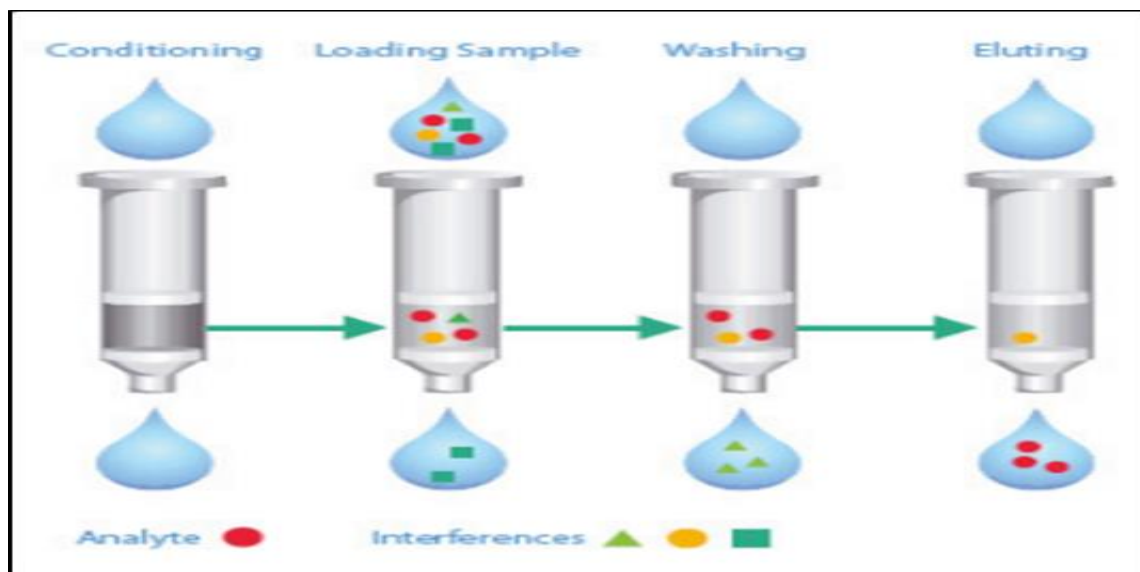


Figure IV.4 : Les étapes constituant une extraction en phase solide (Humbert, 2010)

IV.4.1.2.4. Extraction par fluides supercritiques (EFS)

L'extraction par fluide supercritique est une technique relativement récente qui présente divers avantages par rapport aux méthodes conventionnelles. Elle se fait à de basses températures favorables à l'extraction des composés thermosensibles. Elle permet aussi d'augmenter le rendement d'extraction de ces composés (**Garcia-Salas *et al.*, 2010**).

Le point critique d'une substance pure est le plus haut point de température et de pression auquel la substance est à l'état d'équilibre liquide-vapeur. Au-dessus de ce point, un fluide se forme et cet état est appelé état supercritique. Le fluide supercritique possède à la fois les caractéristiques du gaz et du liquide. Ce fluide de faible viscosité, de faible tension de surface et de fort coefficient de diffusion peut pénétrer les micropores des cellules végétales afin d'extraire au mieux les biomolécules (**Michel, 2011**). Il peut ainsi permettre l'extraction d'une large variété de composés organiques. Vu sa grande disponibilité, sa non-toxicité, son caractère non-inflammable et sa stabilité chimique, le CO₂ est le solvant le plus utilisé à l'état supercritique pour l'extraction des biomolécules: T = 31,1 °C et P = 73,3 MPa (**Garcia-Salas *et al.*, 2010**).

Cependant, les polyphénols ne sont pas totalement extraits par le CO₂ supercritique à cause de leur forte polarité. L'extraction des polyphénols par cette technique nécessite l'ajout des modificateurs organiques tels que le méthanol (**Stalikas, 2007**).

IV.4.1.2.5. Extraction par liquide pressurisé (ELP)

Cette technique alternative d'extraction est réalisée à pression élevée. Cela permet d'augmenter la température d'ébullition du solvant et de réaliser l'extraction à températures plus élevées qu'à pression ambiante. La haute pression appliquée, le plus souvent comprise entre 4 et 20 MPa, assure que le solvant se maintient à l'état liquide à la température appliquée (**Ramos *et al.*, 2002**). Les températures élevées d'extraction favorisent le transfert de matière et augmentent les taux d'extraction, parce qu'elles impliquent généralement : une augmentation de la capacité des solvants pour la solubilisation de solutés, une augmentation des taux de diffusion, une meilleure rupture des liaisons soluté-matrice, une diminution de la viscosité du solvant et une diminution de la tension superficielle (**Ramos *et al.*, 2002 ; Richter *et al.*, 1996**).

L'extraction par liquide pressurisé est également connue comme extraction par solvant sous pression, extraction par solvant sous critique ou extraction accélérée par solvant. Lorsque l'eau est utilisée comme solvant, l'ELP est généralement appelée extraction à l'eau surchauffée, extraction avec de l'eau sous-critique, extraction avec de l'eau pressurisée ou extraction avec de l'eau chaude sous pression (**Pronyk & Mazza, 2009**).

L'ELP nécessite généralement moins de temps et une plus faible consommation de solvant organique par rapport aux techniques conventionnelles (Mendiola et al., 2007). L'utilisation de l'ELP pour l'extraction de polyphénols à partir de co-produits de fruits et légumes a été brevetée (King & Grabiell., 2007).

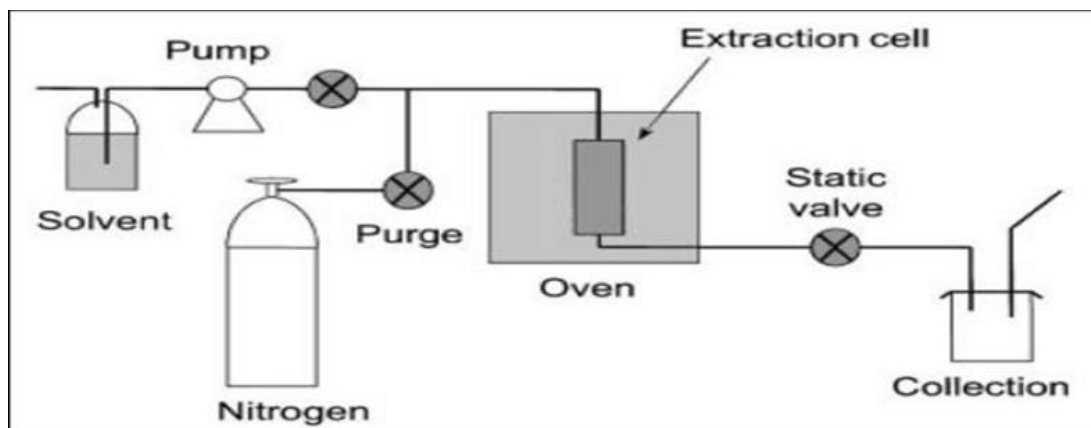


Figure IV.5 : Schéma de l'appareil d'extraction de liquide sous pression (ELP).
(Maarasyid *et al.*, 2014)

IV.4.2. Quantification des polyphénols totaux

IV.4.2.1. Test de Folin-Ciocalteu

Le test de Folin-Ciocalteu (F-C) est le plus couramment utilisé pour déterminer la teneur totale en composés phénoliques dans divers échantillons de plantes ou d'aliments. Les composés phénoliques à valeur chimiopréventive et thérapeutique présentent un intérêt scientifique dans la gestion d'innombrables maladies chroniques depuis 1990. Les composés phénoliques sont les principaux contributeurs à la capacité antioxydante des échantillons de fruits, de légumes, de céréales ou de plantes. Le test F-C est une méthode de colorimétrie basée sur les réactions SET entre le réactif F-C et les composés phénoliques (Sánchez-Rangel *et al.*, 2013). Les composés phénoliques sont de bons piègeurs de radicaux oxygénés, car le potentiel de réduction des électrons des radicaux phénoliques est inférieur à celui des radicaux oxygénés et les radicaux phénoxyles sont moins réactifs que les radicaux oxygénés. Ainsi, le piégeage des radicaux réactifs de l'oxygène par les composés phénoliques empêche la poursuite des réactions d'oxydation (Aktumsek *et al.*, 2011). Le test F-C a été mis au point pour améliorer le test de Folin-Denis (F-D), initialement conçu pour déterminer la concentration en protéines totales en mesurant les teneurs en tryptophane et en tyrosine. Par la suite, il a été constaté que le test F-C était plus sensible et plus reproductible que le test F-D (Aktumsek *et al.*, 2011) Cependant, le

test F-C n'est pas spécifique, car d'autres substances, à savoir les sucres réducteurs et l'acide ascorbique, qui sont très abondants dans les extraits alimentaires végétaux, peuvent réduire le réactif F-C, ce qui fausse les résultats du test F-C. Le réactif F-C est préparé en dissolvant 100 g de tungstate de sodium ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et 25 g de molybdate de sodium ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dans 700 ml d'eau distillée. Environ 50 ml de HCl concentré et 50 ml d'acide phosphorique à 85 % sont ajoutés pour acidifier la solution. La solution acidifiée est portée à ébullition pendant 10 heures et laissée à refroidir avant d'ajouter 150 g de $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. La solution résultante, qui est le réactif F-C, prend une couleur jaune intense (Aktumsek *et al.*, 2011). La chimie du réactif F-C n'est pas encore claire et on pense qu'il est composé de phosphotungstates/molybdates hétéropolyliques (Huang *et al.*, 2005). Au cours du dosage du F-C, la réaction entre le réactif F-C et les composés phénoliques se produit en milieu alcalin ($\sim\text{pH } 10$), que l'on atteint en ajoutant du carbonate de sodium (Na_2CO_3). Dans cette condition de base, la dissociation d'un proton phénolique conduit à la formation d'un ion phénolate, qui est responsable de la réduction du réactif F-C. La couleur jaune intense du réactif F-C est obtenue par la réduction de l'ion phénolique. Lors de la réduction, la couleur jaune intense du réactif F-C se transforme en couleur bleue (Aktumsek *et al.*, 2011). Le changement de couleur est illustré par un ruban de couleur figure IV.6.

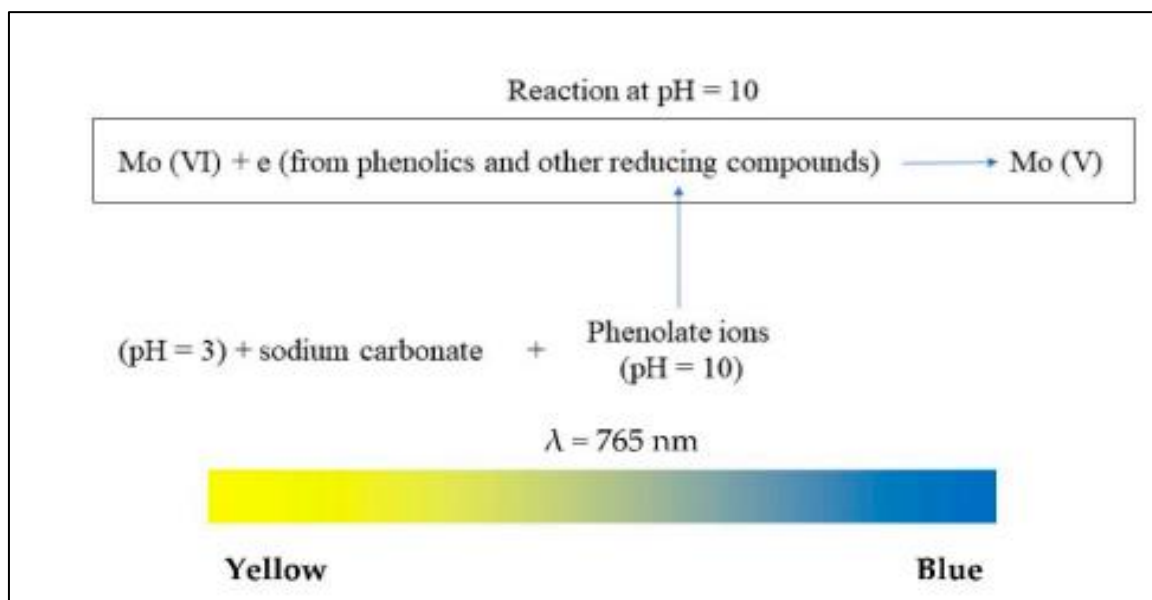


Figure IV.6 : Test de Folin-Ciocalteu. (Bibi Sadeer *et al.*, 2020).

IV.4.3. Evaluation de l'activité antioxydant *in vitro*

Plusieurs méthodes analytiques sont disponibles pour évaluer les caractéristiques antioxydantes des échantillons. Il existe trois catégories principales de techniques : la spectrométrie, la technique électrochimique et la chromatographie. Ils sont tous étudiés dans le

tableau IV.1 Cependant, dans cette section du travail, nous examinons les essais antioxydants qui utilisent la colorimétrie comme moyen de mesure des propriétés antioxydantes, car ils sont les méthodes les plus accessibles et les plus fréquemment employées pour évaluer les activités antioxydantes des échantillons biologiques.

Essai de dosage des antioxydants	Principe de la méthode	Détermination du produit final
SPECTROMETRIE		
DPPH	Réaction antioxydante avec un radical organique	Colorimétrie
ABTS	Réaction antioxydante avec un radical organique	Colorimétrie
FRAP	Réaction antioxydante avec un complexe de Fe (III)	Colorimétrie
PFRAP	Réduction du ferricyanure de potassium par des antioxydants et réaction ultérieure du ferrocyanure de potassium avec Fe ³⁺	Colorimétrie
CUPRAC	Réduction du Cu (II) en Cu (I) par les antioxydants	Colorimétrie
ORAC	Réaction antioxydante avec les radicaux peroxydes, induite par AAPH	Perte de fluorescence de la fluorescéine
HORAC	Capacité antioxydante d'étouffer les radicaux OH générés par un système de type Fenton à base de Co (II)	Perte de fluorescence de la fluorescéine
TRAP	Capacité antioxydante à piéger les radicaux dérivés	Trempe par photochimiluminescence

	du luminol, générés par la décomposition de l'AAPH	
Fluorimétrie	Émission de lumière par une substance qui a absorbé de la lumière ou d'autres radiations électromagnétiques d'une longueur d'onde différente.	Enregistrement des spectres d'excitation/émission de fluorescence
TECHNIQUES ELECTROCHIMIQUES		
Voltampérométrie cyclique	Le potentiel d'une électrode de travail varie linéairement d'une valeur initiale à une valeur finale et vice-versa, et l'intensité du courant correspondant est enregistrée	Mesure de l'intensité du pic cathodique/anodique
Ampérométrie	Le potentiel de l'électrode de travail est fixé à une valeur fixe par rapport à une électrode de référence.	Mesure de l'intensité du courant généré par l'oxydation/réduction d'un analyte électroactif
Biampérométrie	Réaction de l'analyte (antioxydant) avec la forme oxydée d'une réaction d'oxydoréduction réversible.	Mesure du courant circulant entre deux électrodes de travail identiques, soumises à une faible différence de potentiel et immergées dans une solution contenant l'échantillon analysé et le couple redox réversible.
CHROMATOGRAPHIE		
GC	La séparation des composés d'un mélange est basée sur la répartition entre une phase stationnaire liquide et une	Détection par ionisation de flamme ou conductivité thermique

	phase mobile gazeuse.	
HPLC	La séparation des composés d'un mélange est basée sur la répartition entre une phase stationnaire solide et une phase mobile liquide de polarités différentes, à un débit et une pression élevés de la phase mobile.	Détection UV-vis (par exemple, réseau de diodes), fluorescence, spectrométrie de masse ou détection électrochimique
TLC	La séparation des composés est basée sur la répartition entre une phase stationnaire solide (gel de silice) et une phase mobile liquide (mélange d'acétate, d'acide formique et d'eau).	Photographie sous lumière visible

Tableau IV.1 : Différentes techniques utilisées pour mesurer l'activité antioxydante (Moharram & Youssef, 2014).

