République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : DALIA Ikram

DENNAKA Oum Kalthoum

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : GÉNIE DES PROCÉDÉS.

OPTION : GÉNIE DES PROCÉDÉS DE L'ENVIRONNEMENT

Thème

Étude de l'Activité Antioxydante des Extraits Phénoliques de quelques Plantes Médicinales Locales (Peganum harmala, Haloxylon scoparium et Tamarix aphylla)

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Merigui Khaled	MCB	Président
MECHRAOUI Omar	MCA	Examinateur
GUENANE Hadjira	Pr	Rapporteure
DJEKIDEL Alia	Doctorante	Co-rapporteure

Promotion : 2025/2026

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le Tout-Puissant pour la force et la patience qu'Il nous a accordées afin de mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur GUENANE Hadjira et DJEKIDEL Alia pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail.

Nos remerciements vont à l'ensemble des enseignants du département [GÉNIE DES PROCÉDÉS] pour la qualité de leur enseignement et leurs encouragements.

Nous remercions profondément nos familles pour leur soutien moral, leur patience et leurs sacrifices.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie également ce mémoire à ma famille, à mes amis et à toutes les personnes qui ont cru en moi et m'ont soutenue de près ou de loin.

Leurs conseils, leur présence bienveillante et leurs encouragements ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Que ce mémoire soit le témoignage de mon respect et de ma sincère reconnaissance.

DALIA Ikram

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour leur amour infini, leur patience et leurs sacrifices inestimables.

Leur soutien moral et leurs encouragements constants ont été ma plus grande source de motivation tout au long de mon parcours universitaire.

Qu'ils trouvent dans ce travail l'expression de ma profonde gratitude et de ma reconnaissance éternelle.

DENNAKA Oum Kalthoum

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

Synthèse Bibliographique **3**

CHAPITRE I : Présentation des Plantes Médicinales

Présentation des plants étudiées **5**

Généralités des trois plantes **5**

I.1. Peganum harmala L **5**

I.1.1. Généralité **5**

I.1.2. Classification botanique **6**

I.1.3. Description morphologique **7**

I.1.4. Distribution géographique **7**

I.1.5. Écologie et adaptation **7**

I.1.6. Usages traditionnels **8**

I.1.7. Composition phytochimique **8**

I.1.8. Activités biologiques **8**

I.2. Haloxylon scoparium Pomel **9**

I.2.1. Généralité **9**

I.2.2. Classification botanique **10**

I.2.3. Description morphologique **10**

I.2.4. Distribution géographique **10**

I.2.5. Écologie et adaptation **10**

I.2.6. Usages traditionnels **11**

I.2.7. Composition phytochimique **11**

I.2.8. Activités biologiques **11**

I.3. Tamarix aphylla (L.) H.Karst **11**

I.3.1. Généralité **11**

I.3.2. Classification botanique **12**

I.3.3. Description morphologique **12**

I.3.4. Distribution géographique **13**

I.3.5. Écologie et adaptation **13**

I.3.6. Usages traditionnels **13**

I.3.7. Composition phytochimique **13**

I.3.8. Activités biologiques **14**

I. 4. Conclusion percutante **14**

CHAPITRE II : Métabolites Secondaires

II.1. Généralités sur les Composés Phénoliques (POLYPHÉNOLS) **16**

II.1.1. Généralités **16**

II.1.2. Différentes Classes des Polyphénols **18**

II.1.3. Propriété Thérapeutique des Composés Phénoliques **19**

II.2. Radicaux Libres et les Antioxydant **20**

II.2.1. Stress Oxydatif **21**

II.2.2. Radicaux Libres **21**

II.2.3. Nature des Radicaux Libres **22**

II.2.4. Circonstances physiologiques productrices de radicaux libre **23**

II.2.5. Les Antioxydants **24**

II.2.6. Les aliments riches en antioxydants **24**

II.2.7. Systèmes Antioxydants **25**

II.2.8. Utilisation des Antioxydants **25**

Partie Expérimentale

CHAPITRE III : Méthodes de Travail

III.1. Méthodes de Travail **29**

III.2. Produits Chimiques et Instruments **30**

III.3. L'échantillonnage et Traitement **31**

III.4. L'extraction des Composés Phénoliques **31**

III.5. Analyse Quantitative **31**

III.5.1. Dosage des Polyphénols Totaux **31**

III.5.2. Dosage des Flavonoïdes Totaux **32**

III.6. Évaluation de l'Activité Antioxydante **33**

III.6.1. Test de Piégeage du Radical Libre DPPH **33**

III.6.2. Test de Phosphomolybda **34**

III.6.3. Test de FRAP (Ferric Reducing Antioxydant Power) **35**

CHAPITRE IV : Résultats & Discussions

IV.1. Quantification des composés phénoliques et des flavonoïdes **38**

IV.1.1. Teneur en phénols totaux **38**

IV.1.2. Teneur en flavonoïdes **39**

IV.2. Évaluation de l'activité antioxydante **40**

IV.2.1. Test de piégeage du radical libre DPPH **40**

IV.2.2. Test du Phosphomolybdate (Capacité antioxydante totale) **41**

IV.2.3. Pouvoir réducteur du fer (Test FRAP) **43**

IV.3. Discussion Générale **44**

Conclusion générale **46**

Références Bibliographiques

Annexes

Liste des figures

Figure 1 : Aspect général de la plante Peganum harmala **6**

Figure 2 : Aspect général de la plante Haloxylon scoparium **9**

Figure 3 : Aspect général de Tamarix aphylla dans son habitat aride **12**

Figure 4 : Groupements phénoliques de 1 ou plusieurs OH **16**

Figure 5 : Les molécules phénoliques **17**

Figure 6 : Classification des composés phénoliques **17**

Figure 7 : Radicaux libres causant des dommages aux composants vitaux des cellules **20**

Figure 8 : L'oxydation est responsable du brunissement des fruits **21**

Figure 9 : Radical libre **22**

Figure 10 : Comment remédier aux radicaux libres **22**

Figure 11 : Formation des radicaux libres **23**

Figure 12 : Action des antioxydants sur les radicaux libres **25**

Figure 13 : Organigramme expliquant les différentes étapes dans notre travail **29**

Figure 14 : Courbe d'étalonnage de l'acide gallique **32**

Figure 15 : Courbe d'étalonnage de la rutine **32**

Figure 16 : Mécanisme réactionnel intervenant lors du test DPPH **33**

Figure 17 : Courbe d'étalonnage de l'acide ascorbique **34**

Figure 18 : Réaction d'un antioxydant avec le FRAP **35**

Liste des tableaux

Chapitre I : présentation des plantes médicinale

Tableau I .1 : Principales classes des composés phénoliques **19**

CHAPITRE III : Méthodes de Travail

Tableau III .1 : produits et instruments **30**

Chapitre VI: résultats et discussion

Tableau IV.1. Teneurs en phénols totaux **38**

Tableau IV.2. Teneurs en phénols flavonoïdes **39**

Tableau IV.3. Valeurs de l'IC_{50} des extraits dans le test DPPH **40**

Tableau IV.4. Les valeurs VCEAC des extraits étudiés par le test du Phosphomolybdate **42**

Tableau IV.5. Valeurs de la capacité antioxydante (VCEAC) des extraits étudiés déterminées par le test FRAP **43**

Liste des abréviations

$A_{control}$: Absorbance du milieu réactionnel sans antioxydant

A_{test} : Absorbance du milieu réactionnel avec antioxydant

$AlCl_3$: Chlorure d'aluminium

C_2H_6O : Éthanol

$C_4H_8O_2$: Acétate d'éthyle

C_6H_{14} : Hexane

$C_7H_6O_5$: Acide gallique

CH_3OH : Méthanol

DPPH : 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle

EAG : Équivalent d'acide gallique

EAG/g MS : Équivalent d'acide gallique par gramme de matière sèche

Fe(III)-TPTZ : Complexe ferrique tripyridyltriazine

$FeCl_3$: Chlorure ferrique

FRAP : Pouvoir antioxydant réducteur du fer

H_2O_2 : Peroxyde d'hydrogène

H_2SO_4 : Acide sulfurique

IC_{50} : Concentration nécessaire pour inhiber 50 % du radical DPPH

IP (%) : Pourcentage d'inhibition

KH_2PO_4 : Phosphate monopotassique

Mo (V) : Molybdène (V)

Mo(VI) : Molybdène(VI)

Na_2CO_3 : Carbonate de sodium

O_2 : Oxygène

P_0 : Poids initial de poudre végétale (g)

P_1 : Poids de l'extrait sec (g)

ROS : Espèces réactives de l'oxygène

UV/Vis : Ultraviolet-visible

VCEAC : vitamine C Equivalent Antioxidant Capacité

% : Pourcentage

Introduction Générale

Introduction Générale

Les plantes médicinales occupent depuis longtemps une place importante dans la médecine traditionnelle et continuent d'attirer l'intérêt de nombreux chercheurs en raison de leur richesse en composés bioactifs. Ces substances naturelles présentent diverses propriétés biologiques susceptibles de contribuer à la prévention et au traitement de nombreuses maladies (WHO, 2013 ; Bruneton, 2009).

Parmi ces composés, les composés phénoliques constituent l'un des groupes de métabolites secondaires les plus abondants dans le règne végétal. Ils se caractérisent par la présence d'un ou de plusieurs noyaux aromatiques associés à des groupements hydroxyles, ce qui leur confère une grande diversité structurale et fonctionnelle. Ces molécules sont largement reconnues pour leurs multiples activités biologiques, notamment leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et antimicrobiennes (Balasundram et al., 2006 ; Dai & Mumper, 2010).

Au cours des dernières décennies, l'intérêt scientifique pour les composés phénoliques s'est considérablement accru en raison de leur rôle potentiel dans la lutte contre le stress oxydatif. Ce phénomène résulte d'un déséquilibre entre la production de radicaux libres et les mécanismes de défense antioxydants de l'organisme. Lorsque ces radicaux libres sont produits en excès, ils peuvent provoquer des altérations cellulaires importantes et contribuer au développement de nombreuses pathologies, telles que les maladies cardiovasculaires, les troubles neurodégénératifs ou encore certains cancers (Halliwell & Gutteridge, 2015 ; Valko et al., 2007).

Dans ce contexte, les plantes médicinales représentent une source naturelle importante d'antioxydants capables de neutraliser les radicaux libres et de protéger les cellules contre les dommages oxydatifs. L'étude des composés phénoliques présents dans ces plantes constitue donc un domaine de recherche particulièrement intéressant, tant sur le plan pharmacologique que nutritionnel (Rice-Evans et al., 1997 ; Shahidi & Ambigaipalan, 2015).

L'Algérie, grâce à la diversité de ses écosystèmes et à la richesse de sa flore, possède un patrimoine végétal considérable comprenant de nombreuses plantes médicinales utilisées dans la médecine traditionnelle. Parmi celles-ci figurent *Peganum harmala* , *Haloxylon scoparium* et *Tamarix aphylla* , qui sont largement répandues dans les régions arides et semi-arides du pays et utilisées depuis longtemps pour leurs vertus thérapeutiques.

Cependant, malgré leur utilisation traditionnelle, les propriétés biologiques et la composition chimique de ces plantes restent encore insuffisamment explorées. L'étude de leurs extraits phénoliques et de leur activité antioxydante peut ainsi contribuer à une meilleure valorisation de ces ressources végétales locales (Rice-Evans et al., 1997 ; Shahidi & Ambigaipalan, 2015).

Dans ce cadre, le présent travail a pour objectif d'étudier l'activité antioxydante des extraits phénoliques de quelques plantes médicinales locales, à savoir *Peganum harmala*, *Haloxylon scoparium* et *Tamarix aphylla*.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à une présentation générale des plantes étudiées, ainsi qu'à leurs caractéristiques botaniques et leurs usages traditionnels.
- ✓ Le deuxième chapitre traite des métabolites secondaires, en particulier des composés phénoliques, ainsi que du phénomène du stress oxydatif, des radicaux libres et des antioxydants.
- ✓ Le troisième chapitre présente le matériel et les méthodes expérimentales utilisés dans cette étude.
- ✓ Le quatrième chapitre expose les résultats obtenus ainsi que leur discussion.
- ✓ Enfin, ce travail est clôturé par une conclusion.

Synthèse Bibliographique

Chapitre

I

Présentation des plantes médicinales



Présentation des plantes étudiées

Généralités sur des trois plantes

Les plantes médicinales constituent une ressource biologique essentielle dans les régions arides et semi-arides, où elles jouent à la fois un rôle écologique fondamental et un u²rôle thérapeutique important dans les pratiques traditionnelles. Parmi ces espèces, *Peganum harmala*, *Haloxylon scoparium* et *Tamarix aphylla* occupent une place particulière en raison de leur large distribution en Afrique du Nord et de leur capacité remarquable à s'adapter à des conditions environnementales extrêmes caractérisées par la sécheresse, la salinité et les fortes variations thermiques (Ozenda, 2004; Quézel & Santa, 1963).

Ces trois plantes, bien que partageant un même environnement écologique, présentent des stratégies d'adaptation distinctes qui traduisent leur diversité fonctionnelle. Peganum harmala est une espèce herbacée vivace capable de se développer dans des sols pauvres et perturbés, grâce à une forte résistance au stress hydrique. En revanche, *Haloxylon scoparium* se caractérise par une morphologie xérophytique typique, avec une réduction des organes foliaires et une adaptation structurelle visant à limiter les pertes en eau. Quant à *Tamarix aphylla*, elle représente un exemple remarquable de plante halophyte, capable de survivre dans des milieux fortement salins grâce à des mécanismes physiologiques complexes, notamment l'excrétion des sels et la régulation osmotique (Le Houérou, 1992; Flowers & Colmer, 2008).Sur le plan phytochimique, ces espèces se distinguent par la diversité et la spécificité de leurs métabolites secondaires. *Peganum harmala* est particulièrement riche en alcaloïdes de type β-carbolines, tels que l'harmine et l'harmaline, qui sont responsables de ses propriétés pharmacologiques puissantes. En comparaison, *Haloxylon scoparium* présente une composition plus modérée dominée par des composés phénoliques et des flavonoïdes, tandis que *Tamarix aphylla* est reconnue pour sa richesse en polyphénols, tanins et flavonoïdes, ce qui lui confère un potentiel antioxydant élevé. Cette diversité chimique reflète non seulement l'adaptation de ces plantes à leur environnement, mais également leur intérêt en tant que sources naturelles de molécules bioactives (Ksouri et al., 2008 ; Rice-Evans et al., 1997).

1. *Peganum harmala L* :

1.1 Généralité :

Peganum harmala L., communément appelée Harmel, est une plante herbacée vivace appartenant à la famille des Nitrariaceae. Cette espèce occupe une place importante parmi les plantes médicinales traditionnelles des régions arides et semi-arides, notamment en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et dans certaines régions d'Asie centrale. Elle est particulièrement connue pour la richesse de ses graines en composés bioactifs, principalement des alcaloïdes de type β-carboline, qui confèrent à la plante un large éventail de propriétés pharmacologiques (Moloudizargari et al., 2013).

