



République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

Faculté Des Sciences de La Nature et de La Vie

Département de Biologie



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN BIOLOGIE

Spécialité : Alimentation nutrition et pathologie

Par

MILOUDI Radja

**Thème : Étude de l'activité antioxydante de l'extrait
méthanolique des feuilles de *Brassica rapa* L.**

Soutenue le 23 juin 2026 devant le jury composé de :

Président	CHAALEL Abdelmalek	PR	Université de Mostaganem
Encadreur	BOUKEZZOULA Nawal	MCA	Université de Mostaganem
Examineur	ALACHAHER Fatima Zohra	MCB	Université de Mostaganem
Co-encadreur	ARIDJ TALEB	Doctorant	Université de Mostaganem

Réalisé au laboratoire des microorganismes bénéfiques, aliments fonctionnels et santé (LMBAFS)

Année Universitaire : 2025/2026



REMERCIEMENTS

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

J'adresse mes plus sincères remerciements à mon encadreur, **Dr Boukezzoula Nawal**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa patience, son soutien constant et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mon co-encadreur **Mr ARIDJ Taleb** pour son aide, ses orientations et ses remarques constructives qui ont contribué à l'amélioration de ce travail.

Je remercie sincèrement les membres du jury de m'avoir fait l'honneur de participer à l'évaluation de ce modeste travail. J'adresse mes remerciements particuliers au Président du jury **Pr CHAALEL Abdelmalek** directeur du laboratoire LMBAFS pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et pour avoir accepté de présider cette soutenance, ainsi qu'à l'Examinatrice **Dr ALACHAHER Fatima Zohra** pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et d'apporter ses précieuses remarques.

J'exprime ma profonde gratitude à tous les enseignants du département de Biologie de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem pour les connaissances qu'ils m'ont transmises tout au long de mon parcours universitaire.

Je remercie également l'ensemble du personnel des laboratoires pour leur disponibilité, leur aide et les moyens mis à ma disposition durant la réalisation de cette étude.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille, mes amis ainsi que toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail.

À tous, j'adresse mes plus sincères remerciements.



DÉDICACE

C'est avec une immense fierté et une profonde gratitude que je dédie ce modeste travail à mes chers parents, pour leur patience, leurs sacrifices et leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours.

*À mon père, **MILOUDI Mohamed**, qui m'a toujours encouragée et entourée de son soutien afin que rien ne puisse entraver la poursuite de mes études.*

*À ma mère, **AMEUR Nadia**, qui m'a comblée d'amour, de tendresse et d'attention, et qui n'a jamais cessé de croire en ma réussite.*

*À ma chère grand-mère, **Fatma**, pour son affection et ses prières.*

À mes chères tantes et à tous mes oncles, pour leur soutien et leurs encouragements.

*Je dédie également ce travail à mes chers et adorables frères, **Islam et Amour**, ainsi qu'à ma belle-sœur **Amina**, qui ont toujours été présents à mes côtés dans les moments les plus difficiles et m'ont constamment encouragée à aller de l'avant.*

À mes cousins et cousines :

Douaa, Salma, Lina, Kaouther, Aya, Yasmine, Salsabil, Rayane, Tamer, Abdelhadi, Sara, Abir, Ilyes, Chaima, Walid, Meriem, Mohamed, Aymen, Ghofrane et Ahmed.

Enfin, à mes chères amies :

***Wissal, Houaria, Ismahane, Hafssa, Feryal, Yasmine, Kheira, Lina et Fatima**, pour leur amitié sincère, leur présence et les précieux moments partagés.*

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ma réussite, je témoigne ma profonde reconnaissance.

Avec tout mon amour et ma gratitude.



Résumé

Le stress oxydatif est impliqué dans l'apparition de nombreuses maladies en raison de la production excessive de radicaux libres. Dans ce contexte, la recherche de sources naturelles d'antioxydants représente un axe important dans le domaine de la santé et de la valorisation des ressources végétales.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'activité antioxydante de l'extrait méthanolique des feuilles de *Brassica rapa* L. à travers le test de piégeage du radical libre DPPH.

Les résultats obtenus ont montré un rendement d'extraction de 15,23 %. L'étude de l'activité antioxydante a révélé une capacité de neutralisation des radicaux libres avec un pourcentage maximal d'inhibition de 79,08 %. La valeur de l'IC₅₀ de l'extrait a été estimée à 46,65 mg/mL, tandis que l'acide ascorbique utilisé comme référence a présenté une IC₅₀ de 6,41 mg/mL, indiquant une activité antioxydante plus élevée.