IV.4.4. Pourquoi observe-t-on une couleur particulière dans une réaction chimique antioxydant-oxydant ?

La lumière est un mélange de couleurs et la région visible du spectre électromagnétique est composée de différentes couleurs, à savoir le rouge, l'orange, le jaune, le vert, le bleu et le violet, couvrant une zone de longueur d'onde de 400 à 750 nm, comme représenté par la roue des couleurs de la figure IV.7. Lorsqu'une molécule absorbe la lumière à une longueur d'onde particulière, la couleur qui apparaît est la couleur complémentaire sur la roue chromatique. Par exemple, le DPPH donne un aspect violet profond parce qu'il absorbe un photon de lumière à 515-517 nm. Le 2,2-azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-acide sulfonique) (ABTS) absorbe à 734 nm pour donner une couleur bleu pâle, et ainsi de suite. (Bibi Sadeer *et al.*, 2020).

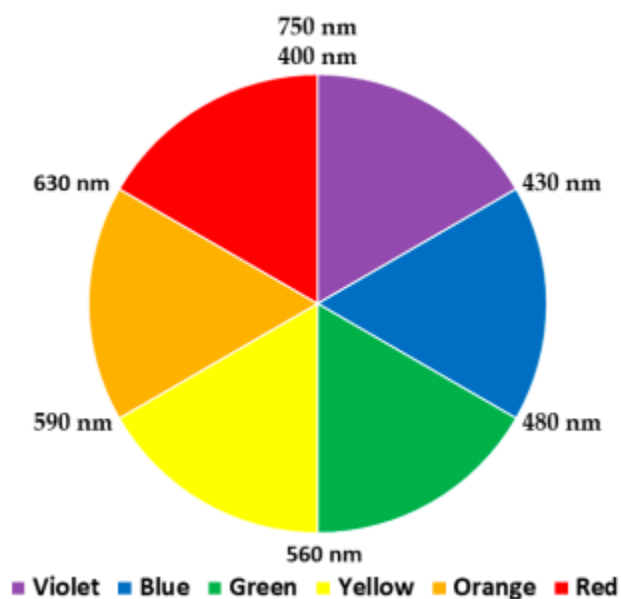


Figure IV.7. Roue des couleurs. (Bibi Sadeer *et al.*, 2020).

IV.5. Tests utilisés pour évaluer l'activité antioxydante

IV.5.1. Test de capacité de piégeage des radicaux 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH)

Le DPPH•radical a été découvert par Goldschmidt et Remm dans les années 1920. Il a été développé pour la première fois par Blois en 1958 (Blois, 1958; Foti, 2015). Ce radical est connu pour sa stabilité remarquable en raison de la délocalisation du radical dans les anneaux aromatiques. Il a une couleur violet profond intense (Gupta, 2015). Dans les essais, le radical est neutralisé en acceptant soit un atome d'hydrogène, soit un électron d'une espèce antioxydante (ou d'agents réducteurs) au cours desquels, il est converti en une forme réduite (DPPH ou DPPH-H) à la fin du processus. L'électron non couplé du radical DPPH absorbe fortement à 517 nm, donnant lieu à une couleur violette profonde. Cependant, quand un électron étranger s'accouple avec un autre électron, la couleur initiale se décolore progressivement en jaune pâle. La décoloration est simulée par le ruban de couleur ci-dessous



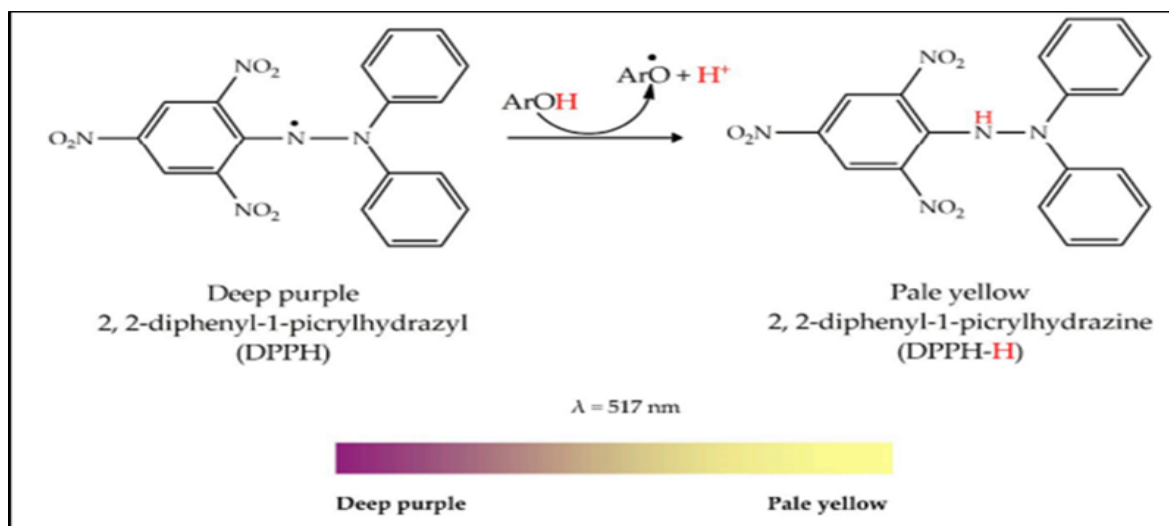
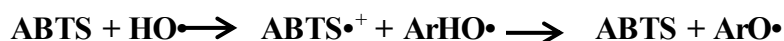
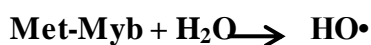


Figure IV.8 : Mécanisme de réaction du 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Bibi Sadeer *et al.*, 2020)

IV.5.2. L'activité de piégeage du radical ABTS

En 1993, Miller et Rice-Evans ont été les premiers à présenter le test $\text{ABTS}^{\bullet+}$, également connu sous le nom de TEAC (Miller *et al.*, 1993). Ce test a ensuite été amélioré par Re et ses collègues en 1999 (Re *et al.*, 1999). L'amélioration était liée à la manière dont le radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ était généré. Comparé au DPPH, qui est un radical stable par nature, le radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ est un radical qui devrait être généré par des réactions chimiques. À l'origine, la génération d'un cation radical ($\text{ABTS}^{\bullet+}$) était réalisée en faisant réagir la metmyoglobine (Met-Myb) avec du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) pour obtenir produire un radical hydroxyle (HO^{\bullet}). Ce dernier radical provoque la réduction de l'ABTS en son radical en présence ou non d'antioxydants. La réaction est illustrée ci-dessous :



Cependant, cette réaction présente une lacune majeure. Par exemple, l'AO peut réduire le radical HO^{\bullet} présent dans le système avec la metmyoglobine et l' $\text{ABTS}^{\bullet+}$, entraînant une surestimation de la capacité antioxydante, ce qui conduit à des résultats erronés. Pour surmonter ce problème, une méthode améliorée est proposée en éliminant le besoin de radical HO^{\bullet} et de metmyoglobine. La méthode améliorée génère le radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ en une seule réaction en faisant réagir l'ABTS avec du persulfate d'ammonium ou de potassium ($(\text{NH}_4)_2 \text{S}_2\text{O}_8$ ou $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$, respectivement) avant l'ajout d'AO. Il est important de noter que l'ABTS est dans un rapport stœchiométrique de 1 : 0,5 avec le sel persulfate, ce qui signifie que tous les ABTS ne

sont pas oxydés avant l'ajout d'AO (Re et al., 1999 ; Schaich et al., 2015 ; Miller et al., 1993). La réaction améliorée est illustrée ci-dessous :



L'oxydation de l'ABTS est une réaction longue qui prend environ 12 à 16 heures. La solution radicalaire $\text{ABTS}^{\bullet+}$ est ensuite diluée dans un mélange éthanol/méthanol jusqu'à atteindre une absorbance de $0,7 \pm 0,02$ à 734 nm. Cette dilution est effectuée uniquement avant le début du test, comme le soulignent clairement (Re et al., 1999). Il est intéressant de noter que le chromophore $\text{ABTS}^{\bullet+}$ de couleur bleu-vert peut absorber à différentes longueurs d'onde, à savoir 645, 734, 815 et 415 nm. Cependant, la plupart des chercheurs ont adopté la longueur d'onde de 734nm parce que les interférences possibles sont éliminées et que la turbidité de l'échantillon est réduite à cette longueur (Opitz et al., 2014 ; Cerretani & Bendini, 2010). Lorsque le radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ (forme instable) accepte un électron de l'AO, la couleur bleu-vert s'estompe en bleu pâle, ce qui montre la régénération d'ABTS (stable form). En ce qui concerne le temps de réaction, les études existantes ont signalé des temps de réponse différents, allant de 1 à 30 minutes. Re, Pellegrini, Proteggente, Pannala, Yang et Rice-Evans (Re et al., 1999), ont déclaré que l'achèvement d'une réaction ABTS peut être observé après la première minute elle-même, à l'exception de la cyanidine et du glutathion qui montrent une activité inhibiteur même après 4 minutes. Le mécanisme de la réaction est montré à la figure IV.9 La décoloration est illustrée par un ruban coloré.

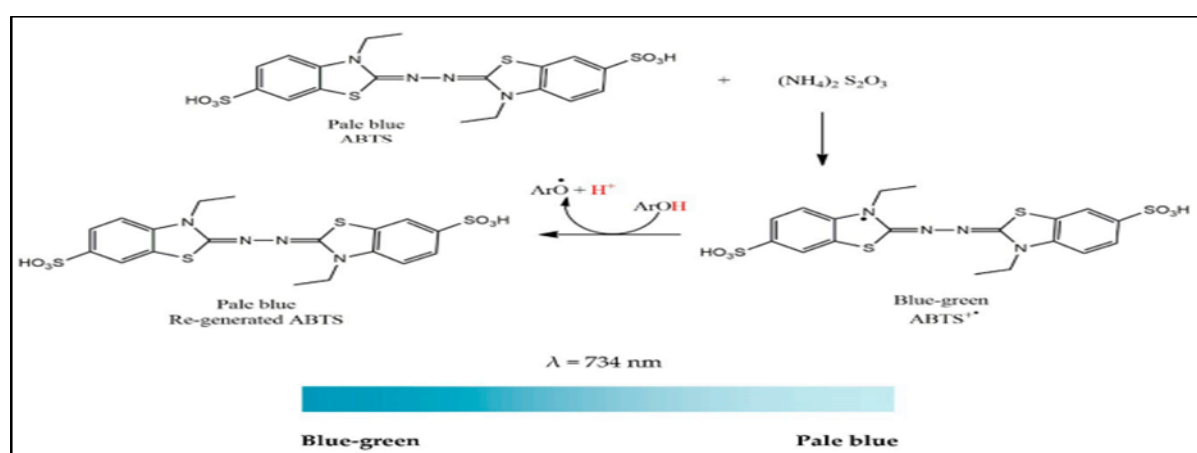
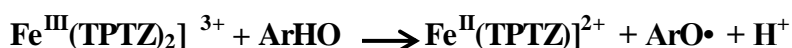


Figure IV.9 : Mécanisme de réaction du 2,20-azino-bis (acide 3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique) (ABTS) (Bibi Sadeer et al., 2020).

IV.5.3. Pouvoir antioxydant réducteur d'ions ferriques (FRAP)

Le pouvoir antioxydant réducteur des ions ferriques ou capacité de réduction ferrique du plasma, abrégé en FRAP, a été développé par Iris Benzie et J. J. Strain (**Benzie & Strain, 1996**). La méthode FRAP est basée sur la réduction de la ferrique-tripyridyltriazine $[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{TPTZ})]^{3+}$, formant un complexe ferreux de couleur bleu intense $[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{TPTZ})]^{2+}$ dans des conditions acides (pH 3,6). Après la réaction chimique suivante :



La couleur développée dans cet essai est un bleu intense, qui est la couleur complémentaire de l'orange, comme le montre la roue chromatique de la figure I.15. Cela explique pourquoi l'absorbance est lue à 593 nm.

Cette méthode a été développée de telle manière qu'elle puisse être utilisée dans tous les laboratoires en raison de sa simplicité, de sa haute reproductibilité et de sa simplicité d'instrumentation (**Benzie & Strain, 1996**). Le potentiel rédox du Fe (III) est d'environ 0,70 V, ce qui est comparable au potentiel rédox de l'ABTS•+ (0,68 V) selon la revue compilée par Huang et al. (2005). Il est intéressant de noter qu'il existe une fine frontière entre les méthodes ABTS•+ et FRAP, sauf que le test ABTS est effectué à pH neutre tandis que le FRAP est effectué dans des conditions acides (**Huang et al., 2005**). Cependant, ce test n'est pas spécifique. En effet, si une espèce présente dans le mélange réactionnel possède un potentiel rédox inférieur à celui du Fe (III) (<0,70 V), cette espèce sera responsable de la réduction de $[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{TPTZ})_2]^{3+}$ (**Benzie & Strain, 1996**), conduisant à une sous-estimation. Il est important de noter que lors de la préparation du réactif FRAP, il est essentiel d'ajouter les réactifs dans un ordre spécifique. Par exemple, un tampon acétate est ajouté en premier. FeCl_3 est ensuite ajouté, tandis que TPTZ est ajouté en dernier. Cet ordre est vital pour empêcher la réduction de FeCl_3 par TPTZ. Le changement de couleur et le mécanisme de réaction sont présentés à la figure IV.10 .