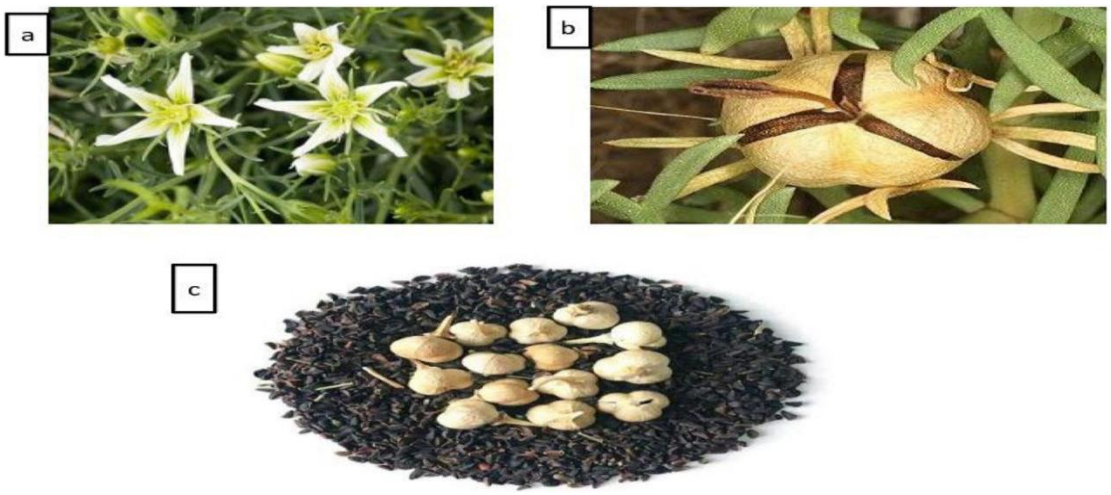


Figure 1 : Aspect général de la plante *Peganum harmala* (Moloudizargari et al., 2013).

D'un point de vue botanique et écologique, *Peganum harmala* est considérée comme une espèce caractéristique des écosystèmes steppiques et désertiques. Sa présence est souvent associée à des habitats ouverts, pauvres en matière organique et soumis à des conditions climatiques extrêmes, telles que des températures élevées et une faible pluviométrie. Ces conditions ont conduit la plante à développer plusieurs stratégies adaptatives lui permettant de survivre et de se reproduire dans des environnements où la plupart des espèces végétales ne peuvent pas prospérer (Zeng et al., 2018).

1.2. Classification botanique

La classification botanique de *Peganum harmala* reflète son appartenance à un groupe de plantes adaptées aux milieux arides et caractérisées par la production de métabolites secondaires spécifiques. Cette espèce appartient à la famille des Nitrariaceae, une famille relativement restreinte comprenant des plantes principalement distribuées dans les zones désertiques et semi-désertiques.

Rang taxonomique	***Classification***
Règne	Plantae
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Ordre	Zygophyllales
Famille	Nitrariaceae
Genre	Peganum
Espèce	Peganum harmala L.

(Moloudizargari et al., 2013).

1.3. Description morphologique

Sur le plan morphologique*, Peganum harmala* est une plante herbacée vivace présentant plusieurs caractéristiques qui témoignent de son adaptation aux environnements arides. La plante atteint généralement une hauteur comprise entre 30 et 80 cm.

- Les feuilles sont alternes et profondément divisées en segments linéaires très étroits. Cette morphologie particulière constitue une adaptation importante aux environnements secs, car elle réduit la surface foliaire exposée à l'évaporation et contribue ainsi à la conservation de l'eau dans les tissus végétaux (Zeng et al., 2018).
- Les fleurs de *Peganum harmala* sont généralement solitaires et de couleur blanche. Elles sont composées de cinq pétales bien distincts et apparaissent principalement au printemps. Après la pollinisation, les fleurs donnent naissance à un fruit de type capsule triloculaire contenant un grand nombre de graines brun foncé. Ces graines sont particulièrement riches en alcaloïdes et représentent la partie la plus étudiée de la plante dans les recherches pharmacologiques.

1.4. Distribution géographique

La distribution géographique de *Peganum harmala* est étroitement liée à sa capacité d'adaptation aux environnements arides et semi-arides. L'espèce est largement répandue dans plusieurs régions du monde, notamment en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et en Asie centrale.

Dans ces régions, la plante se développe principalement dans les zones steppiques et désertiques caractérisées par des précipitations faibles, des températures élevées et des sols pauvres en matière organique.

En Algérie, *Peganum harmala* est particulièrement abondante dans les régions steppiques et sahariennes. Elle est fréquemment observée dans les wilayas de Laghouat, El Bayadh, Naâma, Biskra et Ghardaïa (Quezel & Santa, 1963).

1.5. Écologie et adaptation

L'écologie de *Peganum harmala* reflète sa remarquable capacité d'adaptation aux conditions environnementales extrêmes. Cette espèce est généralement considérée comme une plante xérophile, c'est-à-dire adaptée aux milieux caractérisés par un déficit hydrique important.

Plusieurs facteurs contribuent à la résistance de la plante à la sécheresse. Le système racinaire profond permet l'absorption de l'eau présente dans les couches profondes du sol, tandis que la structure étroite des feuilles réduit la perte d'eau par transpiration. De plus, la plante possède des mécanismes physiologiques qui lui permettent de réguler l'ouverture de ses stomates afin de limiter l'évaporation excessive (Zeng et al., 2018).

1.6. Usages traditionnels

L'utilisation de *Peganum harmala* dans la médecine traditionnelle remonte à plusieurs siècles. Dans de nombreuses cultures, les graines de la plante sont considérées comme un remède naturel efficace contre diverses affections.

Les populations locales utilisent généralement les graines sous forme de décoction, d'infusion ou de poudre pour traiter différents problèmes de santé tels que les troubles digestifs, les infections bactériennes et certaines maladies de la peau. Dans certaines régions, la plante est également utilisée pour soulager les douleurs articulaires et les rhumatismes (Boukef, 1986).

1.7. Composition phytochimique

Les recherches phytochimiques ont révélé que *Peganum harmala* est une source importante de métabolites secondaires biologiquement actifs. Ces composés jouent un rôle essentiel dans les propriétés pharmacologiques de la plante.

Les alcaloïdes constituent les composés les plus caractéristiques de *P. harmala*. Les principaux alcaloïdes identifiés dans les graines comprennent harmine, harmaline, harmalol, harmane et peganine. Ces composés appartiennent à la classe des β-carbolines, connue pour ses effets biologiques variés, notamment sur le système nerveux central (Moloudizargari et al., 2013).

En plus des alcaloïdes, la plante contient également plusieurs composés phénoliques, notamment des flavonoïdes et des acides phénoliques. Ces molécules sont connues pour leurs propriétés antioxydantes, car elles sont capables de neutraliser les radicaux libres responsables du stress oxydatif dans les cellules (Sobhani et al., 2024).

1.8. Activités biologiques

Les études pharmacologiques menées au cours des dernières années ont mis en évidence plusieurs activités biologiques importantes associées à *Peganum harmala*.

L'activité antioxydante de la plante est principalement attribuée à la présence de composés phénoliques et de flavonoïdes capables de neutraliser les espèces réactives de l'oxygène. Ces molécules contribuent à protéger les cellules contre les dommages oxydatifs et peuvent jouer un rôle dans la prévention de certaines maladies chroniques (Zeng et al., 2018).

L'activité antimicrobienne de *P. harmala* a également été largement étudiée. Plusieurs travaux ont montré que les extraits de la plante peuvent inhiber la croissance de différentes bactéries pathogènes, notamment Staphylococcus aureus et Escherichia coli. Ces effets sont principalement attribués aux alcaloïdes présents dans les graines.

Par ailleurs, certaines études ont démontré que les extraits de Peganum harmala possèdent des propriétés anti-inflammatoires, notamment grâce à leur capacité à inhiber la production de médiateurs pro-inflammatoires (Moloudizargari et al., 2013).

2. Haloxylon scoparium Pomel :

2.1. Généralités :

Haloxylon scoparium Pomel est une espèce végétale emblématique des zones arides et semi-arides d'Afrique du Nord, appartenant à la famille des Amaranthaceae. Cette plante est largement répandue dans les steppes algériennes et les régions sahariennes, où elle constitue un élément structurant du couvert végétal. Elle est particulièrement adaptée aux conditions environnementales extrêmes, caractérisées par une faible disponibilité en eau, des températures élevées et une forte intensité du rayonnement solaire.

Contrairement aux plantes des milieux tempérés, H. scoparium ne se limite pas à une simple survie dans ces conditions difficiles, mais développe une série de mécanismes adaptatifs complexes qui lui permettent de maintenir son activité biologique. Cette capacité d'adaptation repose sur une interaction étroite entre des modifications morphologiques (réduction des feuilles), physiologiques (régulation hydrique) et biochimiques (production de métabolites secondaires). Ainsi, cette espèce peut être considérée comme un modèle écologique des plantes xérophytes (Quézel & Santa, 1963; Ozenda, 2004).



Figure 2 : aspect générale de Haloxylon scoparium (adapté de Ozenda, 2004)

2.2. Classification botanique :

La classification botanique de *Haloxylon scoparium* permet de mieux comprendre sa position phylogénétique parmi les plantes désertiques et ses relations avec d'autres espèces du même genre.

Rang taxonomique	**Classification**
Règne	Plantae
Division	Angiospermes
Classe	Dicotylédones
Ordre	Caryophyllales
Famille	Amaranthaceae
Genre	Haloxylon
Espèce	Haloxylon scoparium Pomel

(Ozenda, 2004; Maestre et al., 2009).

2.3. Description morphologique :

La morphologie de *Haloxylon scoparium* constitue une réponse directe aux contraintes du milieu désertique. L'espèce se présente sous forme d'un arbuste très ramifié, atteignant généralement une hauteur comprise entre 1 et 2 mètres.

- ✓ Les feuilles sont fortement réduites, voire absentes, ce qui permet de limiter la transpiration. La fonction photosynthétique est assurée principalement par les tiges chlorophylliennes, qui présentent une cuticule épaisse et des stomates enfoncés. Ces caractéristiques réduisent considérablement les pertes en eau et augmentent l'efficacité de l'utilisation des ressources hydriques (Ksouri et al., 2008; Ozenda, 2004).
- ✓ Le système racinaire est particulièrement développé, avec une racine pivotante profonde et un réseau latéral étendu. Cette organisation permet à la plante d'exploiter efficacement les ressources en eau disponibles dans le sol, même à faible profondeur (Maestre et al., 2009).

2.4. Distribution géographique :

Haloxylon scoparium est largement distribué dans les régions arides de l'Afrique du Nord. En Algérie, il est particulièrement présent dans les zones steppiques telles que Laghouat, Djelfa, Naâma et El Bayadh, où il constitue une espèce dominante dans certaines formations végétales. (Le Houérou, 1992; Ozenda, 2004).

2.5. Écologie et adaptation :

Sur le plan écologique, *Haloxylon scoparium* joue un rôle fondamental dans les écosystèmes arides. Elle contribue à la stabilisation des sols et à la réduction de l'érosion, tout en favorisant la biodiversité locale.

Les adaptations physiologiques de cette plante incluent une tolérance élevée à la sécheresse et à la salinité, ainsi qu'une capacité à produire des composés antioxydants pour se protéger

contre le stress oxydatif. Ces mécanismes permettent à la plante de maintenir son activité métabolique dans des conditions extrêmes (Flowers & Colmer, 2008; Ksouri et al., 2008).

2.6. Usages traditionnels :

Dans la médecine traditionnelle, *Haloxylon scoparium* est utilisée pour traiter diverses affections, notamment les troubles digestifs, les inflammations et certaines infections. Les parties aériennes sont généralement utilisées sous forme de décoction (Boudjelal et al., 2013; Le Houérou, 1992).

2.7. Composition phytochimique :

La composition phytochimique de *Haloxylon scoparium* est dominée par la présence de flavonoïdes, d'acides phénoliques, de tanins et de saponines. Ces composés jouent un rôle essentiel dans les mécanismes de défense contre le stress oxydatif.

Les flavonoïdes, tels que la quercétine, sont particulièrement importants en raison de leur capacité à neutraliser les radicaux libres. Les polyphénols contribuent également à cette activité en inhibant les réactions d'oxydation (Rice-Evans et al., 1997; Ksouri et al., 2008).

2.8. Activités biologiques :

Les études ont montré que *Haloxylon scoparium* possède une activité antioxydante importante, liée à sa richesse en composés phénoliques. Cette activité permet de neutraliser les radicaux libres et de protéger les cellules contre le stress oxydatif.

La plante présente également des activités antimicrobiennes et anti-inflammatoires, ce qui renforce son potentiel thérapeutique (Boudjelal et al., 2013; Ksouri et al., 2008)

3. Tamarix aphylla (L.) H.Karst :

3.1.Généralité :

Tamarix aphylla (L.) H.Karst., communément appelée « Tarfah », est une espèce arborée emblématique des écosystèmes arides et semi-arides, appartenant à la famille des Tamaricaceae. Elle se distingue par sa remarquable capacité à coloniser des milieux extrêmes caractérisés par une forte salinité, une faible disponibilité en eau et des températures élevées. Cette espèce joue un rôle écologique majeur dans les zones désertiques, notamment en contribuant à la stabilisation des sols, à la réduction del'érosion éolienne et à l'amélioration de la fertilité des sols par l'accumulation de Matière organique.



Figure 3 : Aspect général de *Tamarix aphylla* dans son habitat aride(Ozenda, P. 2004).

3.2. Classification botanique :

Tamarix aphylla est classée dans le règne Plantae, division des Angiospermes, classe des Eudicotylédones et ordre des Caryophyllales. Elle appartient à la famille des Tamaricaceae, qui regroupe des espèces adaptées aux milieux arides et salins. Le genre Tamarix comprend plusieurs espèces morphologiquement proches, mais *T. aphylla* se distingue par son port arboré et sa longévité élevée. Cette classification repose sur des critères morphologiques et phylogénétiques validés par les systèmes modernes de classification des plantes

Rang taxonomique	***Classification***
Règne	Plantes
Division	Magnoliophyta (Angiospermes)
Classe	Magnoliopsida (Dicotylédones)
Ordre	Caryophyllales
Famille	Tamaricacées
Genre	Tamarix

(APG IV, 2016)

3.3.Description morphologique :

Sur le plan morphologique, *Tamarix aphylla* se présente sous forme d'un arbre ou d'un grand arbuste pouvant atteindre 10 à 15 mètres de hauteur, avec un tronc robuste et une écorce rugueuse brun-grisâtre. Les branches sont fines, flexibles et fortement ramifiées, conférant à la plante une structure aérienne dense et adaptée à la réduction de l'exposition directe au rayonnement solaire.

Les feuilles sont extrêmement réduites, sous forme d'écailles, et étroitement appliquées contre les rameaux. Cette réduction foliaire constitue une stratégie adaptative essentielle permettant de limiter la transpiration et donc les pertes en eau. Les fonctions photosynthétiques sont principalement assurées par les tiges chlorophylliennes (Ozenda, 2004; Quézel & Santa, 1963).

3.4. Distribution géographique :

Cette espèce est largement distribuée dans les zones arides d'Afrique du Nord, notamment en Algérie, en Tunisie et au Maroc, ainsi que dans les régions sahariennes et sahéliennes. Elle est également présente au Moyen-Orient et en Asie occidentale. En Algérie, *Tamarix aphylla* est fréquemment rencontrée dans les régions sahariennes, les oueds et les zones salines, où elle forme parfois des peuplements denses. Sa distribution est étroitement liée à sa tolérance aux sols salins et aux conditions climatiques extrêmes, ce qui explique sa dominance dans certains écosystèmes désertiques (Le Houérou, 1992; Ozenda, 2004).

3.5. Écologie et adaptation :

L'écologie de *Tamarix aphylla* est intimement liée à sa capacité à s'adapter à des conditions extrêmes. Cette espèce présente une combinaison de stratégies morphologiques, physiologiques et biochimiques lui permettant de survivre dans des environnements caractérisés par une forte aridité et une salinité élevée.

D'un point de vue écologique, *Tamarix aphylla* joue un rôle clé dans la stabilisation des sols sableux grâce à son système racinaire développé, limitant ainsi l'érosion éolienne. Elle participe également à la création de microhabitats favorables à d'autres espèces végétales et animales, ce qui renforce la biodiversité locale. Ces caractéristiques font de cette espèce un élément essentiel des programmes de lutte contre la désertification (Flowers & Colmer, 2008; Maestre et al., 2009).