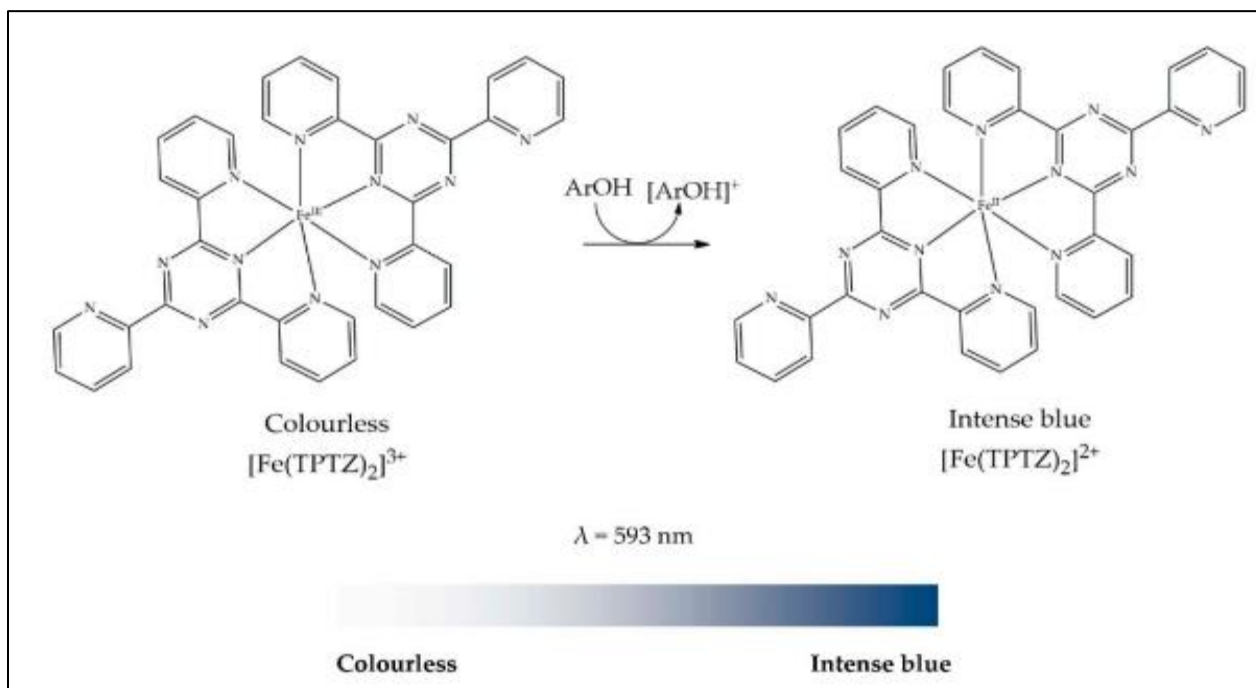


Figure IV.10: Mécanisme de réaction du pouvoir antioxydant réducteur ferrique (FRAP) (Bibi Sadeer *et al.*, 2020).

IV.5.4. Capacité antioxydante réductrice du cuivre (CUPRAC)

La méthode CUPRAC a été développée par Apak, Guclu, Ozyurek et Karademir (**Apak *et al.*, 2004**) du département de chimie analytique de l'université d'Istanbul, sept ans après le développement de la méthode FRAP. La seule raison du développement de ce test était de proposer une méthode qui pourrait exprimer « l'antioxydant total » comme indice nutritionnel pour l'étiquetage des aliments en raison de l'absence d'une méthode de quantification standard. En effet, cette méthode s'est avérée efficace pour de nombreux polyphénols (à savoir les acides phénoliques, les acides hydroxycinnamiques, les flavonoïdes, les caroténoïdes et les anthocyanes) en plus des thiols, des AO synthétiques et des vitamines C et E. Elle a été utilisée par de nombreux chercheurs dans différents laboratoires au cours des dernières années depuis son développement. Le chromogène utilisé dans ce test est le cation bis(néocuproïne) cuivre (II) $[\text{Cu}(\text{Nc})_2]^{2+}$. Lors de sa réduction par un AO, le chromophore bleu clair est réduit en un chélate de cuivre (I) bis(néocuproïne) jaune orangé $[\text{Cu}(\text{Nc})_2]^+$ qui peut être lu à 450 nm. Le temps de réaction pour atteindre l'achèvement peut varier entre 30 et 60 minutes, en fonction de la rapidité de l'AO. Selon une étude complète compilée par (**Özyürek *et al.*, 2011**) il est essentiel de permettre l'achèvement de la réaction CUPRAC. Si une AO se colore lentement, une incubation à 50 °C dans un bain-marie pendant 20 minutes peut être nécessaire, ce qui est considéré comme une limitation. Lors de l'analyse CUPRAC, un échantillon à blanc sans chlorure de cuivre (II)

(CuCl₂) doit être préparé, car l'absorbance est mesurée entre 400 et 500 nm. Cependant, dans le test FRAP, aucun échantillon à blanc n'est requis, puisque l'absorbance chute après 500 nm. Après la réaction chimique suivante :

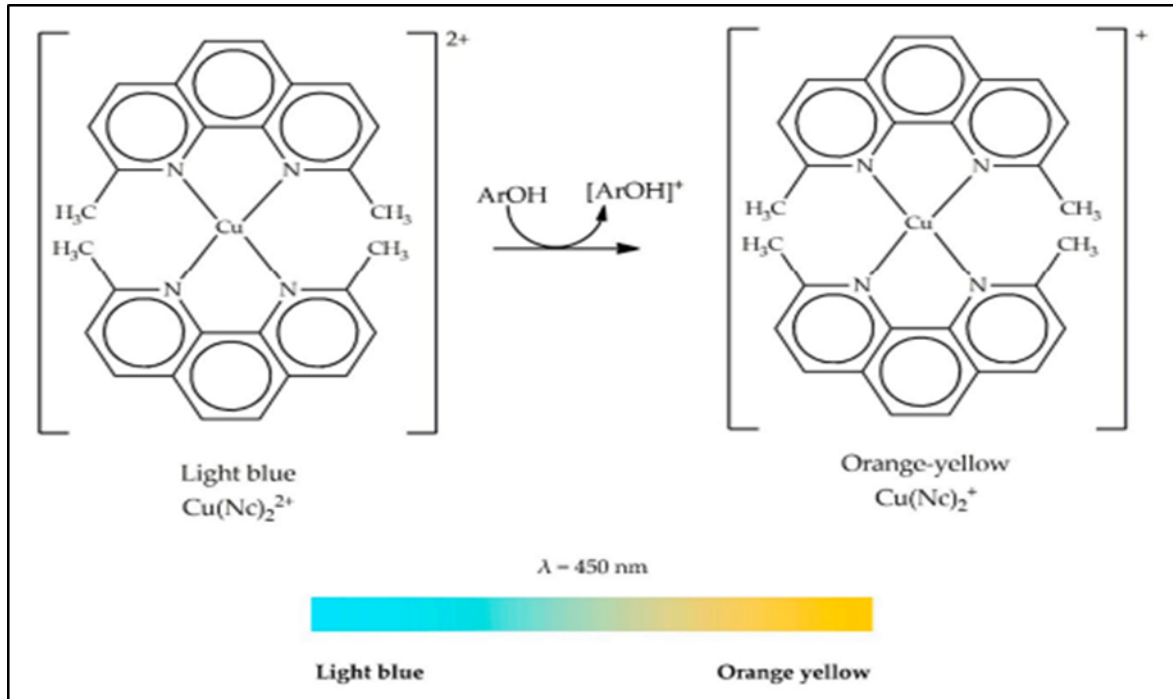
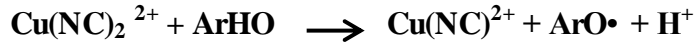


Figure IV.11 : Mécanisme de réaction de la capacité antioxydante réductrice du cuivre (CUPRAC) (Bibi Sadeer *et al.*, 2020).

Chapitre V : Résultats et discussion

V. Résultats et discussion

V.1. Analyse visuelle des activités antioxydantes des composants phénoliques des plantes de la famille des chénopodiacées

Pour chaque paramètre étudié, nous avons réalisé des diagrammes circulaires afin de visualiser la répartition et l'importance relative des différents éléments. Ces diagrammes nous permettent de mieux comprendre les tendances et les résultats de notre analyse.

V.1.1. Analyse des parties de la plante utilisée

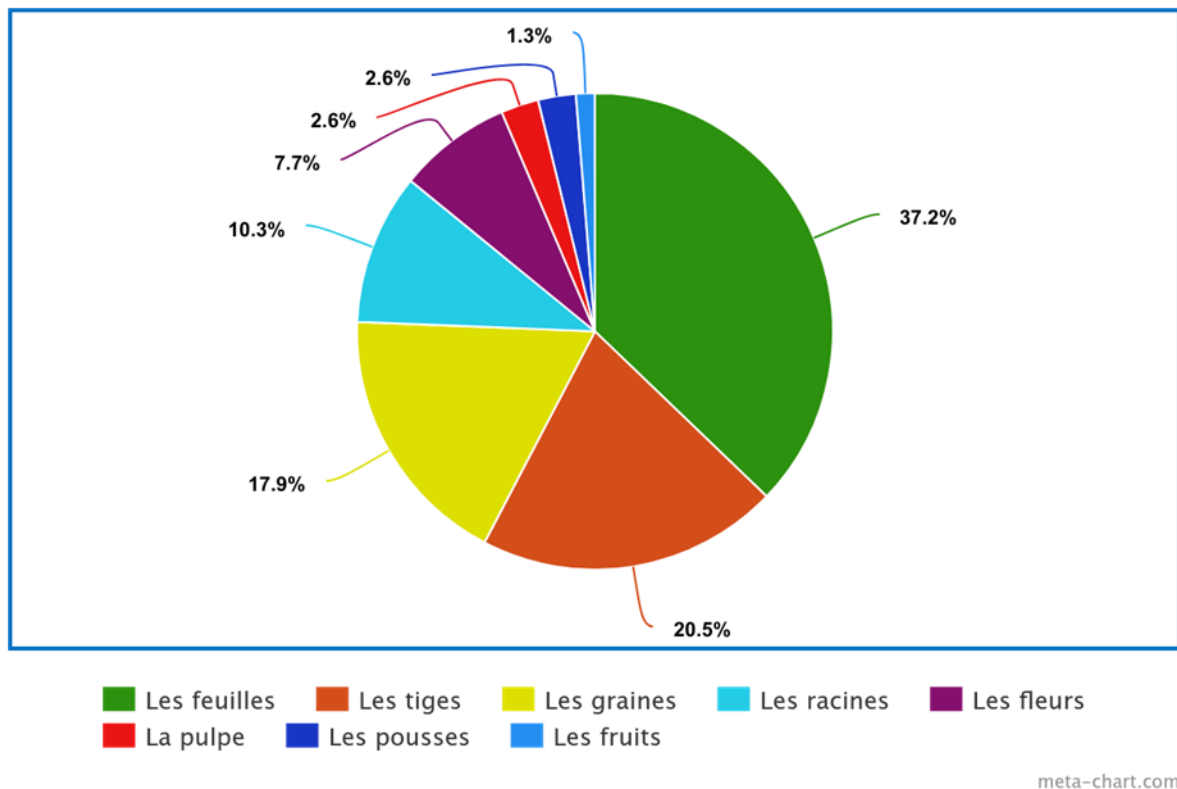


Figure V.1 : Répartition des parties végétales utilisées dans les articles étudiés.

✓ Observations

Nous observons plusieurs tendances clés en analysant les données sur les parties des plantes de la famille des chénopodiacées utilisées pour étudier l'activité antioxydante des composés phénoliques. Les parties des plantes étudiées se répartissent comme suit :

🌿 Feuilles (37.2%) :

Les feuilles sont les échantillons les plus fréquemment analysés. Cette dominance s'explique par leur richesse en composés phénoliques tels que les flavonoïdes et les tanins, reconnus pour leurs puissantes propriétés antioxydantes.

✚ **Tiges (20.5%) :**

Les tiges représentent une proportion significative des études. Bien que généralement moins riches que les feuilles, elles contiennent des quantités substantielles de composés phénoliques, ce qui les rend intéressantes pour les recherches antioxydantes.

✚ **Graines (17.9%) :**

Les graines sont également largement étudiées en raison de leur haute teneur en composés bioactifs et leur potentiel antioxydant, notamment dans des espèces comme le quinoa.

✚ **Racines (10.3%) :**

Les racines, bien que moins étudiées, contiennent des composés phénoliques uniques et offrent des propriétés médicinales intéressantes.

✚ **Fleurs (7.7%) :**

Les fleurs sont une source notable de composés phénoliques, bien que moins fréquente dans les études comparées aux feuilles et aux graines. Les jeunes pousses, malgré leur faible représentation, peuvent contenir des concentrations élevées de composés bénéfiques

➤ **Parties Moins Étudiées**

✚ **Pousses (2.6%) , et Pulpe (2.6%) :** Ces parties sont sous-explorées mais possèdent un potentiel important pour la découverte de nouveaux antioxydants.

✚ **Fruits (1.3%) :** Les fruits, malgré leur faible représentation, peuvent contenir des concentrations élevées de composés bénéfiques.

✓ **Conclusion**

Cette analyse démontre que les feuilles et les tiges des plantes de la famille des chénopodiacées sont les plus étudiées pour leur activité antioxydante, probablement en raison de leur haute concentration en composés phénoliques. Les graines suivent de près, soulignant leur potentiel antioxydant élevé. Les racines et les fleurs, bien que moins couramment analysées, offrent des propriétés médicinales uniques qui méritent une attention accrue.

Les parties moins étudiées, telles que les pousses, la pulpe et les fruits, représentent des opportunités intéressantes pour de futures recherches. En élargissant les études à ces parties souvent négligées, il est possible de découvrir de nouveaux antioxydants naturels et d'optimiser l'utilisation des ressources végétales.

En somme, une exploration plus approfondie et diversifiée des différentes parties des chénopodiacées peut non seulement enrichir notre compréhension des composés phénoliques et de leurs bienfaits pour la santé, mais aussi ouvrir de nouvelles avenues pour leur application dans les industries de la santé, de la nutrition et des cosmétiques. Cette approche holistique pourrait ainsi maximiser la valeur économique et écologique des chénopodiacées, contribuant à une exploitation plus durable et innovante de ces plantes.