3.6. Usages traditionnels :

Sur le plan ethnobotanique, *Tamarix aphylla* occupe une place importante dans les pratiques traditionnelles des populations locales. Elle est utilisée comme remède traditionnel pour traiter diverses affections, notamment les troubles digestifs et inflammatoires. Les extraits de cette plante sont également utilisés pour leurs propriétés antiseptiques et cicatrisantes. Ces usages reflètent une connaissance empirique transmise de génération en génération et confirmée partiellement par des études scientifiques récentes (Boudjelal et al., 2013)

3.7. Composition phytochimique :

La composition phytochimique de *Tamarix aphylla* est particulièrement riche en métabolites secondaires, notamment en composés phénoliques, flavonoïdes, tanins et saponines. Ces composés jouent un rôle crucial dans les mécanismes de défense de la plante contre les stress environnementaux, en particulier le stress oxydatif.

Les flavonoïdes, tels que la quercétine et le kaempférol, sont reconnus pour leur capacité à neutraliser les radicaux libres et à prévenir les dommages oxydatifs au niveau cellulaire. Les tanins possèdent des propriétés astringentes et antimicrobiennes, tandis que les acides phénoliques contribuent à l'activité antioxydante globale de la plante (Ksouri et al., 2008; Rice-Evans et al., 1997).

3.8.Activités biologiques :

Les études scientifiques ont démontré que *Tamarix aphylla* possède un large éventail d'activités biologiques, principalement attribuées à sa richesse en composés phénoliques. L'activité antioxydante est particulièrement importante, car elle permet de neutraliser les espèces réactives de l'oxygène (ROS), responsables du stress oxydatif et de nombreuses pathologies.

En outre, des activités antimicrobiennes ont été observées contre diverses bactéries pathogènes, suggérant un potentiel d'utilisation dans le développement de nouveaux agents antimicrobiens. L'activité anti-inflammatoire est également notable, résultant de l'inhibition de certains médiateurs inflammatoires. Ces propriétés biologiques confirment l'intérêt de cette plante dans les domaines pharmacologique et thérapeutique (Ksouri et al., 2008; Rice-Evans et al., 1997).

4. Conclusion :

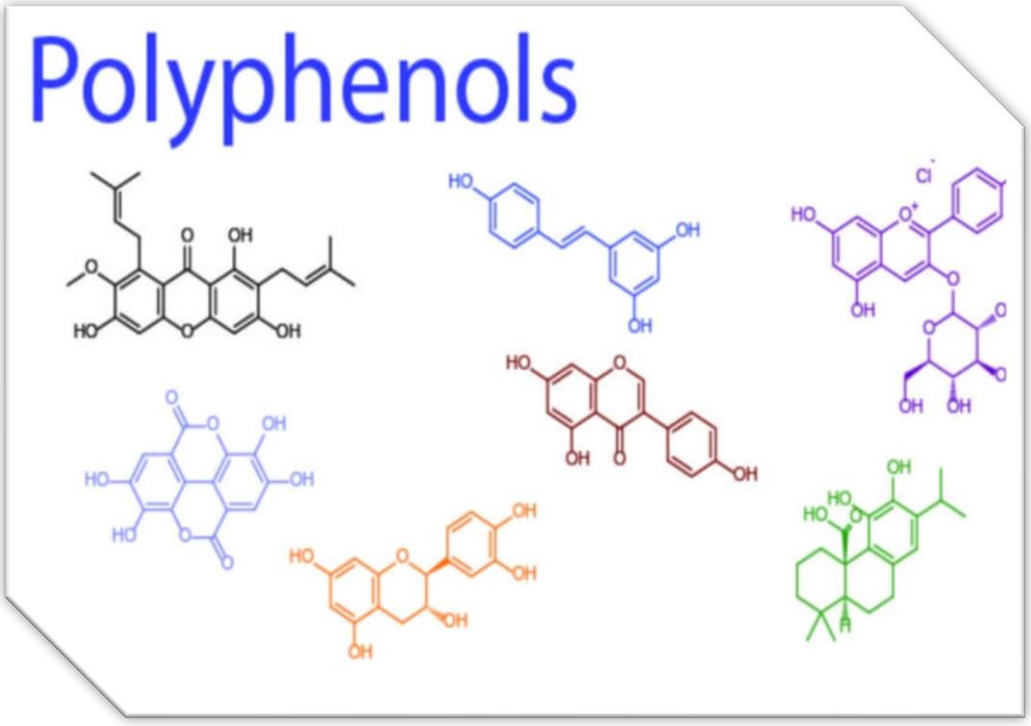
La comparaison des trois plantes met en évidence une complémentarité remarquable entre leurs profils phytochimiques et leurs activités biologiques. Alors que Peganum harmala se distingue par sa richesse en alcaloïdes et son potentiel pharmacologique spécifique, *Tamarix aphylla* apparaît comme la source la plus prometteuse en composés antioxydants. *Haloxylon scoparium*, bien que moins riche en métabolites bioactifs, joue un rôle écologique fondamental et présente un potentiel encore sous-exploré.

Cette diversité souligne l'importance de valoriser ces espèces dans des études futures, notamment pour le développement de nouveaux agents thérapeutiques naturels adaptés aux conditions environnementales extrêmes

Chapitre

II

Métabolites Secondaires



II.1-Généralités sur les Composés Phénoliques (POLYPHÉNOLS)

Introduction

Les composés phénoliques, ou polyphénols, sont des métabolites secondaires caractérisés par la présence d'un cycle aromatique portant des groupes hydroxyles libres ou liés à un glucide. Ils se trouvent dans toutes les parties des plantes supérieures, telles que les racines, les tiges, les feuilles, les fleurs, le pollen, les fruits, les graines et le bois, et interviennent dans de nombreux processus physiologiques, comme la croissance cellulaire, la rhizogenèse, la germination des graines et la maturation des fruits. Les principaux représentants sont les anthocyanes, les flavonoïdes et les tanins. La méthode de dosage des polyphénols totaux avec le réactif de Folin-Ciocalteu a été décrite dès (Rossi, 1965) et son usage s'est largement répandu depuis pour caractériser des extraits végétaux provenant de diverses sources. Dans notre laboratoire, nous utilisons ce dosage de manière routinière, après l'avoir adapté pour répondre à deux objectifs : analyser un grand nombre d'échantillons à partir de très peu de matière végétale et permettre son application à tout type de tissu de l'arbre (bois, feuilles, racines…).(Nathalie Boizot, 2006)

II.1.1. Généralités

Les composés phénoliques représentent une grande famille de métabolites secondaires produits par les végétaux. Leur structure chimique se caractérise principalement par la présence d'un ou de plusieurs cycles aromatiques (noyaux benzéniques) portant un ou plusieurs groupements hydroxyles (–OH).

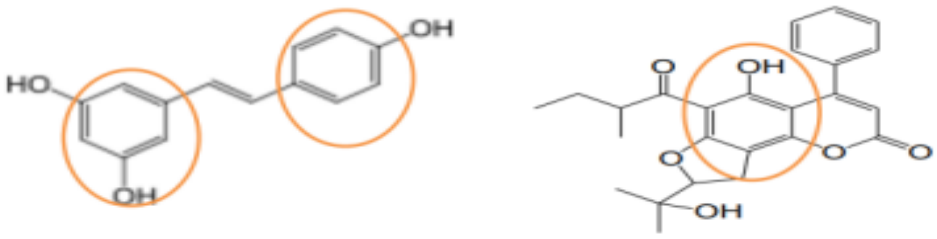


Figure 4 : Groupements Phénoliques de 1 ou Plusieurs OH (LABBANI, 2021)

Le terme « composés phénoliques » englobe un large ensemble de molécules comprenant les monophénols, les diphénols et les polyphénols, selon le nombre de fonctions phénoliques présentes dans leur structure moléculaire.

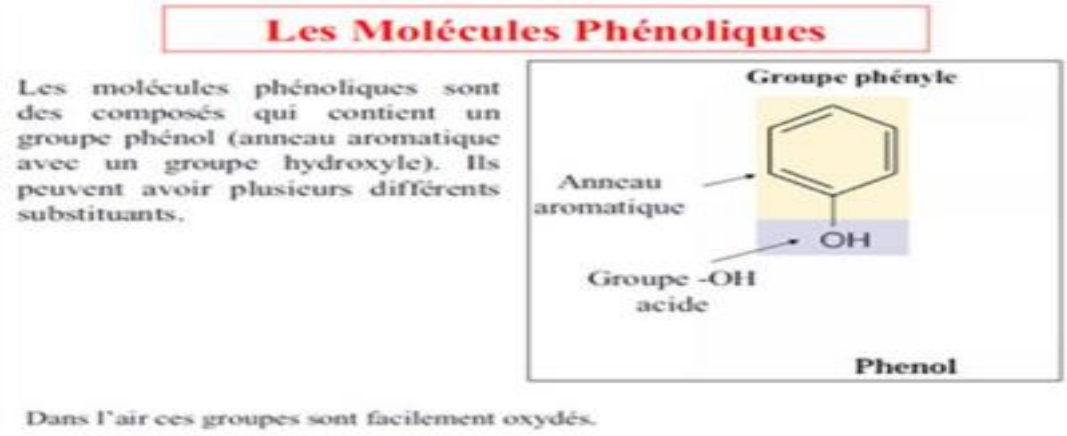


Figure 5 : Les molécules phénoliques

Le terme polyphénol a été introduit dans les années 1980 afin de remplacer l'ancienne appellation « tannins végétaux ». Les polyphénols correspondent donc à un groupe important de substances naturelles largement distribuées dans le règne végétal.

Les composés phénoliques constituent l'un des groupes de composés phytochimiques les plus abondants dans les plantes. On estime qu'il existe plus de 8000 molécules différentes, réparties en plusieurs classes chimiques.(Ralph, 2006)

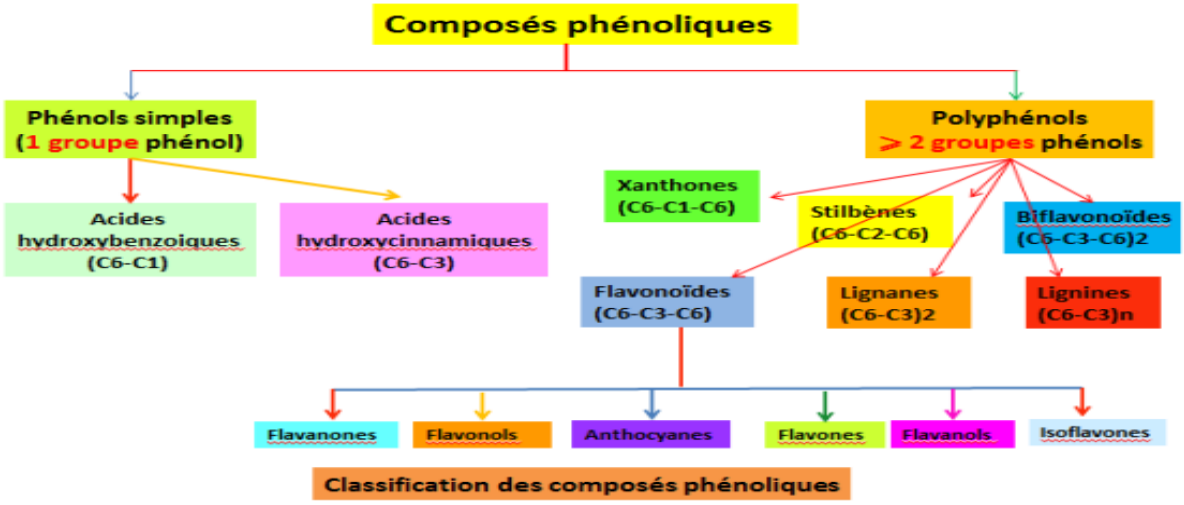


Figure 6 : Classification des composés phénolique (LABBANI, 2021)

Chaque classe se caractérise par la présence d'un noyau benzoïque auquel est directement lié un ou plusieurs groupements hydroxyles.(Matkowski A., 2008)

Ces substances sont présentes dans presque toutes les parties des plantes supérieures telles que les racines, les tiges, les feuilles, les fleurs, les fruits, les graines et même le bois. Leur

synthèse est souvent stimulée lorsque la plante est soumise à des conditions de stress telles que les infections, les blessures ou l'exposition aux UV.Les composés phénoliques interviennent également dans de nombreux processus physiologiques importants chez les végétaux, notamment la croissance cellulaire, la germination des graines, la rhizogenèse ainsi que la maturation des fruits. Parmi les groupes les plus répandus figurent les flavonoïdes, les anthocyanes et les tannins.À l'échelle cellulaire, ces molécules sont généralement stockées dans les vacuoles cytoplasmiques des cellules végétales, principalement dans les cellules périphériques des tissus.(LABBANI, 2021)

II.1.2. Différentes Classes des Polyphénols

Les composés phénoliques peuvent aller de molécules simples, comme les acides phénoliques, à des structures hautement polymérisées, telles que les tanins et les lignines. Ils peuvent être classés selon leur complexité, ainsi que le degré et le type de liaisons possibles de leur squelette de base avec d'autres molécules. Les polyphénols sont des molécules très variées, constituées d'un ou plusieurs cycles benzéniques portant une ou plusieurs fonctions hydroxyles. Ils peuvent être regroupés en différentes classes en fonction de la complexité de leur squelette de base (noyau C_6), du degré de modification de ce squelette (oxydation, hydroxylation, etc.), et des molécules auxquelles ils sont associés, telles que les glucides, les lipides, les protéines ou d'autres métabolites.

Les formes les plus simples se trouvent principalement dans deux groupes majeurs, à partir desquels dérivent de nombreux composés : les acides hydroxycinnamiques et les flavonoïdes. Les formes plus complexes, quant à elles, résultent généralement de la condensation de certaines formes simples et comprennent, entre autres, les tanins et les lignines.

Les polyphénols se répartissent en différents groupes, définis selon la structure de leur squelette carboné. Les acides phénoliques (C_6-C_1 et C_6-C_3) et, surtout, les flavonoïdes (C_6-C_3-C_6) sont les plus couramment rencontrés dans le règne végétal. Les lignanes (C_6-C_3-C_3-C_6) sont moins répandus. Le dernier groupe comprend les stilbènes (C_6-C_2-C_6), dont le plus connu est le resvératrol, présent dans la peau du raisin. Les flavonoïdes constituent le groupe le plus vaste et le plus largement distribué des polyphénols dans le règne végétal. Plus de 4000 flavonoïdes différents ont été identifiés. Plusieurs classes de flavonoïdes sont présentes dans notre alimentation et se distinguent par le degré d'oxydation du noyau hétérocyclique oxygéné.(LABBANI, 2021)

Tableau 1: Principales classes des composés phénoliques (Maataoui, Hmyene, & Hilali, 2006)

Squelette carboné	Classe	Exemple	Origine (exemple)
C_6	Phénols simples	Catéchol	
C_6-C_1	Acides hydroxy benzoïques	p-hydroxy benzoïque	Epices, fraise
C_6-C_3	Acides hydrox cinnamiques	Acide caféique, férulique	Pomme de terre, pomme
	Coumarines	Scopolétine	Citrus
C_6-C_4	Naphtoquinones	Juglone	Noix
C_6-C_1-C_6	Xanthones	Mangiferine	
C_6-C_2-C_6	Stilbènes	Resvératrol	Vigne
C_6-C_3-C_6	Flavonoïdes : * Flavonols * Anthocyanes * Flavanols * Flavanones	Kaempférol, quercétine Cyanidine, pélargonidine Catéchine, épicatéchine Naringénine	Fruit, légumes, fleurs, fruits rouges Pomme, raisin Citrus
	Isoflavonoïdes	Daidzéine	Soja, pois
$(C_6$-$C_3)_2$	Lignanes	Pinorésinol	Pin
$(C_6$-C_3-$C_6)_2$	Biflavonoïdes	Amentoflavone	
$(C_6$-$C_3)_n$	Lignines		Bois, noyaux des fruits
$(C_6$-C_3-$C_6)_n$	Tanins condensés		Raisin rouge, kaki

II.1.3. Propriété Thérapeutique des Composés Phénoliques

Grâce à leur grande diversité structurale, les composés phénoliques remplissent plusieurs fonctions biologiques essentielles chez les plantes. Ils participent notamment aux mécanismes de défense contre les agents pathogènes, les parasites et les infections microbiennes. Ils

contribuent également à la protection contre les UV et au renforcement de la structure des parois cellulaires végétales.

Au-delà de leur rôle dans les plantes, ces composés présentent également de nombreux effets bénéfiques pour la santé humaine.En effet, les polyphénols possèdent une activité antioxydante importante, ce qui leur permet de neutraliser les radicaux libres responsables du vieillissement cellulaire.

Plusieurs études ont montré que les composés phénoliques peuvent :

- Ralentir le vieillissement cutané,
- Réduire le risque de maladies cardiovasculaires en limitant l'oxydation du cholestérol,
- Protéger les cellules contre le stress oxydatif,
- Présenter des propriétés anti-inflammatoires,
- Pontribuer à la prévention de certaines maladies chroniques, notamment les maladies métaboliques et neurodégénératives.

De nombreuses plantes médicinales riches en composés phénoliques sont ainsi utilisées dans la prévention ou le traitement de diverses pathologies.

II.2-Radicaux Libres et les Antioxydants

Les radicaux libres sont des molécules très réactives produites naturellement dans l'organisme lors de plusieurs processus biologiques. Lorsqu'ils sont présents en quantité excessive, ils peuvent provoquer des dommages importants au niveau des cellules et des tissus.

Les radicaux libres possèdent un électron non apparié, ce qui les rend instables. Afin de retrouver une stabilité chimique, ils réagissent avec d'autres molécules présentes dans l'organisme, entraînant ainsi des réactions en chaîne susceptibles d'endommager les protéines, l'ADN et les membranes cellulaires$

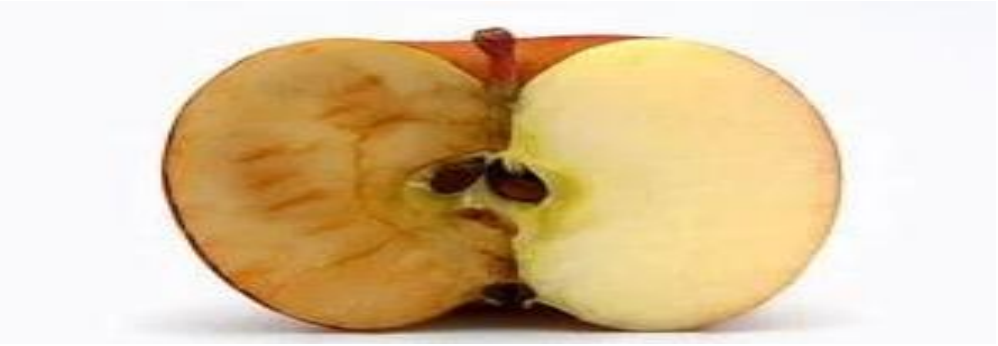


Figure 7 : Radicaux libres causant des dommages aux composants vitaux des cellules (eucerin, 2022)

II.2.1-Stress Oxydatif

Le stress oxydatif, également appelé stress oxydant, résulte d'un excès de réactions d'oxydation dans l'organisme. Mais qu'entend-on par oxydation ? Pour illustrer ce phénomène, on peut prendre l'exemple d'une pomme coupée en deux et laissée à l'air libre. Sous l'action de certaines molécules appelées enzymes, combinée à la présence d'oxygène, un pigment brun se forme progressivement. C'est ce processus d'oxydation qui provoque le brunissement de la chair de la pomme.

L'oxydation correspond donc à une réaction chimique entre l'oxygène et une autre substance, entraînant la formation de radicaux libres. Ces derniers sont des molécules instables. Ils jouent un rôle important dans le fonctionnement normal de l'organisme, notamment en activant certaines voies antioxydantes au niveau cellulaire. Cependant, lorsque leur production devient excessive, ils peuvent devenir nocifs.

En effet, un excès de radicaux libres peut endommager les cellules saines et entraîner diverses complications pour la santé. Pourtant, l'oxygène reste indispensable à la vie.

Heureusement, l'organisme dispose de molécules appelées antioxydants, capables de neutraliser ces radicaux libres. Ces substances permettent ainsi de ralentir ou de limiter les réactions d'oxydation.

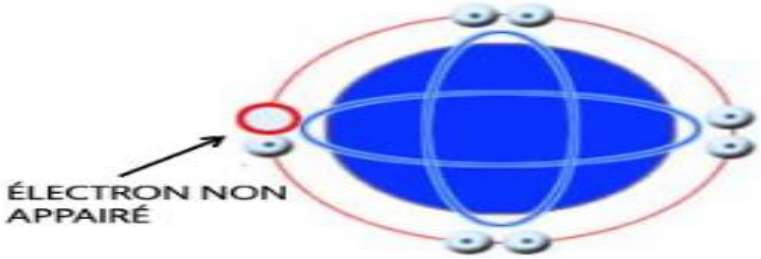


Figure 8 : L'oxydation est responsable du brunissement des fruits

Cependant, il peut arriver que la production de radicaux libres dépasse la capacité des systèmes de défense antioxydants de l'organisme.

II.2.2-Radicaux Libres

Le corps humain contient des molécules constituées d'atomes entourés d'électrons. Pour qu'une molécule reste stable, ces électrons doivent être appariés, c'est-à-dire regroupés par paires. Cependant, il peut arriver qu'une molécule possède un ou plusieurs électrons non appariés, appelés radicaux libres. En raison de leur grande instabilité, ces électrons célibataires ont tendance à chercher un autre électron auprès d'une molécule voisine afin de retrouver une certaine stabilité. Ce processus peut alors endommager la structure de la molécule attaquée. La molécule ainsi altérée devient à son tour un radical libre, capable de capter un électron d'une autre molécule. Ce mécanisme se poursuit successivement et conduit à ce que l'on appelle une réaction en chaîne.

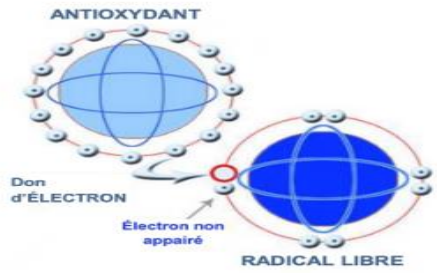


Figure 09 : Radical libre

Il existe plusieurs types de radicaux libres. Parmi eux, ceux qui provoquent le plus de dommages cellulaires sont les espèces réactives de l'oxygène (ROS : Reactive Oxygen Species), également appelées dérivés réactifs de l'oxygène. Tout radical libre contenant de l'oxygène est considéré comme un ROS.

Par ailleurs, l'utilisation de substances antioxydantes permet également de neutraliser les radicaux libres et d'interrompre les réactions en chaîne.



Figure 10 : Comment remédier des radicaux libres

Le rôle principal des antioxydants est de limiter l'oxydation des cellules en réduisant la formation des radicaux libres. Cependant, ces molécules possèdent également d'autres effets bénéfiques. Certains antioxydants contribuent à améliorer l'éclat du teint.

II.2.3. Nature des Radicaux Libres

Les radicaux libres sont des espèces très réactives dérivées de l'oxygène, capables d'endommager nos cellules. Un radical libre (RL) est un atome possédant un électron non apparié, ce qui le rend instable et particulièrement réactif envers les molécules environnantes. Pour retrouver sa paire électronique et ainsi gagner en stabilité, le radical libre « attaque » d'autres atomes en leur arrachant cet électron manquant ; l'atome spolié devient à son tour un radical libre.

Il existe de nombreux types de radicaux libres, parmi lesquels les principaux sont l'anion superoxyde (O_2•−), le radical hydroxyle (OH•) et l'oxyde nitrique (•NO). Les radicaux libres font partie des « dérivés réactifs de l'oxygène » (ROS).

Par exemple, le peroxyde d'hydrogène ou eau oxygénée (H_2O_2) est un dérivé réactif de l'oxygène toxique, mais il peut se transformer en radical hydroxyle (•OH), le plus dangereux des radicaux libres.

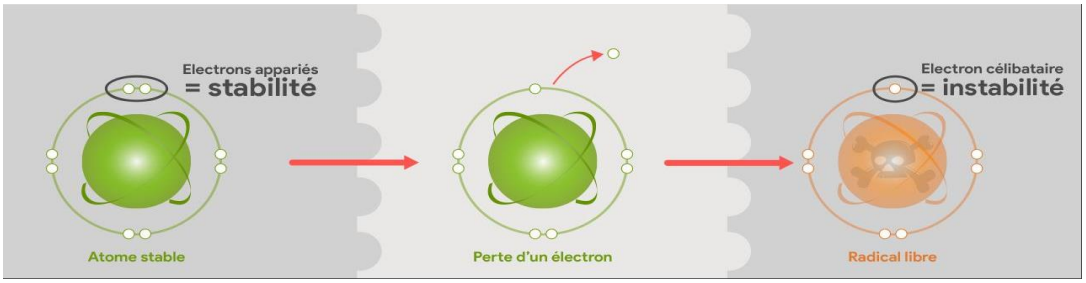


Figure 11 : Formation des radicaux libres (pensersante, 2020)

La chaîne respiratoire est un ensemble de complexes protéiques qui assurent le transfert d'électrons et / ou de protons par des phosphorylations oxydatives. Ce processus fait donc intervenir une série de réactions d'oxydation qui consomment de l'oxygène et produisent des dérivés : les radicaux libres oxygénés.

C'est ainsi que se mettent en place des réactions en chaîne destructrices, s'il n'y a pas intervention des antioxydants. (pensersante, 2020)

II.2.4-Circonstances physiologiques productrices de radicaux libres

- L'oxydation physiologique, nécessaire à la vie, se réalise notamment lors de la respiration. Paradoxalement, l'oxygène, acteur central des réactions chimiques cellulaires et avide d'électrons, est également le principal producteur de radicaux libres.
- La production de radicaux libres intervient aussi lors de processus inflammatoires ou infectieux.
- Elle peut survenir en cas d'exposition répétée au stress ou à des substances potentiellement toxiques, telles que la pollution, le tabac, les pesticides ou certains médicaments.
- Notre environnement contribue également à la formation de radicaux libres, notamment lors d'expositions solaires excessives, aux rayonnements électromagnétiques, à la pollution ou aux pesticides.

Cependant, la formation et l'utilisation de radicaux libres peuvent être vitales pour l'organisme. Ils jouent un rôle dans la défense antibactérienne, la régulation de l'expression des gènes et la destruction de cellules indésirables. (pensersante, 2020)

II.2.5-Les Antioxydants

Un antioxydant (AOX) est une molécule capable de ralentir ou d'empêcher l'oxydation d'autres substances chimiques avec lesquelles elle entre en contact. L'oxydation fait partie des réactions d'oxydoréduction, qui transfèrent des électrons d'une substance vers un agent oxydant. Ce processus peut générer des radicaux libres, responsables de réactions en chaîne destructrices. Les antioxydants peuvent interrompre ces réactions en se combinant avec les radicaux, neutralisant ainsi leur action. Ces propriétés se retrouvent notamment dans les familles des thiols et des phénols.

La plupart des êtres vivants dépendent du dioxygène pour leur survie, mais l'oxygène peut également produire des radicaux libres, appelés « espèces réactives de l'oxygène » (ROS, Reactive Oxygen Species), qui sont toxiques pour les cellules, en particulier au niveau des mitochondries. (Desmier, 2016)

II.2.6-Les aliments riches en antioxydants

Il est donc essentiel de privilégier les aliments riches en antioxydants, notamment ceux contenant des polyphénols, des vitamines (A, groupe B, C, E) et des oligoéléments comme le sélénium et le zinc, afin de stimuler le métabolisme et de lutter contre les radicaux libres. Les végétaux présentent une meilleure qualité nutritionnelle lorsqu'ils sont de saison et fraîchement récoltés.

a. Fruits et légumes riches en antioxydants naturels :

- Vitamine A (bêta-carotène ou provitamine A) : carotte, pissenlit, persil, laitue, légumes verts, fruits et légumes à chair jaune ou orange.
- Vitamine C : cerise acérola, cassis, persil, poivrons, estragon, kiwi, fraises, framboises, choux, cresson, agrumes, fruits rouges.
- Vitamine E : huile de tournesol, germes de blé, amandes avec leur peau, tomates, kiwis, choux et légumes à feuilles vertes.
- Vitamines du groupe B : légumes verts à feuilles, levure alimentaire, fruits oléagineux, foie, coquillages, poissons gras, jaune d'œuf cru, cresson, épinards, oseille, mâche.
- Sélénium / Zinc : fruits de mer, viande et œufs, céréales complètes, certaines épices (curcuma, clou de girofle), noix (noix de Grenoble, noix de pécan) et oléagineux.

Les apports en antioxydants peuvent également être complétés par des compléments alimentaires, à condition de maintenir une alimentation saine et variée.

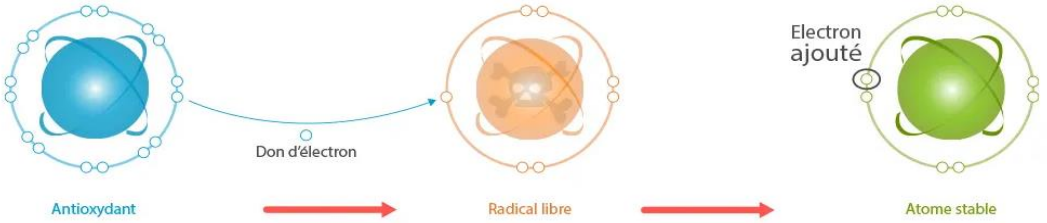


Figure 12 : Action des antioxydants sur les radicaux libres

b. Antioxydants dans l'alimentation

Parmi les antioxydants les plus connus figurent le bêta-carotène (provitamine A), l'acide ascorbique (vitamine C), le tocophérol (vitamine E), les polyphénols et le lycopène. Les polyphénols incluent les flavonoïdes, très répandus dans le règne végétal, les tanins présents dans le cacao, le café, le thé ou le raisin, les anthocyanes que l'on trouve notamment dans les fruits rouges, ainsi que les acides phénoliques présents dans les céréales, les fruits et les légumes. Le glutathion, une protéine présente en grande quantité dans la levure de bière, est l'un des antioxydants les plus actifs dans nos cellules lorsqu'il se trouve sous forme réduite. Il est mieux assimilé dans l'intestin lorsqu'il est associé à la vitamine C, en particulier sous forme de vitamine C liposomale, qui neutralise sa charge et favorise son absorption intestinale.

II.2.7-Systèmes Antioxydants

Un antioxydant est une molécule capable de neutraliser une espèce oxydante, empêchant ainsi celle-ci de provoquer des dommages dans l'organisme. On parle de systèmes antioxydants au pluriel, car plusieurs types existent, notamment :

Les enzymes antioxydantes, comme la superoxyde dismutase (SOD), la glutathion peroxydase (GPX) et la catalase (CAT).

Les substances antioxydantes d'origine alimentaire, qui peuvent neutraliser directement les radicaux libres ou soutenir l'action des autres systèmes antioxydants. Il s'agit des vitamines (A, C, E), des polyphénols, des caroténoïdes, des flavonoïdes, ainsi que des oligo-éléments tels que le zinc, le manganèse et le sélénium.

Comment renforcer les systèmes antioxydants ?