V.1.2. Analyse des Méthodes d'Extraction Utilisée

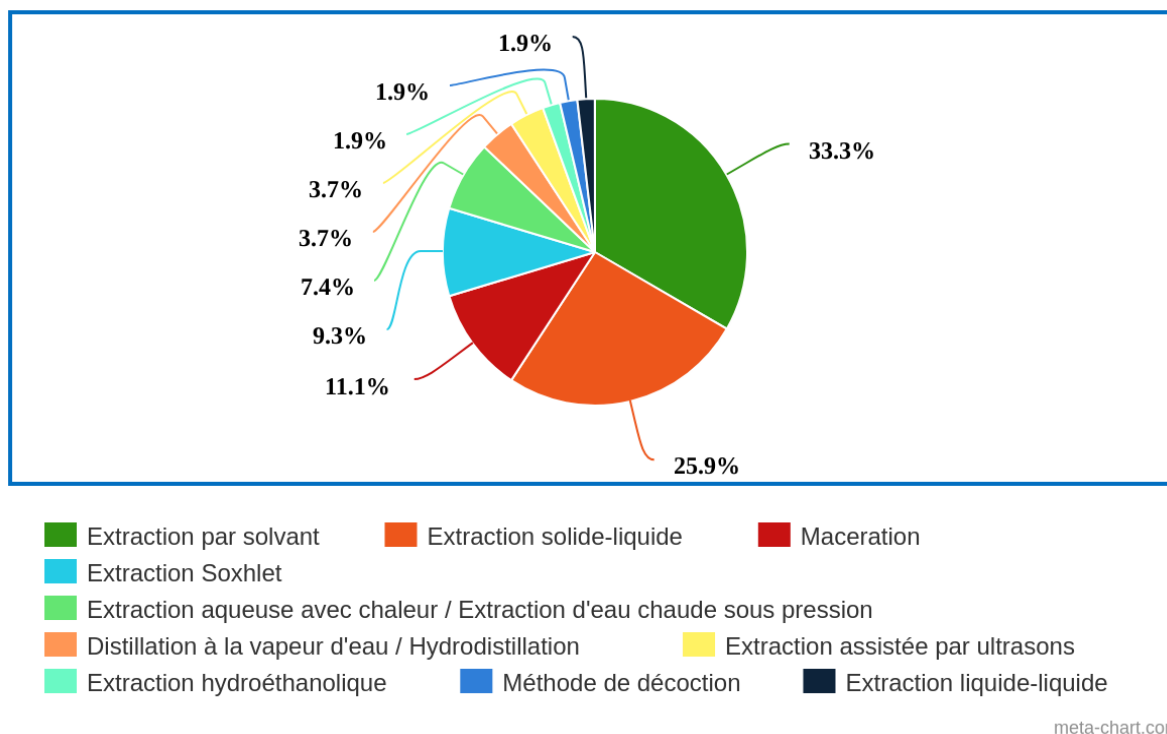


Figure V.2 : Répartition des méthodes d'extraction en laboratoire.

✓ Observations

Nous observons plusieurs tendances clés en analysant les méthodes d'extraction utilisées pour étudier l'activité antioxydante des composés phénoliques des plantes de la famille des chénopodiacées :

✚ Extraction par solvant (33.3%) :

L'extraction par solvant est la méthode la plus fréquemment utilisée. Cela s'explique par sa capacité à solubiliser une large gamme de composés phénoliques, maximisant ainsi le rendement et la diversité des extraits. Cette méthode est particulièrement efficace pour isoler des antioxydants puissants présents dans les chénopodiacées, tels que les flavonoïdes et les acides phénoliques.

✚ **Extraction solide-liquide (25.9%) :**

Représentant un quart des méthodes d'extraction, l'extraction solide-liquide est également très populaire. Elle est souvent utilisée pour des échantillons de grande taille ou pour des extraits nécessitant une purification minimale avant analyse. Cette méthode est essentielle pour les composés phénoliques de structures complexes, couramment trouvés dans cette famille de plantes.

✚ **Macération (11.1%) :**

La macération est une méthode simple mais efficace, particulièrement utile pour les extraits à froid qui préservent les composés thermosensibles. Elle est couramment utilisée dans les études sur les chénopodiacées pour obtenir des extraits riches en antioxydants sans dégradation thermique des composés.

✚ **Extraction Soxhlet (9.3%) :**

Bien que plus laborieuse, l'extraction Soxhlet permet une extraction continue, ce qui est avantageux pour obtenir des extraits concentrés. Cela est crucial pour étudier l'activité antioxydante des composés phénoliques en grande quantité et en haute pureté.

✚ **Extraction aqueuse avec chaleur/Extraction d'eau chaude sous pression (7.4%) :**

Cette méthode est utile pour extraire des composés hydrosolubles et est souvent utilisée pour des applications où l'utilisation de solvants organiques est limitée. Dans le contexte des chénopodiacées, cela permet d'obtenir des extraits adaptés à des analyses biologiques et pharmacologiques.

✚ **Distillation à la vapeur d'eau/Hydrodistillation (3.7%) :**

Utilisée principalement pour les composés volatils, cette méthode est moins courante pour les phénoliques mais reste importante pour certains sous-ensembles de composés antioxydants.

✚ **Extraction assistée par ultrasons (3.7%) :**

Cette méthode innovante permet d'améliorer l'efficacité de l'extraction en réduisant le temps nécessaire et en augmentant le rendement. Elle est de plus en plus utilisée pour les études sur les chénopodiacées en raison de sa capacité à préserver l'intégrité des composés antioxydants.

✚ **Extraction hydroéthanolique (1.9%) :**

Utilisée pour extraire une gamme de composés polaires et non polaires, cette méthode combine les avantages de l'eau et de l'éthanol, rendant l'extraction plus complète.

✚ Méthode de décoction (1.9%) :

Traditionnellement utilisée, la décoction permet d'extraire des composés actifs par ébullition, mais peut dégrader certains composés thermosensibles, ce qui la rend moins fréquente pour les études modernes sur les antioxydants.

✚ Extraction liquide-liquide (1.9%) :

Principalement utilisée pour la purification et la fractionation des extraits, cette méthode aide à isoler des composés spécifiques pour une analyse détaillée de leur activité antioxydante.

✓ Conclusion

Nous observons que l'extraction par solvant et l'extraction solide-liquide sont les méthodes prédominantes, reflétant leur efficacité et leur adaptabilité pour l'étude des composés phénoliques dans les chénopodiacées. Les méthodes telles que la macération et l'extraction Soxhlet sont également couramment utilisées en raison de leurs capacités spécifiques à maximiser le rendement en antioxydants. Les méthodes aqueuses et assistées par ultrasons montrent une tendance croissante en raison de leur respect des composés thermosensibles et de leur efficacité améliorée. Globalement, cette diversité dans les techniques d'extraction souligne l'importance d'adapter la méthode choisie aux caractéristiques spécifiques des composés phénoliques étudiés, permettant ainsi une évaluation plus précise de leur activité antioxydante et de leurs potentiels bienfaits pour la santé.

V.1.3. Analyse des Solvants Utilisés pour l'Extraction des Composants

Phénoliques

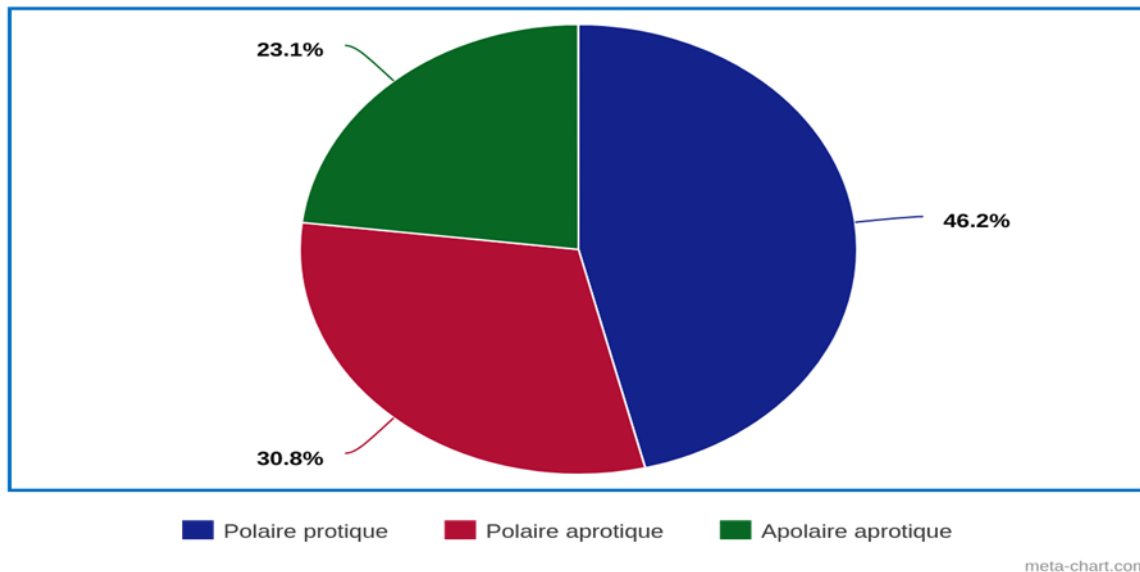


Figure V.3 : Répartition des solvants selon leur polarité et leur caractère Protique / Aprotique.

✓ Observations

Nous observons plusieurs tendances clés en analysant les données sur les types de solvants utilisés pour l'extraction des composés phénoliques des plantes de la famille des chénopodiacées :

🚩 Solvants Polaires Protiques (46.2%) :

Les solvants polaires protique dominent largement les méthodes d'extraction, représentant 46.2% des cas. Ce groupe inclut des solvants comme l'eau, le méthanol, l'éthanol, le mélange éthanol/eau, le butanol et l'acide chlorhydrique. La prévalence de ces solvants peut être attribuée à leur capacité à dissoudre une grande variété de composés phénoliques grâce à leurs propriétés hydrophiles et à leur capacité à former des liaisons hydrogène avec les phénols. Les solvants polaires protique sont particulièrement efficaces pour extraire des composés antioxydants tels que les flavonoïdes et les acides phénoliques, ce qui explique leur usage fréquent.

🚩 Solvants Polaires Aprotiques (30.8%) :

Les solvants polaires aprotiques, qui incluent l'acétone, le dichlorométhane, l'acétate d'éthyle et le chloroforme, représentent 30.8% des méthodes d'extraction utilisées. Ces solvants, bien qu'incapables de former des liaisons hydrogène aussi efficacement que les protique, sont très efficaces pour dissoudre des composés phénoliques plus spécifiques qui ne nécessitent pas

de liaison hydrogène pour être extraits. Leur utilisation permet de cibler des antioxydants spécifiques, ce qui peut être crucial pour certaines analyses.

✚ Solvants Apolaires Aprotiques (23.1%) :

Les solvants apolaires aprotiques tels que l'éther de pétrole, le n-hexane et l'éther diéthylique représentent 23.1% des solvants utilisés. Ces solvants sont généralement utilisés pour extraire des composés phénoliques qui sont moins polaires et qui n'interagissent pas fortement avec les solvants polaires. Leur capacité à dissoudre des composés non polaires permet d'isoler des fractions spécifiques de phénols qui pourraient être perdus avec des solvants plus polaires.

✓ Conclusion

En conclusion, la répartition des solvants utilisés pour l'extraction des composés phénoliques des plantes de la famille des chénopodiacées reflète une approche stratégique pour maximiser l'efficacité de l'extraction des antioxydants. Les solvants polaires protique sont les plus couramment utilisés en raison de leur capacité à extraire une large gamme de composés phénoliques, suivis des solvants polaires aprotiques qui permettent une extraction plus sélective. Les solvants apolaires aprotiques, bien qu'utilisés moins fréquemment, jouent un rôle important dans l'extraction de composés spécifiques. Cette distribution souligne l'importance de choisir le solvant approprié en fonction des propriétés chimiques des composés phénoliques ciblés pour optimiser l'évaluation de leur activité antioxydante.

V.1.4. Analyse de l'utilisation des polyphénols dans l'évaluation de l'activité antioxydante

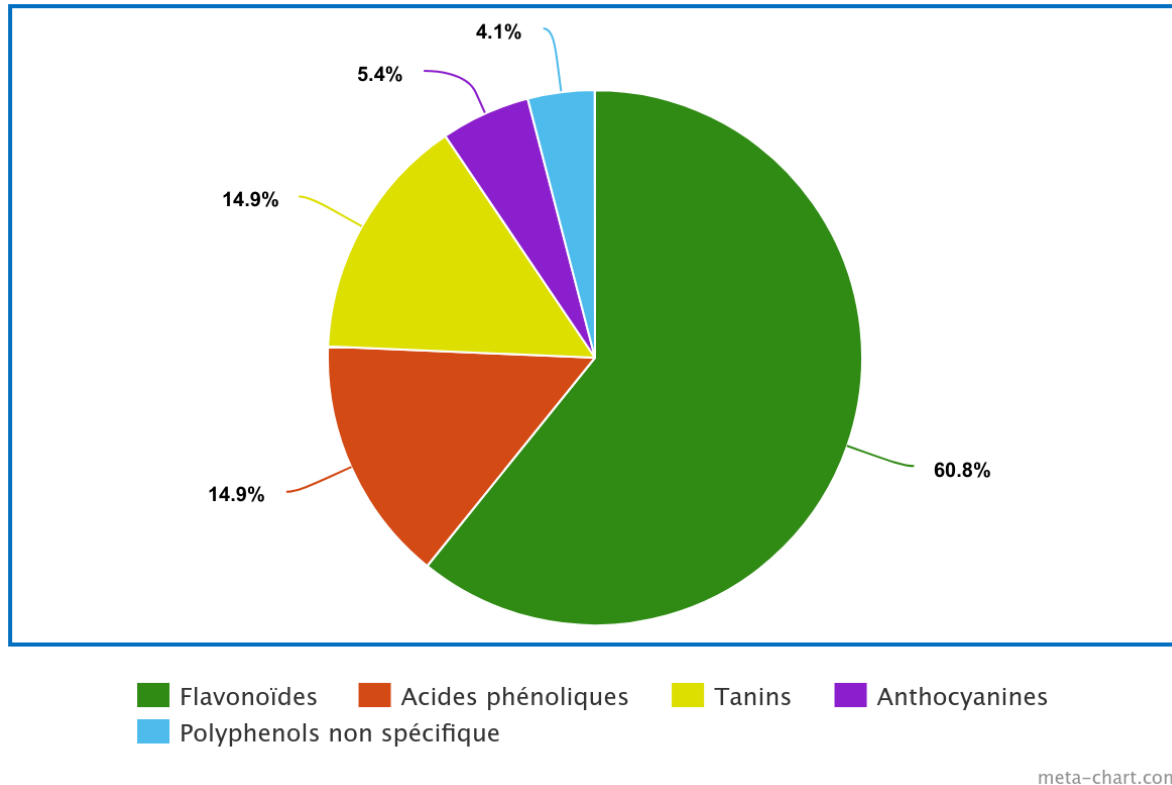


Figure V.4 : Répartition des types de polyphénols utilisés pour évaluer l'activité antioxydante.

✓ Observations

Nous observons plusieurs tendances clés en analysant les données sur les types de polyphénols utilisés pour évaluer l'activité antioxydante :

- ✚ **Flavonoïdes (60.8%) :** Les flavonoïdes dominent largement les méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante, représentant 60.8% des cas. Cette prévalence peut être attribuée à leur large présence dans les plantes et à leur efficacité prouvée dans la neutralisation des radicaux libres. Les flavonoïdes sont particulièrement reconnus pour leurs propriétés antioxydantes robustes, ce qui explique leur usage fréquent.
- ✚ **Acides phénoliques (14.9%) :** Les acides phénoliques sont également un groupe important, représentant 14.9% des évaluations. Ces composés sont connus pour leurs capacités antioxydantes et leur rôle dans la prévention des maladies liées au stress oxydatif. Leur structure chimique permet une interaction efficace avec les radicaux libres, contribuant ainsi à leur utilisation significative.

- ✚ **Tanins (14.9%)** : Les tanins, avec également 14.9%, sont utilisés pour leurs propriétés antioxydantes, bien que leur mécanisme d'action puisse varier par rapport aux flavonoïdes et aux acides phénoliques. Les tanins sont capables de précipiter les protéines et d'inhiber l'oxydation lipidique, ce qui les rend précieux dans certaines applications.
- ✚ **Anthocyanines (5.4%)** : Les anthocyanines représentent 5.4% des types de polyphénols utilisés. Ces pigments naturels sont connus pour leurs puissantes propriétés antioxydantes et leur capacité à donner des couleurs vives aux plantes. Leur utilisation est particulièrement notée dans les études visant à comprendre les effets des composés colorants.
- ✚ **Polyphénols non spécifiques (4.1%)** : Les polyphénols non spécifiques, représentant 4.1%, regroupent les composés phénoliques qui ne sont pas classés dans les catégories précédentes. Cette catégorie inclut une variété de structures chimiques qui peuvent avoir des effets antioxydants divers, contribuant ainsi à la complexité de l'évaluation antioxydante.

✓ Conclusion

En conclusion, la répartition des types de polyphénols utilisés pour l'évaluation de l'activité antioxydante reflète une approche stratégique pour maximiser l'efficacité des évaluations. Les flavonoïdes, en raison de leur prévalence et de leur efficacité, sont les plus couramment utilisés. Les acides phénoliques et les tanins, malgré leur moindre proportion, sont essentiels pour une analyse complète des capacités antioxydantes. Les anthocyanines et les polyphénols non spécifiques, bien que moins représentés, jouent des rôles spécifiques dans l'évaluation des composés colorants et des structures chimiques diversifiées. Cette distribution souligne l'importance de choisir le type de polyphénol approprié en fonction des objectifs spécifiques de l'évaluation antioxydante.

V.1.5. Analyse des Tests d'Évaluation de l'Activité Antioxydante

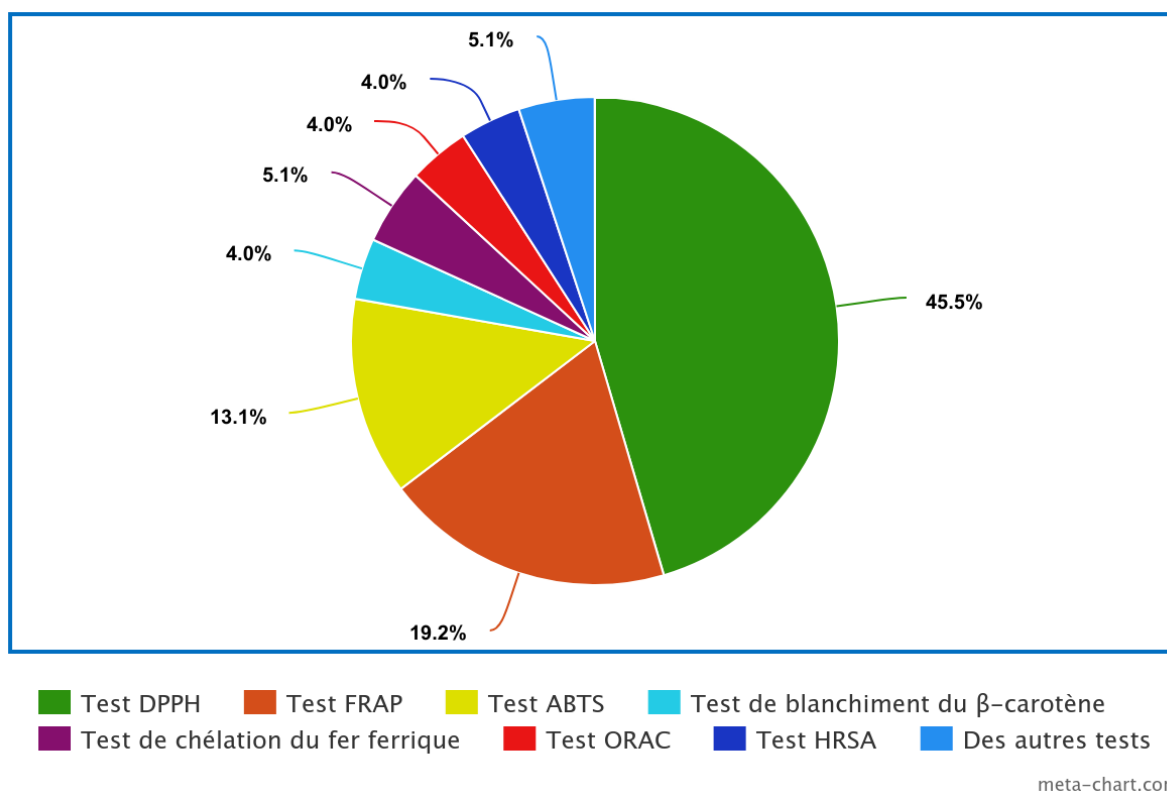


Figure V.5 : Répartition des tests in Vitro pour l'évaluation des propriétés antioxydantes et biochimiques

🚩 Test DPPH (45.5%) :

Le test DPPH est de loin le plus utilisé, représentant 45.5% de l'ensemble des tests. Cette prévalence peut s'expliquer par sa simplicité, sa rapidité et sa capacité à mesurer efficacement la capacité antioxydante des composés phénoliques. Ce test utilise le radical libre DPPH, stable et coloré, qui est réduit en présence d'antioxydants, ce qui diminue l'absorbance mesurée. Son usage prédominant souligne son efficacité et sa fiabilité pour l'évaluation des capacités antioxydantes.

🚩 Test FRAP (19.2%) :

Le test FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) est le deuxième test le plus utilisé, représentant 19.2%. Il mesure la capacité des antioxydants à réduire les ions ferriques (Fe^{3+}) en ions ferreux (Fe^{2+}). Ce test est apprécié pour sa capacité à évaluer le pouvoir réducteur global des extraits, fournissant ainsi une mesure quantitative directe de l'activité antioxydante.

✚ Test ABTS (13.1%) :

Le test ABTS est également couramment utilisé, représentant 13.1%. Il évalue la capacité des antioxydants à neutraliser le radical cationique ABTS^{•+}. Ce test est polyvalent car il peut être utilisé dans des milieux aqueux et lipidiques, offrant ainsi une mesure plus complète de l'activité antioxydante.

✚ Test de blanchiment du β -carotène (4.0%) :

Ce test, représentant 4.0%, mesure la capacité des antioxydants à protéger le β -carotène de l'oxydation. Il est particulièrement utile pour évaluer l'efficacité des antioxydants dans des systèmes lipidiques, similaires aux membranes cellulaires.

✚ Test ORAC (4.0%) :

Le test ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity), représentant 4.0%, mesure la capacité des antioxydants à neutraliser les radicaux peroxydes. Ce test est crucial pour quantifier l'efficacité des antioxydants contre les radicaux oxygénés, reflétant ainsi leur potentiel protecteur dans les systèmes biologiques.

✚ Test HRSA (4.0%) :

Le test HRSA (Hydroxyl Radical Scavenging Activity), représentant 4.0%, évalue la capacité des antioxydants à neutraliser les radicaux hydroxyles. Les radicaux hydroxyles étant extrêmement réactifs et dommageables pour les cellules, ce test est essentiel pour comprendre les mécanismes de protection antioxydante.

✚ Test de chélation du fer ferrique (5.1%) :

Ce test, à 5.1%, évalue la capacité des composés à chélater les ions ferreux, empêchant ainsi la formation de radicaux libres via la réaction de Fenton. Ce test est important pour les mécanismes de protection contre l'oxydation induite par les métaux.

✚ Autres tests (5.1%) :

Les autres tests représentent 5.1% et incluent diverses méthodes moins courantes comme Méthode au thiocyanate, Test NO, Photo-oxydation à la riboflavine, Test de piégeage du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂), et CUPRAC mais néanmoins pertinentes pour évaluer l'activité antioxydante. Ces méthodes peuvent être spécifiques à certains types de composés ou à des conditions expérimentales particulières.

✓ Conclusion

L'analyse montre une forte préférence pour les tests DPPH et FRAP, soulignant leur importance et leur efficacité dans l'évaluation de l'activité antioxydante des composants

phénoliques. La diversité des tests utilisés reflète la complexité des mécanismes antioxydants et la nécessité de multiples approches pour une évaluation complète. Cette répartition des méthodes de test nous aide à comprendre les différentes dimensions de l'activité antioxydante et à choisir les méthodes les plus appropriées pour notre étude sur les plantes de la famille des chénopodiacées.

V.1.6. Analyse des Activités Biologiques des Composés Phénoliques chez les Chénopodiacées

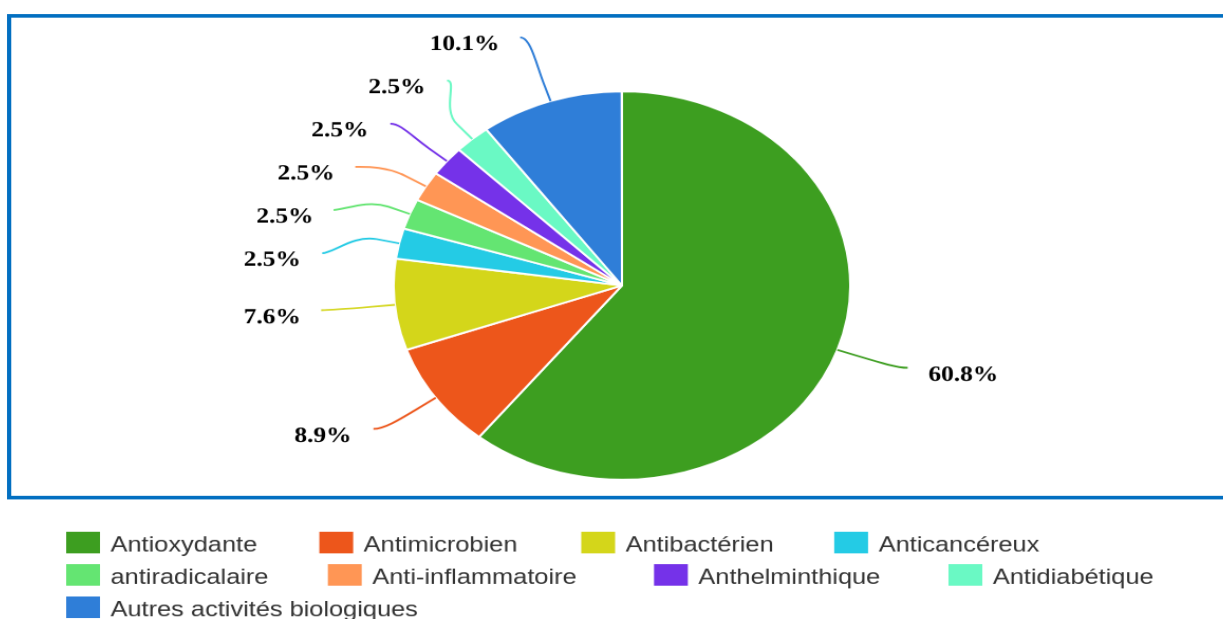


Figure V.6 : Répartition des principales activités biologiques.

✓ Observations

Nous observons une distribution variée des activités biologiques dans notre diagramme circulaire, reflétant la diversité des mécanismes d'action des composants phénoliques extraits des plantes de la famille des chénopodiacées.

✚ **Activité antioxydante (60.8%) :**

L'activité antioxydante prédomine, représentant la plus grande part du diagramme à 60.8%. Cette prévalence souligne l'importance accordée à la capacité des composés phénoliques à neutraliser les radicaux libres, contribuant ainsi à la protection contre le stress oxydatif et diverses maladies.

✚ **Activité antimicrobienne (8.9%) :**

L'activité antimicrobienne constitue une part significative à 8.9%. Cette caractéristique met en évidence le potentiel des composés phénoliques pour inhiber la croissance des

microorganismes pathogènes, offrant ainsi des perspectives dans le domaine de la lutte contre les infections.

✚ **Activité antibactérienne (7.6%):**

L'activité antibactérienne, représentant 7.6%, souligne la capacité des composés phénoliques à cibler spécifiquement les bactéries pathogènes, offrant ainsi des alternatives potentielles aux antibiotiques traditionnels.

✚ **Activité anticancéreuse (2.5%):**

Une part de 2.5% est attribuée à l'activité anticancéreuse, mettant en lumière le rôle potentiel des composés phénoliques dans la prévention ou le traitement de certains types de cancer, bien que cette part soit relativement faible par rapport à d'autres activités.

✚ **Activité antiradiculaire (2.5%):**

L'activité antiradiculaire, également à 2.5%, souligne la capacité des composés phénoliques à neutraliser les radicaux libres, contribuant ainsi à la protection contre diverses maladies associées au stress oxydatif.

✚ **Activité anti-inflammatoire (2.5%):**

L'activité anti-inflammatoire, représentant également 2.5%, met en évidence le potentiel des composés phénoliques à réduire l'inflammation, offrant ainsi des perspectives dans le traitement des maladies inflammatoires chroniques.

✚ **Activité anthelminthique (2.5%):**

Une part de 2.5% est attribuée à l'activité anthelminthique, soulignant la capacité des composés phénoliques à lutter contre les infections parasitaires causées par les helminthes.

✚ **Activité antidiabétique (2.5%):**

L'activité antidiabétique, également à 2.5%, met en évidence le potentiel des composés phénoliques à réguler la glycémie, offrant ainsi des perspectives dans la gestion du diabète.

✚ **Autres activités biologiques (10.1%):**

Enfin, les autres activités biologiques représentent 10.1%, englobant un ensemble diversifié de fonctions, telles que l'activité protoscolicide, hépatoprotectrice, cytotoxique, cytoprotectrice, ainsi que diverses activités phénoliques, telles que les bétanines, antifongiques, et phytotoxiques. Cette diversité souligne la complexité des effets des composés phénoliques et la nécessité d'une approche holistique dans leur évaluation.