Étant donné les dommages potentiels causés par le stress oxydatif et le rôle des systèmes antioxydants, il est essentiel de chercher à les stimuler. Deux approches complémentaires sont possibles : améliorer son alimentation pour apporter un maximum d'antioxydants, et renforcer l'action des mécanismes antioxydants par l'activité physique, qui augmente l'activité des enzymes antioxydantes.(sante, bretagne sport sante, 2022)

II.2.8-Utilisation des Antioxydants

Un antioxydant est une molécule capable de ralentir ou d'empêcher complètement l'oxydation des cellules en neutralisant les radicaux libres. Mais que sont exactement les radicaux libres ?

Il s'agit d'atomes instables naturellement présents dans notre organisme, qui cherchent à se stabiliser en capturant des électrons sur d'autres cellules. Ce mécanisme peut déclencher une réaction en chaîne : les cellules attaquées deviennent à leur tour des radicaux libres. Sans intervention, ces réactions peuvent endommager les cellules saines, entraînant un vieillissement prématuré de la peau, et, dans les cas extrêmes, favorisant le développement de cancers. La consommation d'antioxydants permet d'interrompre cette chaîne destructrice.

Partie Expérimentale

Chapitre

III

Méthodes de Travail



III.1. Méthodes de Travail

Notre travail de recherche est réalisé au niveau du laboratoire de Génie des procédés de l'université Ammar Telidji de Laghouat, l'ensemble des méthodes expérimentales que nous avons mené dans ce travail se structure comme illustré l'organigramme suivant :

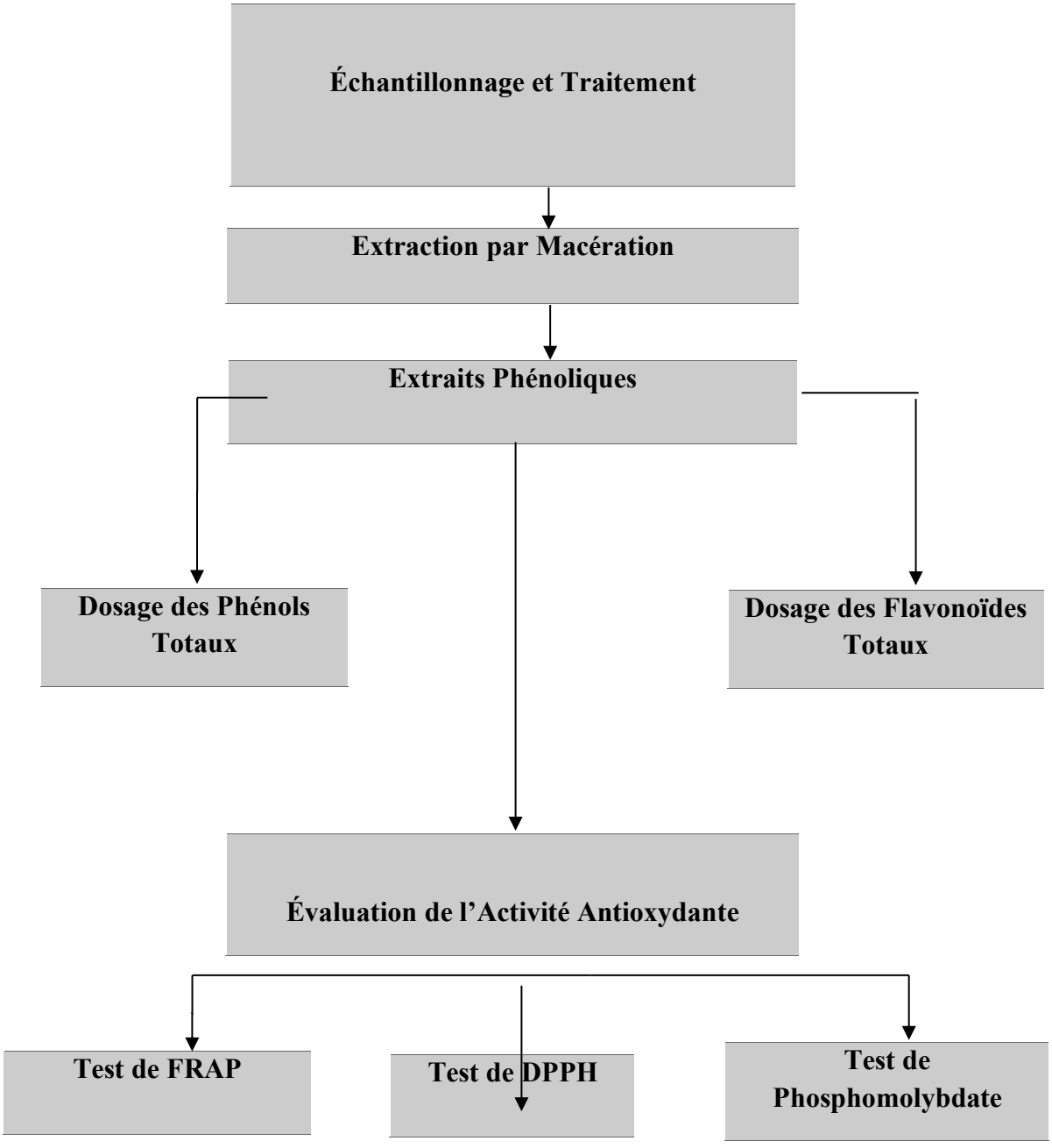


Figure 13 : Organigramme expliquant les différentes étapes dans notre travail

III.2. Produits Chimiques et Instruments

L'ensemble des produits Chimiques Et Instruments utilisé pour réaliser cette étude est résumé dans l**e** Tableau III.1 suivant :

Tableau III.1 : Produits et Instruments

Produit	Marque	Instrument	Marque
Méthanol (CH_3-OH)	**SIGMA-ALDRICH**		
Éthanol (C_2H_6O)	**SIGMA-ALDRICH**	Spectrophotom ètre UV-vis	**SHIMADZU**
Folin-Ciocalteu	**SIGMA-ALDRICH**	Etuve	**Memmert**
Carbonate de sodium (Na_2CO_3)	**SIGMA-ALDRICH**	Balance électrique	**KERNABS**
Hexane (C_6H_{14})	**SIGMA-ALDRICH**	Vortex	**VELP**
Mono molybdate d'ammonium $(NH_4)_2\,MoO_4$	**BIOCHEM**	Moulin à café	**Moulinex**
Acide ascorbique (vitamine C)	**ANALARNORMA PUR**	micropipette	**EASY**
Rutine	**SIGMA-ALDRICH**	Bain-marie	**Memmert**
Chlorure d'aluminium (Al Cl_3)	**MERCK**	Micropipette	**Socorex**
DPPH ($C_{18}H_{12}N_5O_6$)	**ALADRICH**		
Acide sulfurique (H_2SO_4)	**SIGMA-ALDRICH**		
Hexacyanoferrate de potassium (K_3 [Fe(CN)$_6$])	**SIGMA-ALDRICH**		
Acide gallique	**SIGMA-ALDRICH**		
Phosphate mono potassique (KH_2PO_4)	**SIGMA-ALDRICH**		
Phosphate di potassique (K_2HPO_4)	**SIGMA-ALDRICH**		
Chlorure ferrique ($FeCl_3$)	**BIOCHEM**		
Phosphate di sodique (Na_2HPO_4)	**SIGMA-ALDRICH**		
Acide trichloro acétique ($C_2HCl_3O_2$)	**SIGMA-ALDRICH**		

III.3. L'échantillonnage et Traitement

Des échantillons de feuilles de *Haloxylon scoparium* et de *Tamarix aphylla*, ainsi que des graines de *Peganum harmala*, ont été collectés dans la région d'Aflou (wilaya de Laghouat) durant les premières semaines de Janvier 2026.

Après la récolte, les feuilles et les graines ont été séchées à l'ombre pendant une période d'un mois. Elles ont ensuite été broyées à l'aide d'un moulin à café afin d'obtenir une poudre fine. Le produit obtenu a été tamisé puis conservé dans des sacs en papier ou dans des flacons en verre hermétiquement fermés, en vue de leur utilisation ultérieure.

Pour garantir l'exactitude des résultats, nous avons répété les expériences plus de 3 fois afin d'obtenir des résultats plus précis

III.4. L'extraction des Composés Phénoliques

Une quantité de 10 g de poudre a été macérée dans 100 mL de solvant composé de 70 mL d'éthanol et de 30 mL d'eau distillée. L'agitation a été réalisée à température ambiante (20 °C) à l'aide d'un agitateur magnétique pendant 48 heures. Le contenu du flacon a ensuite été filtré. L'extrait obtenu a été conservé dans des flacons en verre ambré, placés à l'abri de la lumière, et stockés au réfrigérateur à +4 °C jusqu'à leur utilisation ultérieure.

III.5. Analyse Quantitative

III.5.1. Dosage des Polyphénols Totaux

La concentration en polyphénols a été déterminée par spectrophotométrie selon la méthode de Folin-Ciocalteau (Singleton, 1999). Ce réactif de couleur jaune est constitué par un mélange d'acide phospho-tungstique et d'acide phosphomolybdique. Lorsque les poly-phénols sont oxydés, ils réduisent le réactif de Folin-Cioclateau en un complexe ayant une couleur bleue constitué d'oxyde de tungstène et de molybdène. L'intensité de la couleur est proportionnelle aux taux des composés phénoliques oxydés (Boizot N., 2006)

On met 100 µl d'extrait ou de l'acide gallique sont mélangés avec 200 µl du réactif Folin-Ciocalteau à 10 % et 2 ml d'eau distille, après 2 min on ajoute 1ml de Na_2CO_3 à 7,5% (m/v). Le mélange est agité et incubé à l'obscurité et à température ambiante pendant 30 minutes et l'absorbance est mesurée à 760 nm par un spectrophotomètre UV-visible. Les résultats sont exprimés en mg équivalent acide gallique par gramme de matière sèche (mg EAG/g MS). En utilisant la courbe d'étalonnage de l'acide gallique comme référence.

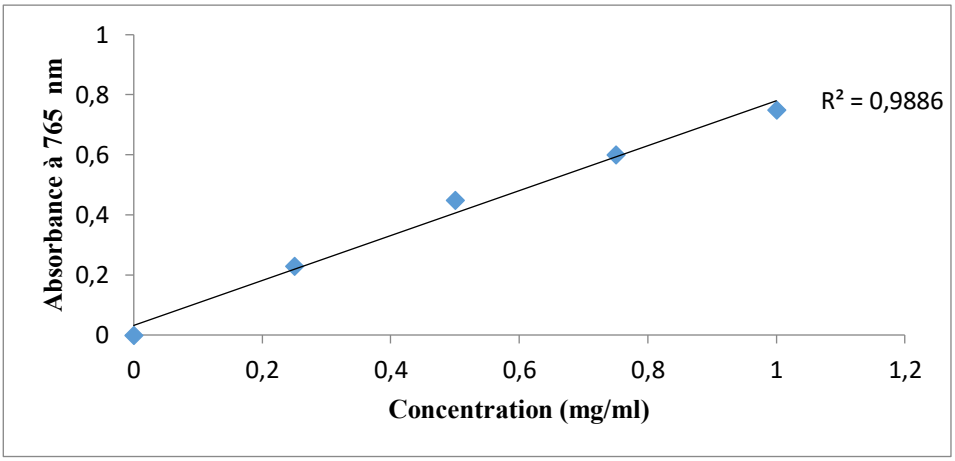


Figure 14 : Courbe d'étalonnage de l'acide gallique

III.5.2. Dosage des Flavonoïdes Totaux

Le dosage des flavonoïdes contenus dans les extraits de *Haloxylon scoparium* et de *Tamarix aphylla*, *Peganum harmala* a été effectué par une méthode basée sur la formation de complexe entre les composés phénoliques et le trichlorure d'aluminium $AlCl_3$ (méthode colorimétrique) (PINKAS, 1996). Les complexes produits sont de couleur jaune absorbent dans le visible à 430nm.

Le flavonoïde utilisé comme référence dans cette méthode est la rutine. On met 1,5 ml d'extrait ou de rutine avec 1,5 ml d'$AlCl_3$ à 3,6 %, puis le mélange est vigoureusement agité, l'absorbance est lue à 430 nm. La quantification des flavonoïdes se fait en fonction d'une courbe d'étalonnage réalisée par un flavonoïde standard rutine , et sont exprimées en milligramme d'équivalent de rutine par gramme de matière sèche (mg ER/g MS).

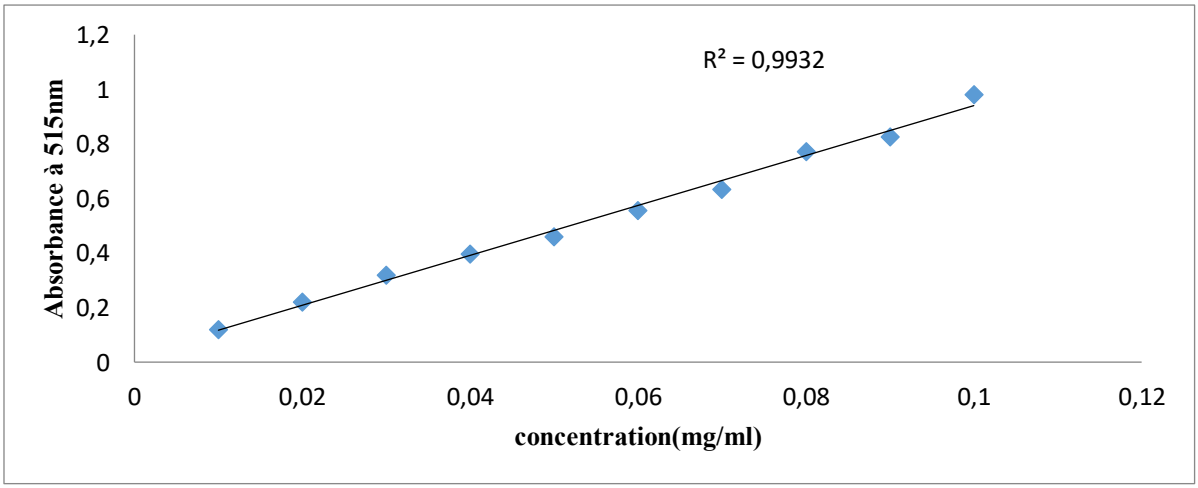


Figure 15: Courbe d'étalonnage de la rutine

III.6. Évaluation de l'Activité Antioxydant

Les méthodes d'évaluation du potentiel antioxydant d'un produit pur ou d'un mélange (l'extrais phénolique) sont nombreuses. Permit lesquelles on a adopté les méthodes : la méthode de DPPH (2,2-diphényle-2-picryl-hydrazyle), et la méthode de phosphomolybdate et la méthode de FRAP (Ferric Reducing Antioxydant Power).

III.6.1. Test de Piégeage du Radical Libre DPPH

a. Principe

Afin d'étudier l'activité anti radicalaire de notre extrait, nous avons utilisé la méthode basée sur le DPPH (diphényle picrylhydrazyl) comme un radical relativement stable, selon le protocole décrit par (Bouhamdi, 2012). Le DPPH est caractérisé par une couleur violète dont l'intensité est mesurée à 517 nm. En présence d'un donneur d'hydrogène. Le DPPH est réduit à la forme non radicalaire de couleur jaune pale (forme d'hydrazine) **(Figure 16)**.