✓ Conclusion

Pour conclure, l'analyse des activités biologiques des composants phénoliques des plantes de la famille des chénopodiacées met en lumière leur diversité fonctionnelle, notamment leur potentiel antioxydant, antimicrobien et antibactérien. Ces résultats soulignent l'importance de ces composés dans la recherche médicale et pharmaceutique, tout en soulignant la nécessité d'une approche exhaustive pour comprendre pleinement leur impact biologique.

Conclusion et Perspectives

Conclusion et Perspectives

L'étude sur l'activité antioxydante des composants phénoliques des plantes de la famille des chénopodiacées a mis en évidence l'importance de ces composés dans la lutte contre le stress oxydatif et leurs potentiels thérapeutiques. Les différentes espèces étudiées, telles que *Beta vulgaris* L., *Chenopodium album* L., *Chenopodium quinoa* Willd., *Atriplex halimus* L., et *Hammada scoparia*, ont montré des propriétés antioxydantes significatives, soulignant leur intérêt pour la santé humaine. Les composés phénoliques, notamment les flavonoïdes, les acides phénoliques, et les tannins, jouent un rôle crucial dans la neutralisation des radicaux libres, la réduction de l'inflammation, et la protection contre diverses pathologies. Les méthodes d'extraction et les tests d'évaluation de l'activité antioxydante utilisés ont permis de démontrer l'efficacité de ces composés, confirmant ainsi leur potentiel d'application dans les domaines de la nutrition, de la médecine, et de la cosmétique.

Pour aller plus loin dans cette recherche, plusieurs axes peuvent être envisagés. Il est important de mener des essais cliniques pour évaluer l'efficacité des extraits phénoliques des chénopodiacées chez l'homme, notamment dans la prévention et le traitement des maladies chroniques liées au stress oxydatif. Le développement et l'optimisation de techniques d'extraction plus écologiques et efficaces pour maximiser la récupération des composés phénoliques tout en réduisant l'impact environnemental est également essentiel. De plus, explorer d'autres espèces de la famille des chénopodiacées permettrait d'identifier de nouvelles sources potentielles de composés antioxydants et d'élargir la base de connaissances sur cette famille de plantes. Enfin, évaluer les possibilités d'intégration des extraits phénoliques dans des produits alimentaires, cosmétiques, et pharmaceutiques permettrait de développer des produits innovants aux propriétés antioxydantes.

Références
Bibliographiques

Références Bibliographies

- Aidoud, A. & Aidoud-Lounis, F. (1990). Développement et dynamique de la végétation des écosystèmes steppiques en Afrique du Nord. *Sécheresse*, 1(2), 109-117.
- Aidoud, A. (1983). Contribution à l'étude des écosystèmes steppiques du Sud-Oranais (Algérie). Thèse de Doctorat d'État, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.
- Aktumsek, A.; Zengin, G.; Guler, G.O.; Cakmak, Y.S.; Duran, A. Screening for in vitro antioxidant properties and fatty acid profiles of five *Centaurea L.* species from Turkey flora. *Food Chem. Toxicol.* 2011, 49, 2914–2920
- Allali H., Benmehdi H., Dib M., Tabti B., Ghalem S., et Benabadji N. 2008. Phytotherapy of diabetes in west Algeria. *Asian Journal of Chemistry.* 20(4): 2701-2710
- Anizon, J.Y., Lemaire, B. & Surbled, M. (2003). Extraction assistée par micro-ondes, *Techniques de l'ingénieur ; F3060*, 1.
- Antolovich M., Prenzler P.D., Patsalides E., Mcdonald S et Robards K. (2002): Methods for testing antioxidant activity, *the Analyst*, Vol. 127, p: 183-198.
- Apak, R.; Guclu, K.; Ozyurek, M.; Karademir, S.E. Novel total antioxidant capacity index for dietary polyphenols and vitamins C and E, using their cupric ion reducing capability in the presence of neocuproine: CUPRAC method. *J. Agric. Food Chem.* 2004, 52, 7970–7981
- Asouri M., Ataee R., Ahadi A.A., Amini A., Moshaei M.R. 2013. Antioxydant and Free Radical Scavenging Activites of curcumin. *Asian Journal of Chemistry.* vol 25 (13) :7593-7595.
- Arousseau B. 2002. Les radicaux libres dans l'organisme des animaux d'élevage : conséquences sur la reproduction, la physiologie et la qualité de leurs produits. *INRA, Unité de recherches sur les Herbivores*, 15 (1) : 67-82.
- Baba-Aïssa F. (2000), *Encyclopédie des Plantes Utiles, Flore d'Algérie et du Maghreb, Substances Végétales d'Afrique, d'Orient et d'Occident.* EDAS Algérie.
- Basli, A., Chibane, M., Madani, K., and Oukil, N. (2012). "Activité antibactérienne des polyphénols extraits d'une plante médicinale de la flore d'Algérie: *Origanum glandulosum* Desf." *Phytothérapie*, 10(1), 2-9.
- Baumann, N. et al. (1993). Plantes halophytes: stratégies d'adaptation à un environnement salin. *Revue d'Écologie*, 48(4), 113-134.

- Beckman, C. H. (2000). Phenolic-storing cells: Keys to programmed cell death and periderm formation in wilt disease resistance and in general defence responses in plants?. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 57(3), 101-110.
- Bellakhdar J. (1997). La pharmacopée marocaine traditionnelle. Médecine arabe ancienne et savoirs populaires .Ibis Press. p. 247.
- Benard K. (2009). Etude de l'impact de la nutrition azotée et des conditions de culture sur le contenu en polyphénols chez la tomate. Thèse de doctorat. Nancy Université-Inra. 260 P
- Benrebiha fz. 1987. Contribution a l'étude de la germination de quelques espèces d'atriplex locales et introduites. Thèse de magister. Université d'annabi, algérien. P 119.
- Benzie, I.F.; Strain, J.J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay. *Anal. Biochem.* 1996, 239, 70–76
- Berger M.M. (2006) : Manipulations nutritionnelles du Stress Oxydant: état des connaissances, *Nutritional manipulation of Oxidative Stress : review of the evidence. Nutrition clinique et métabolisme*, Vol. 20, p. 48-53.
- Berger M.M. et Chiolero R.L. (2001) : Apport d'antioxydants en réanimation : pourquoi, lesquels, avec quels objectifs. *Réanimation*, Vol. 10, p. 527-534.
- Betterave. (s. d.). *Vulgaris Médical*. [Enligne], consulté 06 juin 2024, à l'adresse <https://www.vulgarismedical.com/phytotherapie/betterave>
- Bibi Sadeer, N., Montesano, D., Albrizio, S., Zengin, G., & Mahomoodally, M. F. (2020). The versatility of antioxidant assays in food science and safety—Chemistry, applications, strengths, and limitations. *Antioxidants*, 9(8), 709. <https://doi.org/10.3390/antiox9080709>
- Birben, Esra, Umit Murat Sahiner, Cansin Sackesen, Serpil Erzurum, and Omer Kalayci. "Oxidative Stress and Antioxidant Defense." *World Allergy Organization Journal*, vol. 5, no. 1, 2012, pp. 9-19.
- Blois, M.S. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature* 1958, 181, 1199–1200.
- Boudet A. M. 2000. L'usine chimique. 9èmeconférence de l'université de tous les savoirs. France. P1-16.
- Bourgaud, F., Gravot, A., Milesi, S., & Gontier, E. (2001). Production of plant secondary metabolites: A historical perspective. *Plant Science*, 161(5), 839–851. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00490-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00490-3)

- Brewer, M. S. (2011). Natural Antioxidants: Sources, Compounds, Mechanisms of Action, and Potential Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(4), 221–247.
- Bruneton J. (1999) : pharmacognosie .phytochimie. Plantes médicinales.3^{ème}édition. TEC et DOC :Lavoisier, paris .ISBN 2-7430-0315-4 :227-387.
- Bruneton J. (1999) : plantes toxiques. végétaux dangereux pour l'Homme et les animaux.3^{ème} édition .TEC et DOC, paris : p 240-242.
- Bruneton J., 1993. Pharmacognosie, phytochimie des plantes médicinales. 2^{ème} édition Tec et Doc(Ed). Paris, 914p.
- Castroviejo, S. (1990). Flora Iberica: plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares. Real Jardín Botánico, CSIC.
- Cerretani, L.; Bendini, A. Chapter 67—Rapid assays to evaluate the antioxidant capacity of phenols in virgin olive oil. In *Olives and Olive Oil in Health and Disease Prevention*; Preedy, V.R., Watson, R.R., Eds.; Academic Press: San Diego, CA, USA, 2010; pp. 625–635
- Charles, D. J. (2013). Antioxidant properties of spices, herbs and other sources. *Springer* 4 (Vol. 9781461443100).
- Cowan M., 1999. Plant products as antimicrobial agents. *Clinical microbiology reviews*, vol.12, n.4, p.p.564-570.
- Cronquist, A. (1981). *An Integrated System of Classification of Flowering Plants*. Columbia University Press.
- Crozier, A., Jaganath, I. B., & Clifford, M. N. (2009). Phenols, polyphenols and tannins: an overview. In *Plant Phenolics and Human Health: Biochemistry, Nutrition and Pharmacology* (pp. 1-24). John Wiley & Sons, Inc.
- Dakora, F. D., & Phillips, D. A. (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil*, 245(1), 35-47.
- Defraigne J.O., Pincemail J.2008.Stresses Oxydant et antioxydants : mythes et réalités- *Revue Medical De Liège*, 63 : 10-19.
- Desmier, T. (2016). Les antioxydants de nos jours: Définition et applications = Antioxidants today: definition and applications [Limoges]. <http://aurore.unilim.fr/ori-oai-search/notice/view/unilim-ori-47443>.
- d'identification: Application aux molécules bioactives de l'argousier (Hippophaë rhamnoides). Doctorat. Université d'Orléans, Orléans, France. p 257.

- Divya, P. et al. (2011). Étude comparative de la végétation halophile dans différents écosystèmes salins du sud de l'Inde. *Journal of Environmental Biology*, 32(6), 731-740.
- Dixon N et Paiva., 1995. Stress induced phenylpropanoid metabolism in plant cell.
- Do, T. K. T. (2016). Évaluation des performances de la chromatographie sur couche mince haute performance (Hptlc) dans l'analyse (Qualitative et quantitative) des métabolites secondaires dans les extraits naturels [Phdthesis, COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019)]. <https://theses.hal.science/tel-01469641>
- Draye M., Estager J., Malacria M., Goddard J.-P., Ollivier C. (2009) *Sonochimie Organique (K1250)*. Editions Techniques de l'Ingénieur, France
- Duke J. A. 2003. Le grand livre du mois. Citées par Atsafack SS, Kodjio N, Fodouop S.P.Ch, Nbemafack A, Kuate J.R, Gatsing D. 2016. In vitro Antisalmonellal and Antioxidant Activities of Extracts and Fractions of *Curcuma longa* L. Rhizomes (Zingiberaceae) From The Stem Bark of *albizzia gummifère* (J.F.Gnel) C.A.Sm. *British Journal of Pharmaceutical Research*, 10(6).1-11.
- Dutuit p., pourrat y., dodeman v. L. 1991. Stratégie d'implantation d'un système d'espèces adaptées aux conditions d'aridité du pourtour méditerranéen. L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides .Ed .Aupelpuref . John libbey eurotext .Paris, pp. 6.5-73
- Eddouks M., Maghrani M., Lemhadri A., Ouahidi ML., et Jouad H. 2002. Ethnopharmacological survey of medicinal plants used for the treatment of diabetes mellitus, hypertension and cardiac diseases in the South-Est region of Marocco (Tafilalet). *Journal of Ethnopharmacology*. 82(2): 97-103.
- Erdman J., Balentine J.D., Arab L., Beecher G., Dwyer J.T., Folts J., Harnly., Hollman J.P., L-Keen C., Mazza G., Messina M., Scalbert A., Vita J., WILLIAMSON G et Burrowes J., 2007. Flavonoids and heart health :Proceeding of the ILSI North America flavonoids workshop, may 31-june 1, 2005, Washington. *Journal of Nutrition*, vol.137, p.p.718-737.
- Escribano-Bailon. & Santos-Buelga. (2003). *Methods in polyphenol analysis*. Royal Society of Chemistry. Cambridge, 383p.
- et Colliver S., 2002. Increasing antioxidant levels in tomatoes through modification of the flavonoid biosynthesis pathway. *Journal of experimental botany*, vol.53, n.377, p.p.209-210
- Etame L. G, Ngaba G. P, Kamdom M, Mpondo M. E, Dibong S. D. 2018. Evaluation des activités anti-inflammatoire et antiradicalaire de l'extrait au vin de palme des feuilles de

- Phragmanthera capitata (Sprengel) S. Balle (Loranthaceae) récoltées sur Psidium guajava au Cameroun. *International Journal. Biological and Chemical Sciences*.12(1): 233-243.
- Favier A. 2003. Le stress oxydant "Intérêt conceptuel et expérimental dans la compréhension des mécanismes des maladies et potentiel thérapeutique". *L'actualité chimique*. pp108-115.
 - Forman, Henry Jay, Kevin J. A. Davies, and Fulvio Ursini. "How Do Nutritional Antioxidants Really Work: Nucleophilic Tone and Para-Hormesis versus Free Radical Scavenging in Vivo." *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 66, 2014, pp. 24-35
 - Foti, M.C. Use and abuse of the DPPH• radical. *J. Agric. Food Chem.* 2015, 63, 8765–8776
 - Franclet a. Et le-houerou h.n, 1971 - les atriplex en Tunisie et en Afrique du nord. *Doct. F.a.o. Rome 1971*. P 249 et p 189.
 - Garcia-Salas P., Morales-Soto A, Segura-Carretero A. et Fernández-Gutiérrez A. (2010). Phenolic-compound-extraction systems for fruit and vegetable samples. *Molecules* 15(12): 8813-8826.
 - Genoux, E. (2011). Dérivés de flavonoïdes et de vérapamil comme ligands des transporteurs MRP1 et ABCG2: de la conception à l'activité anticancéreuse, Université de Grenoble
 - Gerber, M., Boutron-Ruault, M.-C., Herberg, S., Riboli, E., Scalbert, A., and Siess, M.-
 - Ghedira K. 2005. Les flavonoïdes : structure, propriétés biologiques, rôle prophylactique et emplois en thérapeutique. *Phytothérapie*, vol.3, n.4, p.p.162 -169.
 - Gülçin, I. (2012). Antioxidant activity of food constituents: An overview. *Archives of Toxicology*, 86(3), 345–391.
 - Gupta, D. Methods for determination of antioxidant capacity: A review. *Int. J. Pharm. Sci. Res.* 2015, 6,546–566
 - H. (2002). "Actualités en cancérologie: fruits, légumes et cancers. Une synthèse du réseau Nacre." *Bulletin du cancer*, 89(3), 293-312.
 - Haleng J., Pincemail J., Defraigne J.O., Charbier C., Chapelle J.P. 2007. Le stress oxydant. *Revue-Médical de Liège*, 62(10):628-638. 8.
 - HALLARD F. (1988). *Phytothérapie*. Masson, Paris .pp 6-14.
 - Halliwell B., 1996. Antioxidant in human health and disease, *Annual review of nutrition* 16(1), 33-50.
 - Halliwell, Barry, and John M. C. Gutteridge. *Free Radicals in Biology and Medicine*. 5th ed., Oxford University Press, 2015.