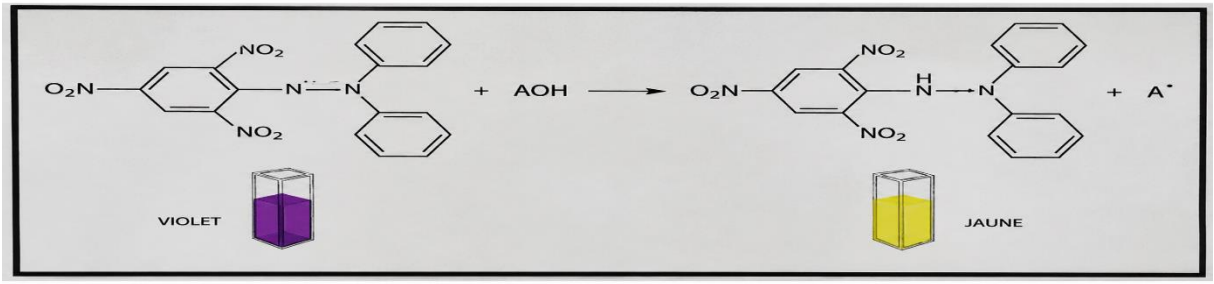


Figure 16 : Mécanisme réactionnel intervenant lors du test DPPH• (Ganther, 1999)

b. Mode opératoire

L'activité du balayage du radical DPPH a été mesurée dans le protocole suivant. Dans des tubes on introduit 200 µl de chaque extrait et 1.8 ml de la solution méthanolique au DPPH, après agitation, les tubes sont placés à l'obscurité à température ambiante pendant 30 minutes. La lecture est effectuée par la mesure de l'absorbance à 517 nm .

c. Expression des résultats

L'activité anti radicalaire est estimée selon l'équation suivante:

Activité anti radicalaire%=[(Abs contrôle-Abs échantillon) /Abs contrôle] x 100

L'étude de la variation de l'activité anti radicalaire en fonction de la concentration des extraits, permet de déterminer la concentration qui correspond à 50% d'inhibition (IC_{50}), une faible valeur de l'IC_{50} correspondant à une grande efficacité de l'extrait.

Le calcul des IC_{50} a été réalisé graphiquement par les régressions linéaires des graphes tracés pourcentages d'inhibition en fonction de différentes concentrations des fractions testées. La valeur de l'IC_{50} est exprimée en mg/ml (3 répétitions pour chaque con- centration).

III.6.2. Test de Phosphomolybdate

a. Principe

La méthode de (Elghozi J.L., 1992) a été employée pour évaluer la capacité réductrice des extraits phénoliques. Cette méthode est basée sur la réduction du molybdène de l'étage d'oxydation (VI) à l'étage d'oxydation (V) en présence de l'antioxydant. Cette réduction, se matérialise par la formation d'un complexe verdâtre à un pH acide détectable dans le visible à 695 nm.

b. Mode opératoire

0,2 ml de chaque extrait dilué est ajouté à 2 ml de la solution de réactif phosphomolybdique contenant le Molybdate d'ammonium (1.483%), phosphate de sodium (0.766%) et l'acide sulfurique (10%) préparé dans l'eau distillée. Le mélange a été placé dans un bain marie à une température 95°C pendant 90 minutes. Après refroidissement à une température ambiante, l'absorbance a été mesuré à 695 nm. Une courbe d'étalonnage a été préparée en utilisant différentes concentrations de la vitamine C ; les résultats sont exprimés comme (mmole de vitamine C par g) et la capacité réductrice exprimés en tant qu'équivalent de la vitamine C.

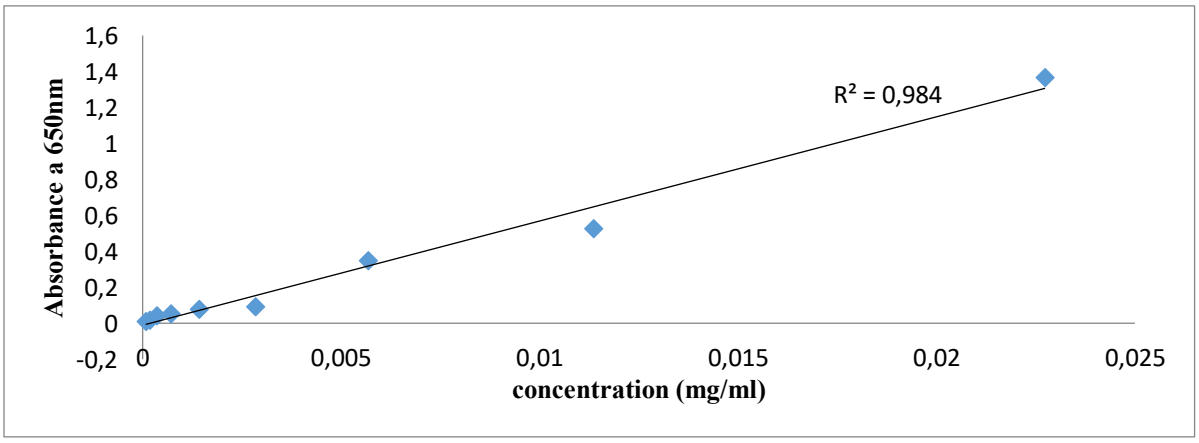


Figure 17 : Courbe d'étalonnage de l'acide ascorbique

III.6.3. Test de FRAP (Ferric Reducing Antioxydant Power)

a. Principe

Les métaux sont en général les meilleurs initiateurs de réactions en chaîne susceptibles de déséquilibrer la balance du stress oxydatif en faveur de pro-oxydants.

Parmi ces métaux, le cation ferrique Fe^{3+} est le plus actif et on le retrouve souvent dans les aliments d'origine végétale ou animale.

Le pouvoir réducteur d'un extrait vis-à-vis du cation ferrique peut être considéré comme un indicateur de son activité antioxydant.

L'activité antioxydant, non enzymatique, d'inhibition de radicaux libres et de la peroxydation lipidique, est généralement contrôlée par des réactions d'oxydoréduction.

La méthode de FRAP peut être une bonne méthode pour investiguer le pouvoir antioxydant d'un extrait en évaluant son pouvoir de réduction du cation ferrique. La capacité totale en antioxydant de chaque extrait de plante est déterminée par la méthode adaptée par (Keim, 1998).

Le dosage consiste à réduire le complexe tripyridyltriazine ferrique [(Fe(III)-TPTZ] de couleur jaune en complexe ferreux [(Fe(II)-TPTZ] de couleur bleu-vert, sous l'action d'un antioxydant par un transfert d'électron **(Figure 18)**.

La variation de la coloration est mesurée 700nm (Bassène, 2012).

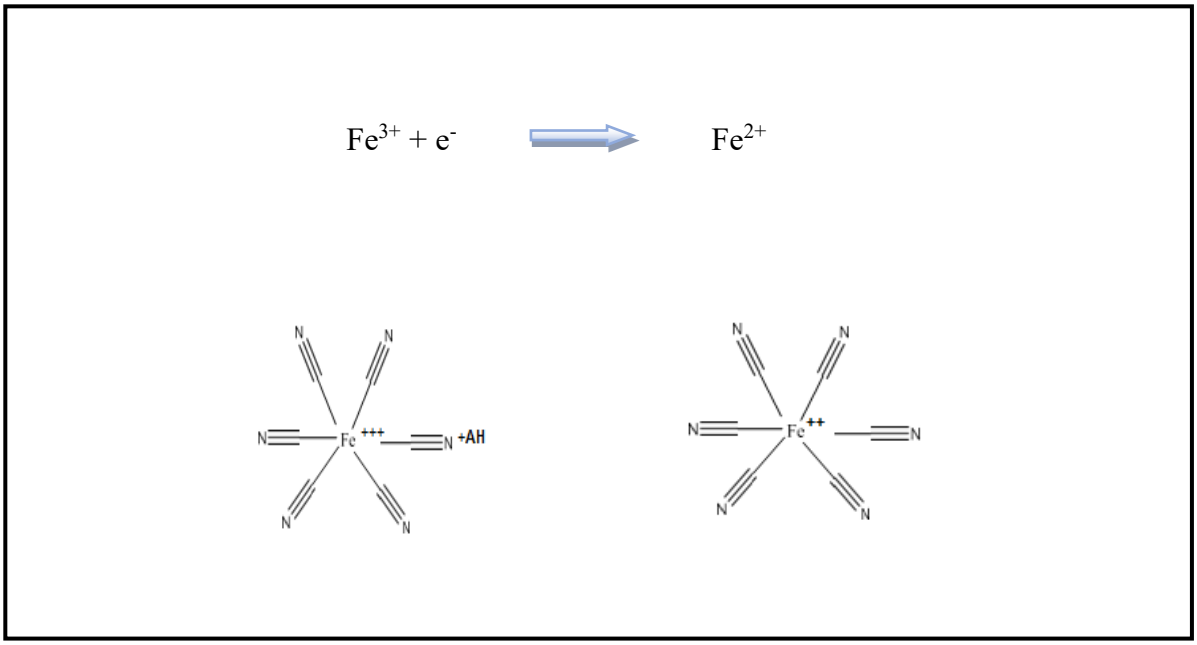


Figure 18 : Réaction d'un antioxydant avec le FRAP (Bassène, 2012)

b. Mode opératoire

Le pouvoir réducteur des extraits est déterminé par la méthode de FRAP (Bassène, 2012). Ainsi, 0,1ml d'échantillon à différentes concentrations est mélangé avec 2 ml de tampon phosphate (0,2 M ; PH=6,6) et 2 ml d'hexacyanoferrate de potassium [$K_3Fe(CN)_6$] à 1%. Après une incubation du mélange à 50 °C pendant 20 minutes, 0,2 ml d'acide trichloracétique 10 % y était ajouté, puis les tubes sont centrifugés à 3000 tours/mn pendant 10 minutes. En suite 2 ml du surnageant de chaque tube est mélangé avec 0,2 ml eau distillé et 0,4 ml d'une solution de $FeCl_3$ à 0,1% et mesurer les absorbances à 700 nm, une courbe d'étalonnage a été préparée en utilisant différentes concentrations de la vitamine C ; les résultats sont exprimés comme (mmole de vitamine C par g) et la capacité réductrice exprimés en tant qu'équivalent de la vitamine C.

Chapitre

IV

Résultats & Discussions



IV.1 Quantification des composés phénoliques :

Les teneurs en composés phénoliques et en flavonoïdes de l'extrait de trois plantes ont été alors calculée à partir des courbes d'étalonnage et exprimée en milligrammes équivalent en acide gallique (EAG) par gramme de la matière sèche pour les phénols totaux et en milligrammes équivalent à la rutine par gramme de la matière sèche pour les flavonoïdes.

IV.1.1. Dosage des polyphénols totaux :

La teneur en composé phénolique de l'extrait a été alors calculée à partir de la courbe d'étalonnage de l'acide gallique. La spectrophotométrie UV/Vis a permis de quantifier le taux des polyphénols totaux présent dans les extraits préparés d'*haloxylon scoparium*, *Peganum harmala* et *Tamarix aphylla*. Le résultat obtenus est représenté sur le **Tableau IV.1**

Tableau IV.1: Teneurs en phénols totaux

Les extraits	Teneurs en phénols totaux (mg EAG/g MS)
Extrait hydroéthanolique d'Haloxylon scoparium	10,127 ± 0,066
Extrait hydroéthanolique de Peganum harmala	7,172± 0,387
Extrait hydroéthanolique de Tamarix aphylla	9,491± 0,642

Les résultats présentés dans le Tableau II.1 montrent que les extraits hydroéthanoliques des trois espèces étudiées présentent des teneurs variables en composés phénoliques totaux. L'extrait de *Haloxylon scoparium* affiche la teneur la plus élevée avec 10,127 ± 0,066 mg EAG/g MS, suivi de *Tamarix aphylla* (9,491 ± 0,642 mg EAG/g MS), tandis que *Peganum harmala* présente la teneur la plus faible (7,172 ± 0,387 mg EAG/g MS). Ces résultats traduisent une richesse modérée en composés phénoliques pour l'ensemble des extraits étudiés.

En comparaison avec la littérature, les valeurs obtenues apparaissent relativement inférieures. En effet, plusieurs études ont rapporté des teneurs significativement plus élevées chez *Haloxylon scoparium*, atteignant des valeurs comprises entre 50 et 70 mg EAG/g MS selon la nature de l'extrait et la partie végétale analysée (Benkherouf et al., 2019). De même, les espèces du genre *Tamarix* sont reconnues pour leur richesse en polyphénols, avec des teneurs souvent supérieures à 20 mg EAG/g MS, comme rapporté chez *Tamarix gallica* et *Tamarix articulata* (Ksouri et al., 2009). Concernant *Peganum harmala*, plusieurs travaux ont indiqué des teneurs

en composés phénoliques variant entre 10 et 40 mg EAG/g MS selon les conditions expérimentales (Saswati et al., 2013). Ainsi, les résultats obtenus dans la présente étude restent globalement inférieurs à ceux décrits dans la littérature.

Ces différences peuvent être attribuées à plusieurs facteurs. Le solvant d'extraction joue un rôle déterminant dans la récupération des composés phénoliques, les solvants polaires tels que le méthanol et l'acétone étant généralement plus efficaces que les mélanges hydroéthanoliques (Dai & Mumper, 2010). Par ailleurs, la variabilité des teneurs peut également être influencée par la partie de la plante utilisée, les conditions écologiques (climat, salinité, stress hydrique), ainsi que par les méthodes d'extraction et de dosage employées, notamment la méthode de Folin-Ciocalteu, connue pour ses interférences possibles (Singleton et al., 1999).

1.2. Teneur en flavonoïdes

Les teneurs en flavonoïdes dans l'extrait phénolique ont été estimées par la méthode d' $AlCl_3$.La spectrophotométrie UV/Vis a permis de quantifier le taux des flavonoïdes présent dans l'extrait préparé d'*haloxylon scoparium* Le résultat obtenu est représenté sur le tableau **IV.2**

Tableau IV.2: Teneurs en flavonoïdes

Les extraits	Teneurs en flavonoïdes (mg ER/g MS)
Extrait hydroéthanolique d'*Haloxylon scoparium*	9,609± 0,310
Extrait hydroéthanolique de *Peganum harmala*	5,544 ± 0,501
Extrait hydroéthanolique de *Tamarix aphylla*	8,861±0,579

Les résultats présentés dans le Tableau II.2 indiquent que les extraits hydroéthanoliques des espèces étudiées contiennent des teneurs variables en flavonoïdes totaux. L'extrait de *Haloxylon scoparium* présente la teneur la plus élevée (9,609 ± 0,310 mg ER/g MS), suivi de *Tamarix aphylla* (8,861 ± 0,579 mg ER/g MS), tandis que *Peganum harmala* affiche la teneur la plus faible (5,544 ± 0,501 mg ER/g MS). Ces résultats révèlent une présence appréciable mais globalement modérée de flavonoïdes dans les extraits analysés.

En comparaison avec la littérature, les teneurs obtenues apparaissent inférieures à celles rapportées dans plusieurs études. En effet, des travaux menés sur *Haloxylon scoparium* ont montré des teneurs en flavonoïdes pouvant dépasser 20 mg ER/g MS selon le solvant et les conditions d'extraction (Benkherouf et al., 2019). De même, chez les espèces du genre *Tamarix*,

notamment *Tamarix gallica* et *Tamarix articulata*, des teneurs plus élevées ont été rapportées, dépassant souvent 15 mg ER/g MS (Ksouri et al., 2009). Concernant *Peganum harmala*, certaines études indiquent des teneurs variables mais généralement comprises entre 8 et 25 mg ER/g MS (Saswati et al., 2013). Ainsi, les valeurs obtenues dans cette étude restent globalement inférieures aux données bibliographiques disponibles.

les teneurs en flavonoïdes mesurées soient modérées, elles confirment que les espèces étudiées constituent une source intéressante de composés flavonoïdiques. Ces résultats suggèrent que l'optimisation des conditions d'extraction et le choix du solvant pourraient permettre d'améliorer significativement le rendement en flavonoïdes, renforçant ainsi le potentiel antioxydant de ces plantes.

IV.2.Evaluation d'activitéanti-oxydante

La mise en évidence du pouvoir antioxydant des extraits des plantes s a été réalisée par trois techniques chimiques le piégeage du radical libre DPPH, le test de FRAP et phosphomolybdate.

IV. 2.1 Le Test De Piégeage du Radical DPPH

Le radical DPPH· est l'un des substrats les plus utilisés généralement pour l'évaluation rapide et directe de l'activité antioxydante en raison de sa stabilité en forme radicale et la simplicité de l'analyse (Bozin et al., 2008).

L'activité antioxydante est déterminée par la diminution de l'absorbance d'une solution alcoolique de DPPH· à 515 nm, qui est du à sa réduction à une forme non radicalaire DPPH-H par les antioxydants (AH) donneurs d'hydrogènes présent dans l'extrait végétal ou par une autre espèce radicalaire comme le montre les équations suivantes (Maisuthisakul et al., 2007, Da Silva Pinto et al., 2008).

Tableau IV.3: Valeurs de l'IC_{50} des extraits dans le test DPPH

Les extraits	IC_{50} (mg/ml)
Extrait hydroéthanolique d'*Haloxylon scoparium*	0,067± 0,0018
Extrait hydroéthanolique de *Peganum harmala*	0,802± 0,127
Extrait hydroéthanolique de *Tamarix aphylla*	0,253±0,031
Acide ascorbique	0.0011±0.005
BHT	0.001269±0.002

Les résultats du test DPPH montrent une variation du pouvoir antioxydant des extraits étudiés. L'extrait hydroéthanolique de *Haloxylon scoparium* présente l'activité antioxydante la plus élevée parmi les plantes testées, avec une valeur d'IC_{50} de 0,067 mg/mL, suivi de *Tamarix aphylla* (0,253 mg/mL), tandis que *Peganum harmala* affiche l'activité la plus faible (0,802 mg/mL).

Toutefois, en comparaison avec les standards antioxydants utilisés, notamment l'acide ascorbique (0,0011 mg/mL) et le BHT (0,001269 mg/mL), les extraits végétaux présentent une activité nettement inférieure. Cela est attendu, car les composés de référence sont des antioxydants purs, alors que les extraits végétaux sont des mélanges complexes de molécules bioactives.

En comparant ces résultats avec la littérature, des études ont montré que *Haloxylon scoparium* peut présenter une activité antioxydante plus importante avec des IC_{50} parfois inférieures à 0,05 mg/mL selon le type d'extraction (Benkherouf et al., 2019). De même, des travaux sur les espèces du genre *Tamarix* ont rapporté des valeurs d'IC_{50} comprises entre 0,1 et 0,3 mg/mL, ce qui est en accord avec les résultats obtenus dans cette étude (Ksouri et al., 2009). Concernant *Peganum harmala*, plusieurs études indiquent une activité antioxydante modérée à faible, avec des IC_{50} souvent supérieures à 0,5 mg/mL, ce qui confirme la faible activité observée dans nos résultats (Saswati et al., 2013).

La différence d'activité antioxydante observée entre les extraits peut être corrélée à leur teneur en composés phénoliques et flavonoïdes.

IV. 2.2 Méthode de la capacité antioxydante totale (Test phosphomolybdate) :

La capacité antioxydante s'exprime par la réduction de l'ion Mo (VI) en Mo (V) , La complexation de ce dernier avec le phosphate abouti à une couleur verte dont l'intensité est proportionnelle à la concentration de l'extrait Prasad et al. (2009)**.** L'activité antioxydante est mesurée selon un nouveau terme appelé VCEAC (vitamine C Equivalent Antioxidant Capacité). On définit le VCEAC comme la concentration molaire de la solution de vitamine C qui possède un pouvoir réducteur équivalent à solution de concentration 1 M de composé étudié. L'évolution de l'activité antioxydante de nos extraits sont comparée par rapport à l'acide ascorbique (vitamine C) et cela en traçant une courbe d'étalonnage de ce dernier

Le paramètre VCEAC, plus la valeur de VCEAC est important, plus le pouvoir antioxydant des extraits est important. La valeur de VCEAC calculé pour les extraits sont regroupées dans le Tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Les valeurs VCEAC des extraits étudiés par le test du Phosphomolybdate

Les extraits	VCEAC(M)
Extrait hydroéthanolique *d'Haloxylon scoparium*	0,063±0,001
Extrait hydroéthanolique de *Peganum harmala*	0,042± 0,0004
Extrait hydroéthanolique de *Tamarix aphylla*	0,022±0,001

Les résultats présentés dans le Tableau II.4 montrent que l'activité antioxydante totale, exprimée en VCEAC, varie significativement selon les extraits étudiés. L'extrait hydroéthanolique de *Haloxylon scoparium* présente la valeur la plus élevée (0,063 ± 0,001 M), suivi de *Peganum harmala* (0,042 ± 0,0004 M), tandis que *Tamarix aphylla* affiche la plus faible activité (0,022 ± 0,001 M). Cette hiérarchie suggère une capacité réductrice plus importante de *Haloxylon scoparium*, ce qui pourrait être lié à une richesse plus élevée en composés phénoliques .

L'extrait de *Haloxylon scoparium* (0,063 ± 0,001 M) présente une activité relativement élevée, comparable à celle observée chez des plantes riches en polyphénols, dont les valeurs peuvent atteindre ou dépasser 0,05 M, comme cela a été rapporté pour plusieurs espèces méditerranéennes (Prieto et al., 1999 ; Amensour et al., 2010). Cette forte activité est généralement attribuée à une teneur élevée en composés phénoliques et flavonoïdes, connus pour leur pouvoir réducteur.

L'extrait de *Peganum harmala* (0,042 ± 0,0004 M) montre une activité intermédiaire, en accord avec les données de la littérature où cette espèce présente des capacités antioxydantes modérées, souvent situées dans des gammes équivalentes selon les méthodes utilisées, notamment entre 0,03 et 0,05 M en équivalent antioxydant total (Dastan et al., 2012 ; Moloudizargari et al., 2013).

En revanche, *Tamarix aphylla* présente la plus faible activité (0,022 ± 0,001 M), ce qui correspond aux valeurs rapportées pour des plantes à activité antioxydante faible à modérée,

souvent inférieures à 0,03 M (Ksouri et al., 2008 ; Falleh et al., 2011). Cette faible capacité réductrice peut être expliquée par une teneur plus limitée en composés phénoliques ou par une efficacité moindre de ces composés dans le système du phosphomolybdate.

Dans l'ensemble, ces résultats sont cohérents avec les études antérieures qui montrent que l'activité antioxydante mesurée par le test du phosphomolybdate dépend fortement de la richesse en polyphénols , confirmant le potentiel antioxydant élevé de *Haloxylon scoparium*, intermédiaire de *Peganum harmala* et plus faible de *Tamarix aphylla*.

IV.2.3. Pouvoir réducteur du fer (Test de FRAP)

L'activité antioxydante des extraits a été évaluée en utilisant la méthode FRAP. Cette dernière est un essai simple, rapide et reproductible. Il est universel peut être appliqué aussi bien chez les plantes que les plasmas et dans les extraits organiques et aqueux (Li et *al*, 2008).

Tableau IV.5 : Valeurs de la capacité antioxydante (VCEAC) des extraits étudiés déterminées par le test FRAP

Les extraits	VCEAC(M)
Extrait hydroéthanolique d'*Haloxylon scoparium*	0,039± 0,018
Extrait hydroéthanolique de *Peganum harmala*	0,111 ± 0,005
Extrait hydroéthanolique de *Tamarix aphylla*	0,035±0,006

Les résultats du test FRAP montrent une variation notable de la capacité antioxydante des extraits étudiés. L'extrait hydroéthanolique de *Peganum harmala* présente la valeur la plus élevée (0,111 ± 0,005 M), suivi de *Haloxylon scoparium* (0,039 ± 0,018 M) et de *Tamarix aphylla* (0,035 ± 0,006 M), qui affichent des activités relativement proches.

Ces résultats indiquent que *Peganum harmala* possède un pouvoir réducteur nettement supérieur dans le système FRAP, ce qui suggère une plus grande capacité à réduire le fer ferrique (Fe^{3+}) en fer ferreux (Fe^{2+}). Cette activité élevée peut être attribuée à la richesse de cette plante en composés bioactifs.

Concernant *Peganum harmala*, plusieurs études ont rapporté des valeurs élevées de pouvoir réducteur. Par exemple, Dastan et al. (2012) ont montré que les extraits méthanoliques de cette plante présentent des valeurs FRAP élevées, équivalentes à environ 0,09–0,12 M, selon la concentration et les conditions expérimentales. De même, Moloudizargari et al. (2013) ont confirmé que cette espèce possède une forte capacité antioxydante liée à sa richesse en alcaloïdes et composés phénoliques. Ainsi, la valeur obtenue dans notre étude (0,111 M) est en excellent accord avec ces résultats, confirmant le fort potentiel antioxydant de cette plante.

Pour *Haloxylon scoparium*, les études sont plus limitées, mais certaines recherches indiquent une activité antioxydante modérée. Des travaux réalisés sur cette espèce montrent des valeurs FRAP relativement faibles à moyennes, souvent comprises entre 0,03 et 0,06 M, en fonction du type d'extraction. La valeur obtenue dans notre étude (0,039 M) s'inscrit donc parfaitement dans cette gamme, confirmant une activité antioxydante modérée.

En ce qui concerne *Tamarix aphylla*, plusieurs études ont rapporté une activité antioxydante généralement plus faible. Par exemple, Ksouri et al. (2008) et Falleh et al. (2011), travaillant sur des espèces du genre *Tamarix*, ont observé des valeurs FRAP généralement inférieures à 0,05 M, ce qui correspond aux résultats obtenus dans notre étude (0,035 M). Cette faible activité est souvent attribuée à une teneur plus limitée en composés phénoliques ou à une efficacité moindre dans la réduction du fer.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Cette étude a permis d'évaluer la teneur en composés phénoliques et flavonoïdes ainsi que l'activité antioxydante de trois extraits hydroéthanoliques de *Haloxylon scoparium*, *Peganum harmala* et *Tamarix aphylla*. Les résultats de la quantification montrent la présence de quantités variables de métabolites secondaires, avec des teneurs globalement modérées pour l'ensemble des espèces étudiées.

L'évaluation de l'activité antioxydante par les différents tests (DPPH, FRAP et phosphomolybdate) a mis en évidence des comportements différents selon les méthodes utilisées. *Haloxylon scoparium* présente une activité plus marquée dans les tests DPPH et phosphomolybdate, tandis que *Peganum harmala* se distingue par une forte capacité réductrice dans le test FRAP. *Tamarix aphylla*, quant à elle, montre une activité globalement plus faible comparativement aux deux autres espèces.

La comparaison des résultats entre les différentes méthodes confirme que l'activité antioxydante dépend fortement du mécanisme d'action évalué ainsi que de la composition chimique des extraits, notamment leur richesse en composés phénoliques et flavonoïdes. Les différences observées peuvent également être attribuées aux conditions d'extraction et aux caractéristiques écologiques des espèces étudiées.

En conclusion, *Haloxylon scoparium* et *Peganum harmala* se distinguent comme des sources intéressantes de composés antioxydants naturels, tandis que *Tamarix aphylla* présente un potentiel plus modéré. Ces résultats suggèrent l'intérêt de ces plantes pour des applications potentielles dans les domaines pharmaceutique et alimentaire, tout en soulignant la nécessité d'études complémentaires pour l'identification des composés actifs et l'optimisation des procédés d'extraction.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques :

- Amensour, M., Sendra, E., Abrini, J., Pérez-Alvarez, J. A., & Fernández-López, J. (2010).
- APG IV (2016). Une mise à jour de la classification du groupe de phylogénie des angiospermes. Botanical Journal of the Linnean Society, 181(1), pp.1–20.
- Bach, N. N. (2020). Les antioxydants et leurs bienfaits. Max de Génie.
- Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. Food Chemistry, 99(1), 191–203.
- Benarba, B., Meddah, B., & Tir Touil, A. (2015). Phytochemical composition and antioxidant activity of Haloxylon scoparium extracts. Journal of Natural Products Research (article sur activités antioxydantes des extraits halophytes algériens).
- Benkherouf, A., et al. (2019). Phytochemical analysis and antioxidant activity of Haloxylon scoparium extracts. Journal of King Saud University – Science, 31(4), 1040–1045.
- Boizot, N., & Charpentier, J.-P. (2006). Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. Cahiers des Techniques de l'INRA, pp.79–82.
- Bouaziz, M., et al. (2008). Antioxidant properties of extracts from Haloxylon species.
- Boudjelal, A., Henchiri, C., Siracusa, L., Sari, M. et Ruberto, G. (2013). Herboristes et plantes médicinales sauvages à M'Sila (Nord Algérie) . Journal d'Ethnopharmacologie, 148(2), pp.395-402.
- Boukef, M.K. (1986). Les plantes dans la médecine traditionnelle tunisienne. Tunis: Agence de Coopération Culturelle et Technique.
- Bretagne Sport Santé (2022). Activité physique et stress oxydatif. https://bretagne-sport-sante.fr
- Breton, J. (2019). Antioxydants et santé. Laboratoire Lescuyer.
- Bruneton, J. (2009). Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales (4e éd.). Paris : Tec & Doc – Lavoisie
- Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant phenolics: extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. Molecules, 15(10), 7313–7352.
- Dastan, D., Salehi, P., & Maroofi, H. (2012). Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of Peganum harmala. Journal of Medicinal Plants Research, 6(8), 1482–1488.
- Falleh, H., Ksouri, R., Chaieb, K., et al. (2011). Phenolic composition and antioxidant activities of halophyte species. Comptes Rendus Biologies, 334(5–6), 405–413.

Références bibliographiques

- Flowers, T.J. & Colmer, T.D. (2008). Tolérance à la salinité chez les halophytes. New Phytologist, 179(4), pp.945–963.
- Food Chemistry, 108(3), 1117–1125.
- Food Chemistry, 123(4), 1097–1103.
- Halliwell, B., & Gutteridge, J. M. C. (2015). Free Radicals in Biology and Medicine (5th ed.). Oxford University Press.
- Katalinic, V., Milos, M., Kulisic, T., & Jukic, M. (2006). Screening of 70 medicinal plant extracts for antioxidant capacity and total phenols. Food Chemistry, 94(4)
- Ksouri, R., et al. (2009). Medicinal halophytes: potent source of health promoting biomolecules with medical, nutraceutical and food applications. Critical Reviews in Biotechnology, 29(4), 1–17.
- Ksouri, R., Megdiche, W., Falleh, H., Trabelsi, N., Boulaaba, M., Smaoui, A. & Abdelly, C. (2008). Influence des facteurs biologiques, environnementaux et techniques sur la teneur en composés phénoliques et les activités antioxydantes. Food Chemistry, 108(2), pp.100–107.
- Labbani, A. (2021). Étude des composés phénoliques et activité antioxydante.
- Latino-Martel, P. (2017). Antioxydants et prévention des maladies.
- Le Houérou, H.N. (1992). Le rôle des arbustes et des arbres dans la lutte contre la désertification. Arid Soil Research and Rehabilitation, 6(1), pp.1–20.
- Li, L., Wang, Y. et Zhang, H. (2024). Peganum harmala L. : botanique, phytochimie, pharmacologie et toxicité . Comb Chem High Throughput Screening, 27, pp. 1–15.
- Maataoui, H., Hmyene, A., & Hilali, S. (2006). Étude des composés phénoliques et leurs propriétés biologiques.
- Master, FT, Callaway, RM, Valladares, F & Lortie, CJ (2009). Affinement de l'hypothèse du gradient de stress . Journal of Ecology, 97(2), pp.199–205.
- Matkowski, A. (2008). Composés phénoliques végétaux et leur activité antioxydante.
- Moloudizargari, M., Mikaili, P., Aghajanshakeri, S., Asghari, M. & Shayegh, J. (2013). Effets pharmacologiques et thérapeutiques de Peganum harmala et de ses principaux alcaloïdes . Pharmacognosy Reviews, 7(14), pp.199–212.
- Ozenda, P. (2004). Flore et végétation du Sahara. Paris: CNRS Éditions.
- Prasad K. N. V., B. Yang, X. Dong, G. Jiang, & Y. Jiang (2009). Flavonoid contents and antioxidant activities from Cinnamomum species. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 10(4), 627–632.