- Hamma S.A., Nouri N., Fergani I., Lekhal A., Cheriet S., Abadi N., Lezzar, A., Benlatrache, C. 2015. Biologie Des Espèces Réactives et Stress Oxydant. Journal Algérien Médecine Vol XXIII, N°2, PP 48-53.
- Harborne, J. B., & Williams, C. A. (2000). Advances in flavonoid research since 1992. *Phytochemistry*, 55(6), 481-504.
- Hemingway, R.W., 1992. Structural variation in proanthocyanidins and their derivatives. In : *polyphenols : synthesis, properties, significance*. Laks P.E, Hemingway R.W New York.
- Hennebelle T. (2006) : Investigation chimique et chimiotaxonomique et pharmacologique de Lamiacées productrices d'antioxydants. *Marrubium peregrinum*, *Ballota larendana*, *Ballota Pseudodictamnus* (Lamiacées) et *Lippia alba* (Verbenacées). Thèse de Doctorat en Chimie Organique et Macromoléculaire. Université des Sciences et Technologique de Lille.
- Heywood, V.H. et al. (2007). *Flowering Plant Families of the World*. Firefly Books.
- <https://gobotany.nativeplanttrust.org/species/beta/vulgaris/>
- <https://gobotany.nativeplanttrust.org/species/chenopodium/album/>
- <https://www.delta-intkey.com/angio/www/chenopod.htm>)
- <https://www.gbif.org/fr/species/3083838>
- <https://www.gbif.org/fr/species/3083838>
- <https://www.gbif.org/fr/species/8971274>
- https://www.gbif.org/occurrence/gallery?taxon_key=3083718
- https://www.gbif.org/occurrence/gallery?taxon_key=3083935
- https://www.gbif.org/occurrence/gallery?taxon_key=3758941
- <https://www.gbif.org/species/3083718>
- <https://www.gbif.org/species/3083718>
- <https://www.gbif.org/species/3083935>
- <https://www.gbif.org/species/3083935>
- <https://www.gbif.org/species/3758785>
- <https://www.gbif.org/species/3758785>
- <https://www.gbif.org/species/6719>
- <https://www.gbif.org/species/8971274>
- <https://www.pensersante.fr/les-radicaux-libres-quest-ce-que-cest>
- <https://www.pensersante.fr/les-radicaux-libres-quest-ce-que-cest>

- <https://www.vulgaris-medical.com/phytotherapie/betterave/>
- Huang, D.; Ou, B.; Prior, R.L. The chemistry behind antioxidant capacity assays. *J. Agric. Food Chem.* 2005, 53,1841–1856
- Humbert, L. (2010). Extraction en phase solide (Spe): Théorie et applications. *Annales de Toxicologie Analytique*, 22(2), 61–68. <https://doi.org/10.1051/ata/2010010>
- Hutzler P., Fishbach R., HellerW., Jungbult T.P.,Reuber S., Schmitz R., Veit M., Weissenbock G. et Schnizler J.P.,1998.Tissue localisation of phenolic compounds inplants by confocal laser scanning microscopy *Journal of experimental botany.*,vol,n.323,p.p. 953-965.
- Hybertson, Brooks M., Bifeng Gao, Swapan K. Bose, and Joe M. McCord. "Oxidative Stress in Health and Disease: The Therapeutic Potential of Nrf2 Activation." *Molecular Aspects of Medicine*, vol. 32, no. 4-6, 2011, pp. 234-246.
- Jacobsen, S.E. (2003). The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1-2), 167-177
- Judd, W.S. et al. (2016). *Plant Systematics: A Phylogenetic Approach*. Sinauer Associates.
- Karaali A.,Boyacioalu D.,Gunez G.et Ozçelik B.,2004.Flavonoids in fruit and vegetebales :their impact on food quality,nutrition and health-Strep or CA.Europeancommision’s the 6th framework programme for research.Istanbul technical University.Turkey,261p.
- Karadag, A., Ozcelik, B., & Saner, S. (2009). Review of methods to determine antioxidant capacities. *Food Analytical Methods*, 2(1), 41–60.
- King J. W. & Grabiell R. D. 2007. Isolation of polyphenolic compounds from fruits or vegetables utilizing subcritical water. Espacenet, US7208181. United States.
- Kraft K., Hobbs C. (2004) *Pocket Guide to Herbal Medicine*. Thieme, Stuttgart, New York.p16.
- Kuti, J. O., & Konuru, H. B. (2004). Antioxidant capacity and phenolic content in leaf extracts of tree spinach (*Cnidoscolus* spp.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(1), 117-121.
- Laurent C et Oestveldt K., 2008. Impact des polyphénols de raisin sur des marqueurs physiologiques et biochimiques du vieillissement intestinal, Ed howest, 78 p.
- Le Houérou, H.N. (1992). The role of saltbushes (*Atriplex* spp.) in arid land rehabilitation in the Mediterranean Basin: a review. *Agroforestry Systems*, 18(2), 107-148.

- Lucchesi, M.-E. (2005). Extraction Sans Solvant Assistée par Micro-ondes
Conception et Application à l'extraction des huiles essentielles [Phdthesis, Université de la Réunion]. <https://theses.hal.science/tel-00118895>
- Maarasyid, C., Muhamad, I. I., & Supriyanto, E. (2014). Potential source and extraction of vitamin e from palm-based oils: A review. *Jurnal Teknologi*, 69(4). <https://doi.org/10.11113/jt.v69.3172>.
- Macheix J.J., Fleuriet Annie et al., 2005. Les composés phénoliques des végétaux, un exemple de métabolites secondaires d'importance économiques, presses polytechniques et universitaires romandes,162p.
- Macheix J-J., Fleuriet A et Sarni – Machado P 2006. Composés phénoliques dans la plante -structure, biosynthèse répartition et rôles, In Sarni Machado P. et Cheyner V., les polyphénols en agroalimentaire, Ed. Lavoisier, 398 p.
- Makoi J.H.J.R., Ndakidemi P.A. (2007): Biological, ecological and agronomic significance of plant phenolic compounds in rhizosphere of the symbiotic legumes. *African Journal of Biotechnology*, 6(12), 1358-1368.
- Malesev D.et KunticV., 2007. Investigation of metal-flavonoid chelates and the determination of flavonoids via metal-flavonoids complexing reactions. *Journal of the Serbian chemical society*. vol.c 72, n.10,p.p. 921-939.
- Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., & Jiménez, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *American Journal of Clinical Nutrition*, 79(5), 727-747.
- Mandal, V., Mohan, Y., & Hemalatha, S. J. P. R. (2007). Microwave assisted extraction—an innovative and promising extraction tool for medicinal plant research. *Pharmacognosy reviews*, 1(1), 7-18.
- Manna C., Galletti, P., Cucciolla, V., Moltedo, O., Leone, A. et Zappia, V. (1997): The protective effect of olive oil polyphenol (3,4-dihydrophenyl) - ethanol counteracts reactive oxygen metabolite- Induced cytotoxicity in caco-2cells. *The Journal of Nutrition*, N° vol.127, p.286-292.
- Mata A.T., Proenc C., Ferreira A.R., Serralheiro M.L.M., Nogueira J.M.F., Araujo M.E.M. 2007. Antioxidant and anti acétylcholinestérase activities of five plants used as Portuguese food spices. *Food Chem*. 103: 778-786.
- Maurent, K. (2017). Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- Medic-Saric M.,Jasprica I.,Smolic-Bubalo A.et MonarA.,2004Optimisation of chromatography of flavonoids and phenolic acids.*CROATICA CHEMICA ACTA CCA*.,vol. 77,n.1-2,p.p.361-366.

- Mendiola J. A., Herrero M., Cifuentes A. & Ibanez, E. 2007. Use of compressed fluids for sample preparation: Food applications. *Journal of Chromatography. A*, 1152, 234–246.
- Michel T. (2011). Nouvelles méthodologies d'extraction, de fractionnement et
- Miller, N.J.; Rice-Evans, C.; Davies, M.J.; Gopinathan, V.; Milner, A. A novel method for measuring antioxidant capacity and its application to monitoring the antioxidant status in premature neonates. *Clin. Sci.* 1993, 84,407–412
- Moharram, H.; Youssef, M. Methods for determining the antioxidant activity: A review. *Alex. J. Food Sci.Technol.* 2014, 11, 31–42
- Moussous, W. (2020). Activité Antioxydante et Antiulcéreuse de *Carthamus caeruleus* L.
- Narayana K.R., Reddy M.S.,Chaluvadi M.R.et Krishna D.R., 2001.Bioflavonoidsclassification,pharmacological,biochemical effects and therapeutic potential. *Indianjournalofpharmacology*, vol.33 p. p.2-16
- Nijveldt R. J., Van Nood E., Van Hoorn D.E .C.,Boelens P.G.,Van Norren K. et Van Leeuwen P.A.M.,2001.Flavonoids : a review of probable mechanisms of action andpotentiel applications.*American journal of clinical nutrition*, vol.74,p.p 418- 425.
- Nikan, M., & Manayi,A. (2019). *Beta vulgaris* L. Nonvitamin and Nonmineral Nutritional Supplements
- Nimse, S. B., & Pal, D. (2015). *RSC Advances*, 5(35), 27986-28006.
- Nurzyńska-Wierdak, R. (2023). Phenolic compounds from new natural sources—Plant genotype and ontogenetic variation. *Molecules*, 28(4), 1731. <https://doi.org/10.3390/molecules28041731>
- Opitz, S.E.W.; Smrke, S.; Goodman, B.A.; Yeretian, C. Chapter 26—Methodology for the measurement of antioxidant capacity of coffee: A validated platform composed of three complementary antioxidant assays. In *Processing and Impact on Antioxidants in Beverages*; Preedy, V., Ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA, 2014; pp. 253–264
- Ozenda, P. (1977). *Flore du Sahara*. 2e édition. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.
- Ozenda, P. (1983). *Flore et végétation du Sahara*. 3e édition. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.
- Özyürek, M.; Güçlü, K.; Tütem, E.; Sözgen Başkan, K.; Erça ğ, E.; Karademir Çelik, S.; Baki, S.; Yıldız, L.; Karaman, S.; Apak, R. A comprehensive review of CUPRAC methodology. *Anal. Methods* 2011, 3, 2439–2453.

- Papanastasis, V.P. et al. (2008). Restoration of mediterranean-type shrublands: a 10-year research review. In: Plant disturbance ecology. Elsevier, p. 333-336.
- Pastre, J. (2005). Intérêt de la supplémentation en antioxydants dans l'alimentation des carnivores domestiques (Doctoral dissertation).
- PENCHEV, P. I. (2010). Étude des procédés d'extraction et de purification de produits bioactifs à partir de plantes par couplage de techniques séparatives à basses et hautes pressions [DOCTORAT, L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE]. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001338/>
- Perraut, S. (2013). Les ultrasons, une alternative verte pour l'extraction. Article vue en ligne, le 17 Septembre : <http://www.processalimentaire.com/Procedes/Les-ultrasons-unealternative-verte-pour-l-extraction-23431>.
- Pinelo, M., Laurie, V.F. & Waterhouse, A.L. (2006). A Simple method to separate red wine nonpolymeric and polymeric phenols by solid-phase extraction. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54, 2839-2844.
- Piquemal G. (2008) Les flavonoïdes (enligne)http://www.detoursante.com/index.php?Option=com_content&view=article&id=166&Itemid=215
- Pizzino, G., Irrera, N., Cucinotta, M., Pallio, G., Mannino, F., Arcoraci, V., Squadrito, F., Altavilla, D., & Bitto, A. (2017). Oxidative stress: Harms and benefits for human health. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2017, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2017/8416763>
- plants. Trends in Food Science and Technology, 17 (6), 300-312.
- Poonia, A., & Upadhayay, A. (2015). Chenopodium album Linn: Review of nutritive value and biological properties. Journal of Food Science and Technology, 52(7), 3977–3985. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1553-x>
- Pronyk C. et Mazza G. (2009). Design and scale-up of pressurized fluid extractors for food and bioproducts. Journal of food engineering, 95 : 215-226.
- Quezel, P. & Santa, S. (1962-1963). Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.
- Ramachandra Rao, S., & Ravishankar, G. A. (2002). Plant cell cultures: Chemical factories of secondary metabolites. Biotechnology Advances, 20(2), 101–153. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(02\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(02)00007-1)

- Ramos L., Kristenson E. M. et Brinkman U. A. T. (2002). Current use of pressurized liquid extraction and subcritical water extraction in environmental analysis. *Journal of chromatography.A*, 975: 3-29.
- Re, R.; Pellegrini, N.; Proteggente, A.; Pannala, A.; Yang, M.; Rice-Evans, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic. Biol. Med.* 1999, 26, 1231–1237
- Repo-Carrasco-Valencia, R. (2011). Andean indigenous foodcrops: nutritional value and bioactive compounds. University of Helsinki.
- Repo-Carrasco-Valencia, R., Acevedo de La Cruz, A., Icochea Alvarez, J. C., & Kallio, H. (2009). Chemical and Functional Characterization of Kañiwa (*C henopodium pallidicaule*) Grain, Extrudate and Bran. *Plant foods for human nutrition*, 64, 94-101.
- Rhodes et al., 1981. Association between métabolites of aromatiques coumpounds in bile and the occurrence of hepatic lesion in english sole (*Parophrysvetulus*)from Puget sound, washington in springerlink *Archives of enviromental Contamination and Toxicology*.vol.15,n59,p.p 533-561.
- Richter B. E., Jones B. A., Ezzell J. L., Porter N. L., Avdalovic N. et Pohl C. (1996).Accelerated solvent extraction: A technique for sample preparation analytical chemistry,68: 1033-1039.
- Rolland Y., 2004. Antioxydants naturels des végéteaux. *Foodchemistry*, vol.11,p.p.1-6.
- Routray W, Orsat V. Microwave-assisted extraction of flavonoids: a review. *Food and Bioprocess Technology*. 2012;5(2):409-24.
- Sacchi, K. L., Bisson, L. F., & Adams, D. O. (2005). A review of the effect of winemaking techniques on phenolic extraction in red wines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56(3), 197-206.
- Sánchez-Rangel, J.C.; Benavides, J.; Heredia, J.B.; Cisneros-Zevallos, L.; Jacobo-Velázquez, D.A. The Folin–Ciocalteu assay revisited: Improvement of its specificity for total phenolic content determination. *Anal. Methods* 2013, 5, 5990–5999
- Sarr, S. O., et al. (2015). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(3), 1263- 1269.
- Scalbert, A., Manach, C., Morand, C., Rémésy, C., & Jiménez, L. (2005). Dietary polyphenols and the prevention of diseases. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(4), 287-306.