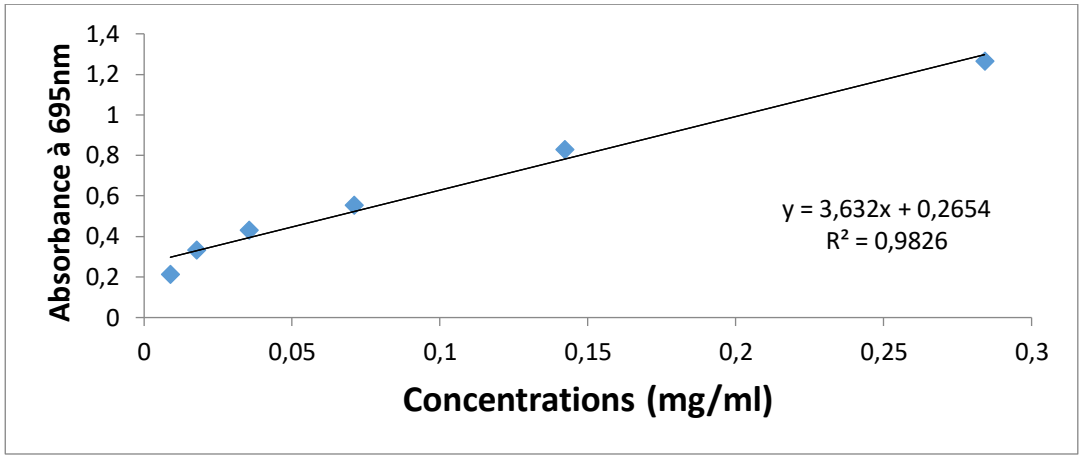
Références bibliographiques

- Prieto, P., Pineda, M., & Aguilar, M. (1999). Spectrophotometric quantitation of antioxidant capacity through the formation of a phosphomolybdenum complex: specific application to the determination of vitamin E. Analytical Biochemistry, 269(2), 337–341.
- Quézel, P. & Santa, S. (1963). Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Paris: CNRS.
- Ralph, J. (2006). Biochimie des composés phénoliques. Springer.
- Rice-Evans, C.A., Miller, N.J. & Paganga, G. (1997). Propriétés antioxydantes des composés phénoliques. Trends in Plant Science, 2(4), pp.152–159.
- Rossi, S.V. (1965). Colorimétrie des phénols totaux avec des réactifs phosphomolybdiques-
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects. Journal of Functional Foods, 18, 820–897.
- Saswati, B., et al. (2013). Phytochemical screening and antioxidant activity of Peganum harmala seeds. International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research, 21(1), 1–5.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates by Folin-Ciocalteu reagent. Methods in Enzymology, 299, 152–178.
- Sobhani, Z., et al. (2024). Caractérisation phytochimique et activité antioxydante des graines de Peganum harmala . Phytochemistry Letters, 58, pp.45–53.
- Total phenolic content and antioxidant activity of Mediterranean aromatic plants.
- Valko, M., Leibfritz, D., Moncol, J., Cronin, M. T. D., Mazur, M., & Telser, J. (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. The International Journal of Biochemistry & Cell Biology, 39(1), 44–84.
- World Health Organization (WHO). (2013). WHO Traditional Medicine Strategy 2014–2023. Geneva: World Health Organization.
- Zeng, X., Wang, H. et Wang, Y. (2018). Activités biologiques et phytochimie des espèces de Peganum . Phytochemistry Reviews, 17, pp. 1–19.

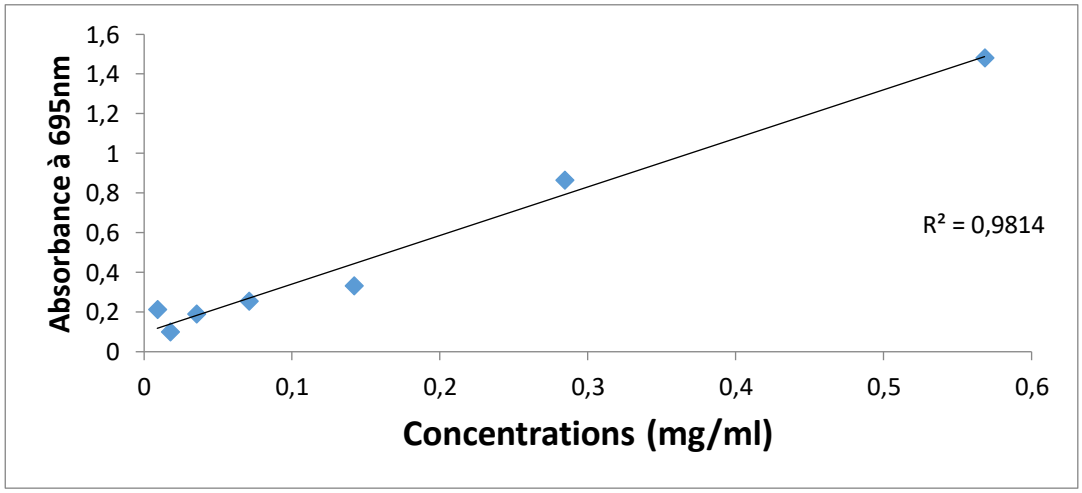
Annexes

Annexe1 : Test phosphomolybdate

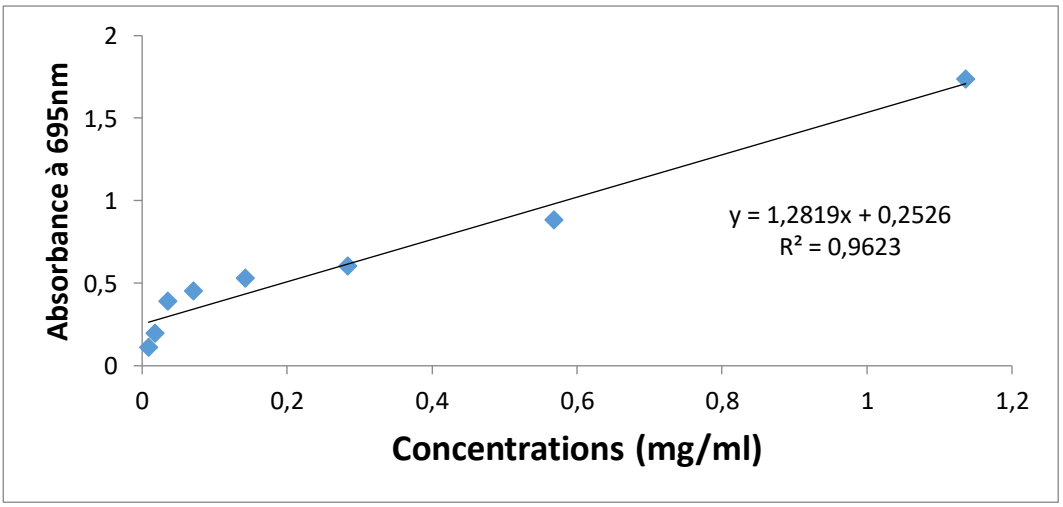
Extrait hydroéthanolique d'*Haloxylon scoparium*



Extrait hydroéthanolique de *Peganum harmala*

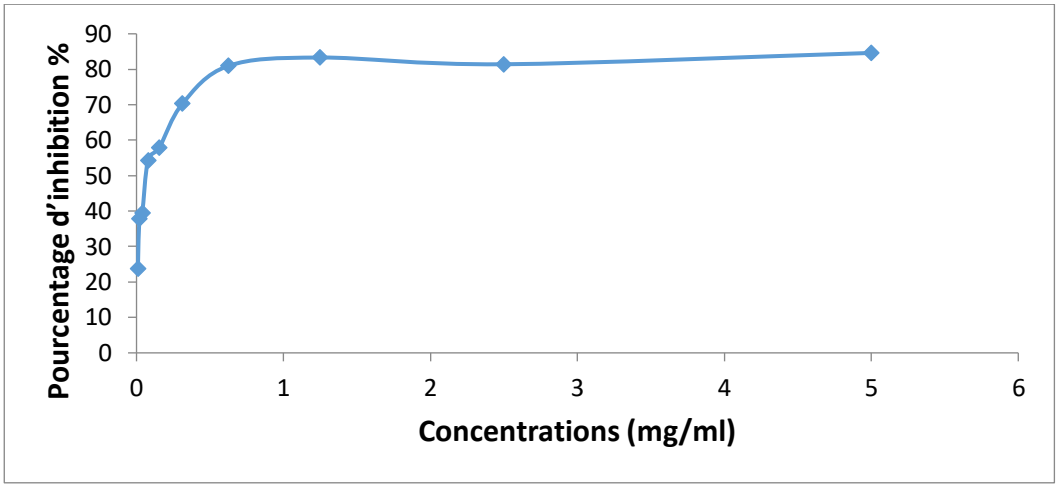


Extrait hydroéthanolique de *Tamarix aphylla*

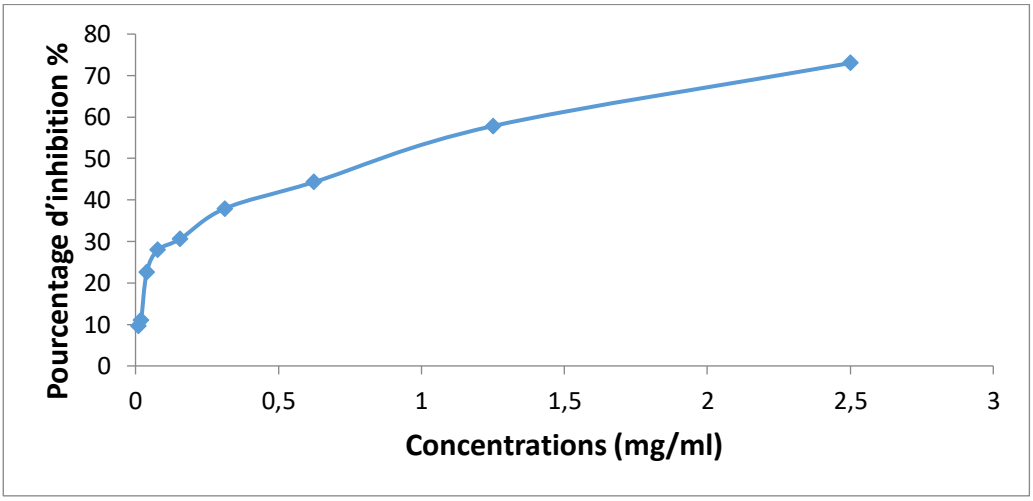


Annexe 2 : Test de DPPH

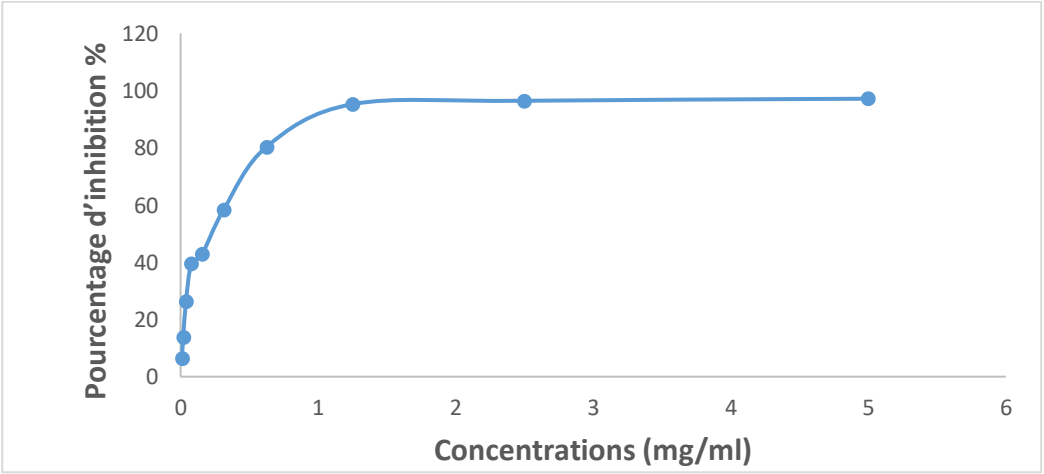
Extrait hydroéthanolique d'*Haloxylon scoparium*



Extrait hydroéthanolique de *Peganum harmala*

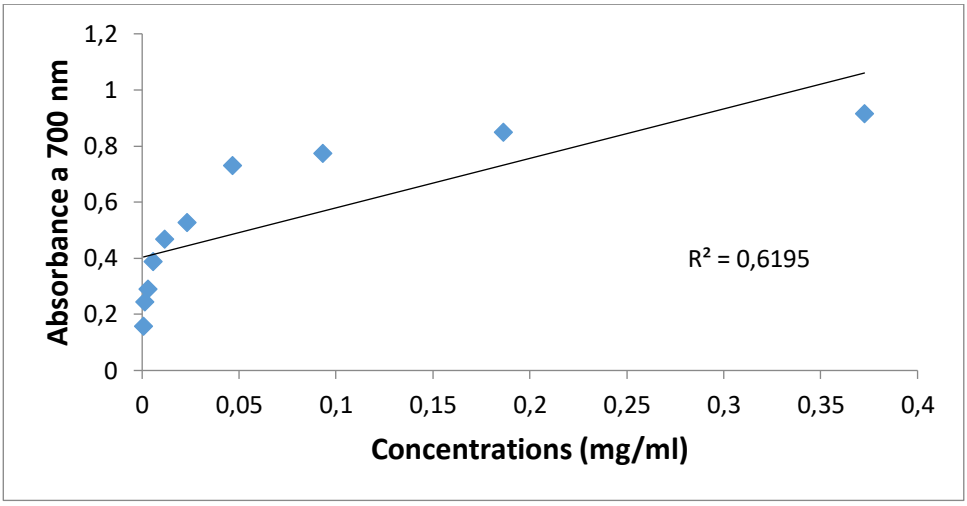


Extrait hydroéthanolique de *Tamarix aphylla*

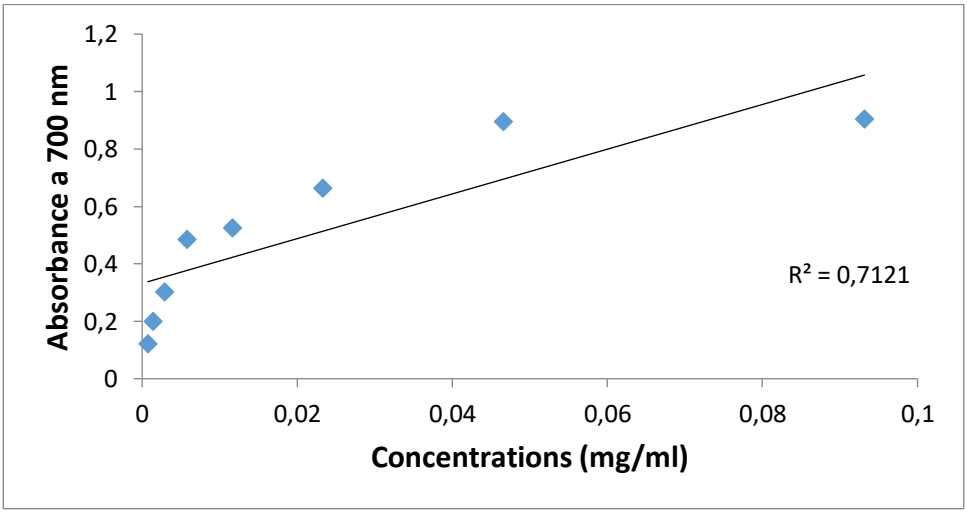


Annexe 3 : Test de FRAP (Ferric Reducing antioxydant Power)

Extrait hydroéthanolique d'*Haloxylon scoparium*



Extrait hydroéthanolique de *Peganum harmala*



Extrait hydroéthanolique de *Tamarix aphylla*