- Schaich, K.M.; Tian, X.; Xie, J. Hurdles and pitfalls in measuring antioxidant efficacy: A critical evaluation of ABTS, DPPH, and ORAC assays. *J. Funct. Foods* 2015, 14, 111–125
- Shah, S. (2022). The phytochemical, pharmacological and medicinal evaluation of quinoa(*Chenopodium quinoa* Willd.). *JOURNAL OF WEED SCIENCE RESEARCH*, 28(3), 138–158. <https://doi.org/10.28941/pjwsr.v28i2.1049>
- Shanahan, J.F. et al. (2007). Crop physiology and metabolism: Drought and plant stress- can isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$) assays provide physiological diagnostic tools?. *Plant Physiology*, 143(1), 56-67.
- Sies, Helmut. "Oxidative Stress: A Concept in Redox Biology and Medicine." *Redox Biology*, vol. 4, 2015, pp. 180-183.
- Škerget, M., Kotnik, P., Hadolin, M., Hraš, A. R., Simonič, M., and Knez, Ž. (2005). "Phenols, proanthocyanidins, flavones and flavonols in some plant materials and their antioxidant activities." *Food Chemistry*, 89(2), 191-198.
- Stalikas C. D. (2007). Extraction, separation, and detection methods for phenolic acids and flavonoids. *Journal of separation science*, 30(18): 3268-3295.
- Stevens, P.F. (2001 onwards). Angiosperm Phylogeny Website. Version 14, July 2017. [http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/]
- Tang, S. Y., & Halliwell, B. (2010). *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 394(1), 1-5.
- Thomas, D. (2016). Les antioxydants de nos jours: définition et applications (Doctoral dissertation, Thèse pour le diplôme d'état de docteur en pharmacie, Université de Limoges).
- Urquiaga I. et Leighton F., 2000. Plant polyphenol antioxidants and oxidative stress. *Biological Research*, vol .33,n,p.p.55-64.
- Valko, M., et al. (2006). *Chemico-Biological Interactions*, 160(1), 1-40.
- Verhoeyen M.E., Bovy A.Collins G., Muir S.,Robinson S., De Vos C.H.R
- Wang, L. & Weller, C. L. (2006). Recent advances in extraction of nutraceuticals from
- Watson, L., and Dallwitz, M.J. (1992). The families of flowering plants: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. Version: 22nd June 2024. delta-intkey.com'.
- Young, I. S., & Woodside, J. V. (2001). *Journal of Clinical Pathology*, 54(3), 176-186.

- Zehiroglu, C., & Ozturk Sarikaya, S. B. (2019). The importance of antioxidants and place in today's scientific and technological studies. *Journal of food science and technology*, 56(11), 4757–4774. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03952-x>

Annexe

Annexe : Données de l'analyse statistique

Article	La plante	Parties de la plante	Méthodes d'extraction	Type de Polyphénol	les solvants utilisés	Techniques in vitro	Les principales activités biologiques
Eltaweil et al. (2022)	Atriplex halimus	Feuilles	Extraction aqueuse avec chaleur	Flavonoïdes	Eau déminéralisée	Test DPPH	Antioxydante Antimicrobien
Soltani et al. (2023)	Atriplex halimus	Feuilles, Tiges.	Distillation à la vapeur d'eau	Flavonoïdes	Eau	Test DPPH Test FRAP	Antioxydante Antimicrobien
Benhammou et al. (2009)	Atriplex halimus	Feuilles, Tiges	Extraction solide-liquide	Flavonoïdes	Méthanol	Test DPPH Test FRAP	Antioxydante
Bouaziz et al. (2021)	Atriplex halimus	Feuilles	Extraction solide-liquide	Acides phénoliques Flavonoïdes	Eau	Test DPPH	Activité protoscolicide Antioxydante
Roubi et al. (2023)	Atriplex halimus	Feuilles, Tiges	Extraction par solvant	Flavonoïdes Tanins	mélange (70% d'éthanol 30% d'eau distillée) Eau distillée.	Test DPPH Test ABTS Test de blanchiment du β -carotène Test de chélation du fer ferrique	Antioxydant Anticancéreux
Tahar, S. B., et al. (2015)	Atriplex halimus	Feuilles, Tiges	Extraction par solvant	Flavonoïdes Tanins	Méthanol-eau (8/2) Éther de pétrole Dichlorométhane Acétate d'éthyle Butanol	Test DPPH Test ABTS	Antioxydante
Pyo et al. (2004)	Beta vulgaris	Feuilles, Tiges	Extraction solide-liquide	Flavonoïdes Acides phénoliques	Méthanol	Méthode au thiocyanate Test DPPH	Antioxydante
Guine et al. (2018)	Beta vulgaris	la racine charnue	Extraction solide-liquide	Flavonoïdes Anthocyanines	Éthanol : eau (50:50 v/v) Acétone : eau	Test ABTS	Antioxydante

Annexe : Données de l'analyse statistique

					(60:40 v/v)		
Babagil et al., (2018)	Beta vulgaris	la racine charnue	Extraction solide-liquide	Flavonoïdes	Eau Alcool	Test DPPH Test ABTS Test CUPRAC	Antioxydant antiradicalaire
Biondo et al., (2014)	Beta vulgaris	Feuilles	Pas d'extraction	Flavonoïdes	Pas de solvant	Test DPPH	Antioxydant
Čanadanović-Brunet et al., (2011)	Beta vulgaris	la pulpe	Extraction par solvant	Flavonoïdes	Ethanol à 80% avec 0,5% d'acide acétique. Acide acétique dans l'eau.	Test DPPH Test FRAP	Antioxydant antimicrobien
Georgiev et al., (2010)	Beta vulgaris	la racine charnue	Extraction par solvant	Flavonoïdes Acides phénoliques	Ethanol à 70% Eau	Test DPPH Test ORAC	Antioxydant
Vulić et al., (2014)	Beta vulgaris	la pulpe	Extraction assistée par ultrasons	Flavonoïdes	Solution aqueuse à 50% d'éthanol avec 0,5% d'acide acétique	DPPH	Antioxydant
Nahla et al., (2018)	Beta vulgaris	la racine charnue	Extraction aqueuse avec chaleur	Flavonoïdes	Eau distillée ou 95 % éthanol	Test de chélation du fer ferrique Test FRAP	Antioxydant
Rehman et al., (2021)	Beta vulgaris	Feuilles, Tiges	Extraction Soxhlet	Flavonoïdes	n-hexane hydrométhanol	Test DPPH	Anti-inflammatoire Antioxydant
Safwat, G. (2018)	Beta vulgaris	Les racines	Extraction par solvant	Flavonoïdes Tanins Anthocyanines	Ethanol Eau distillée	Test DPPH	Antioxydant, Antibactérien Anticancereux
Amodeo et al., (2019)	Chenopodium album	Feuilles, Tiges	Extraction par solvant	Flavonoïdes Acides	Méthanol	Test de blanchiment du β -carotène	Anti-inflammatoire Antioxydant

Annexe : Données de l'analyse statistique

				phénoliques		Test DPPH	
Baldi et al., (2013)	Chenopodium album	Les graines	Extraction Soxhlet	Flavonoïdes	Ethanol (95% v/v)	Test DPPH Test ABTS Test NO	Antioxydant Hépatoprotecteur
Islam et al., (2023)	Chenopodium album	Feuilles	Extraction par solvant	Flavonoïdes	Méthanol	Test DPPH	Anthelminthique, Antioxydant Cytotoxique
Laghari et al., (2011)	Chenopodium album	Fruits Feuilles	Extraction par solvant	Flavonoïdes Acides phénoliques	Acide chlorhydrique Hexane Éther diéthylique et acétate d'éthyle (1:1 v/v)	Test DPPH Test HRSA	Antioxydant
Lone et al., (2017)	Chenopodium album	Feuilles, Tiges Fleurs	Extraction par solvant	Flavonoïdes	Méthanol Eau	Test HRSA Test DPPH Test TBARS Photo-oxydation à la riboflavine	Anthelminthique Antimicrobien Antioxydant
Pandey et al., (2014)	Chenopodium album	Feuilles	Extraction par solvant	Flavonoïdes	Éther de pétrole Dichlorométhane Acétate d'éthyle Méthanol	Test FRAP Test ABTS	Antioxydant Antibactérien
Al-Qabba et al., (2020)	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction par solvant	Flavonoïdes Anthocyanines	Ethanol 70%	Test DPPH	Antioxydant
(Dini et al., 2010)	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction par solvant	Flavonoïdes	Methanol 80%	Test FRAP Test DPPH	Antioxydant
Farajzadeh et al., 2020	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction par solvant	Flavonoïdes	Methanol 80%	Test DPPH	Antioxydant Antimicrobien
Lim et al., 2020	Chenopodium quinoa	Graines Pousses Tiges Feuilles Racines	Extraction par solvant	Flavonoïdes	Methanol 80%	Test ABTS Test FRAP	Antioxydant

Annexe : Données de l'analyse statistique

Ong et al., 2020	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction d'eau chaude sous pression	Flavonoïdes	Eau	Test DPPH Test ABTS	Antioxydant Cytoprotecteur
Park et al., 2017	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction solide-liquide	Flavonoïdes Tanins	Ethanol 70%	Test FRAP Test DPPH	Antioxydant Antimicrobien
Paško et al., 2009	Chenopodium quinoa	Pousses	Extraction solide-liquide	Flavonoïdes Anthocyanines	Méthanol Acide chlorhydrique Acétone Eau	Test FRAP Test DPPH Test ABTS	Antioxydant
Alvarez-Jubete et al., 2010	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction solide-liquide	Flavonoïdes Acides phénoliques	Méthanol	Test FRAP Test DPPH	Antioxydant
Carciochi et al., 2015	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction assistée par ultrasons	Flavonoïdes Acides phénoliques	Ethanol	Test DPPH	Antioxydant
Abdelaleem et al., 2021	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction par solvant	Flavonoïdes	Ethanol	Test DPPH	Antioxydant
Hirose et al., 2010	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction par solvant	Flavonoïdes Acides phénoliques	Méthanol Eau	Test DPPH	Antioxydant
Pellegrini et al., 2018	Chenopodium quinoa	Les graines	Pas d'extraction	Flavonoïdes Acides phénoliques	Pas de solvant	Test FRAP Test DPPH Test ABTS Test Capacité de chélation des ions ferreux	Antioxydant
Tang et al., 2015	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction par solvant	Flavonoïdes Acides phénoliques	Méthanol Acide chlorhydrique	Test DPPH Test ORAC Test FRAP	activités phénoliques Bétanines Antioxydante
Yawadio Nsimba et al., 2008	Chenopodium quinoa	Les graines	Extraction séquentielle de solvant basée sur la polarité	Flavonoïdes	n-Hexane Éthanol Éther diéthylique Acétate d'éthyle	Test de blanchiment du β -carotène Test FRAP Test DPPH	Antioxydant

Annexe : Données de l'analyse statistique

					n-Butanol Eau		
Drioichea et al., 2019	Hammada scoparia	Tiges Feuilles Fleurs	Hydrodistillation	Flavonoïdes Tanins	Pas de solvant	Test DPPH	Antimicrobienne Antiradiculaire Antifongique Antibactérienne Antioxydant
Bouaziz et al., 2016	Hammada scoparia	Feuilles	Extraction hydroéthanolique Extraction séquentielle de solvant basée sur la polarité	Flavonoïdes	Éthanol-Eau (1:9 v/v) Hexane (non polaire) Dichlorométhane (modérément polaire) Méthanol (polaire)	Test de blanchiment du β -carotène Test DPPH	Antibactérien Antioxydant
Nounah et al., 2019	Hammada scoparia	Tiges Feuilles	Extraction assistée par ultrasons	Flavonoïdes Tanins	Eau-éthanol (20:80 v/v).	Test FRAP Test DPPH Test ABTS	Antibactérien Antioxydant
KAROUS et al. (2020)	Hammada scoparia	Tiges Feuilles Fleurs	Extraction Soxhlet Extraction aqueuse	Flavonoïdes Tanins	Méthanol Eau distillée	Test DPPH	Phytotoxique Antioxydant
Haida et al., 2022	Hammada scoparia	Tiges Feuilles Racines	Macération	Polyphénols non spécifique	Hexane Acétone/eau	Test FRAP Test DPPH	Antioxydant
Haida, et al., 2020	Hammada scoparia	Tiges Feuilles Fleurs Racines	Macération Extraction liquide-liquide	Tanins	Acétone/eau Dichlorométhane Acétate d'éthyle Butanol	Test FRAP Test DPPH	Antioxydant
Lachkar et al., 2021	Hammada scoparia	Tiges Feuilles Fleurs	Extraction aqueuse Extraction de Soxhlet à chaud	Flavonoïdes Tanins	Eau distillée Méthanol Chloroforme Acétate d'éthyle Éther de pétrole	Test de piégeage du peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂) Test FRAP Test DPPH	Antidiabétique Antioxydant

Annexe : Données de l'analyse statistique

						Test ABTS	
Hatamjafari et al., 2013	Spinacia oleracea	Feuilles	Macération hydroalcoolique	Polyphénols non spécifique	Méthanol Eau	Test DPPH	Antioxydant
Hussain et al., 2016	Spinacia oleracea	Feuilles	Extraction par solvant	Flavonoïdes Acides phénoliques	Méthanol	Test Capacité de chélation des ions ferreux Test FRAP Test DPPH Test HRSA	Antioxydant
Ko et al., 2014	Spinacia oleracea	Feuilles	Extraction d'eau chaude Extraction par solvant	Polyphénols non spécifique	Eau déminéralisée Ethanol	Test TBARS Test ORAC	Antioxydant
Salehi et al., 2019	Spinacia oleracea	Tiges Feuilles Fleurs	Extraction par solvant	Flavonoïdes	Méthanol	Test Capacité de chélation des ions ferreux Test FRAP Test DPPH Test ABTS Test ORAC	Antioxydant
Thandapani et al., 2023	Spinacia oleracea	Feuilles	Méthode de décoction	Flavonoïdes Tanins	Eau bidistillée.	Test DPPH	Antioxydant Antibactérien
Islam et al., 2018	Spinacia oleracea	Feuilles	Macération	Tanins	Méthanol	Test DPPH	Antidiabétique Antioxydant
Sekar et al., 2012	Spinacia oleracea	Feuilles	Extraction séquentielle de solvant	Flavonoïdes	Méthanol Eau	Test DPPH	Antioxydant