Ces résultats mettent en évidence la présence de composés bioactifs capables d'exercer une activité antioxydante intéressante. Ainsi, *Brassica rapa* L. pourrait constituer une source naturelle prometteuse d'antioxydants et représenter un potentiel d'application dans les domaines alimentaire, nutraceutique et pharmaceutique.

Mots-clés

Brassica rapa L., — Activité antioxydante —DPPH, IC₅₀, Extrait méthanolique, Radicaux libres, Stress oxydatif.

ABSTRACT

Oxidative stress is involved in the development of many diseases due to the excessive production of free radicals. Therefore, the search for natural sources of antioxidants has become an important field of research in health and plant resource valorization.

The aim of this study was to evaluate the antioxidant activity of the methanolic extract of *Brassica rapa* L. leaves using the DPPH free radical scavenging assay.

The extraction process yielded 15.23%. The antioxidant activity study revealed a free radical scavenging capacity with a maximum inhibition percentage of 79.08%. The IC₅₀ value of the extract was estimated at 46.65 mg/mL, whereas ascorbic acid used as a reference standard exhibited an IC₅₀ value of 6.41 mg/mL, indicating a stronger antioxidant activity.

These findings demonstrate the presence of bioactive compounds with antioxidant potential in *Brassica rapa* L. Therefore, this plant may represent a promising natural source of antioxidants with potential applications in food, nutraceutical and pharmaceutical fields.

Keywords: *Brassica rapa* L. — antioxidant activity — DPPH assay — IC₅₀ — oxidative stress — free radicals — bioactive compounds.

ملخص

يُعدّ الإجهاد التأكسدي من العوامل المساهمة في ظهور العديد من الأمراض نتيجة الإفراط في إنتاج الجذور الحرة. وفي هذا السياق، يُمثّل البحث عن مصادر طبيعية لمضادات الأكسدة محورًا مهمًا في مجال الصحة وتثمين الموارد النباتية. يهدف هذا العمل إلى تقييم النشاط المضاد للأكسدة للمستخلص الميثانولي لأوراق نبات *Brassica rapa* L. باستعمال اختبار النقاط الجذر الحر DPPH. أظهرت النتائج المتحصل عليها مردود استخلاص قدره 15.23%. كما كشفت دراسة النشاط المضاد للأكسدة عن قدرة على معادلة الجذور الحرة بنسبة تثبيط قصوى بلغت 79.08%. وقد قُدّرت قيمة IC_{50} للمستخلص بـ 46.65 ملغ/مل، في حين أظهر حمض الأسكوربيك المستعمل كمادة مرجعية قيمة IC_{50} قدرها 6.41 ملغ/مل، مما يدل على امتلاكه نشاطًا مضادًا للأكسدة أعلى. تُبرز هذه النتائج وجود مركبات حيوية فعالة قادرة على إظهار نشاط مضاد للأكسدة واعد. وعليه، يمكن أن يُشكّل نبات *Brassica rapa* L مصدرًا طبيعيًا واعدًا لمضادات الأكسدة، كما يمتلك إمكانات تطبيقية في المجالات الغذائية والتغذية والصيدلانية.

الكلمات المفتاحية: *Brassica rapa* L ، النشاط المضاد للأكسدة، DPPH ، IC_{50} ، المستخلص الميثانولي، الجذور الحرة، الإجهاد التأكسدي.

SOMMAIRE

.....	ii
REMERCIEMENTS	ii
DÉDICACE	iii
Résumé	iv
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x
Liste des abréviations	xi
INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE I Revue Bibliographique	4
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS ET HISTORIQUE DE BRASSICA RAPA	5
I. Généralités	6
I.1. L'origine et répartition géographique	7
I.2. Principales variétés de navet :	7
I.3. Classification botanique du navet	9
I.4. Description botanique du navet :	9
I.5. Besoin culturaux :	11
I.6. Composition chimique de Navet :	12
I.7. La valeur nutritionnelle :	12
I.8. Application dans la médecine traditionnelle et la pharmacologie :	13
I.9. Données toxicologiques	14
CHAPITRE II : ANTIOXYDANTS ET ACTIVITÉ ANTIOXYDANTE	15
PARTIE II	40
ETUDE	40
EXPERIMENTAL	40
CHAPITRE I MATERIEL ET METHODES	41
I. Matériel	42
I.1. Matériel végétal	42
I.2. Réactifs chimiques et solvants	43
I.3. Appareils utilisés (Figure 17)	43
II. Méthode	45
II.1. Broyage	45
II.2. Choix du solvant	45
II.3. Préparation du matériel végétal	45
III.3. Rendements des extraits	46
CHAPITRE II RESULTATS ET DISCUSSIONS	52

I. Résultats.....	53
II. Résultats d'activité antioxydant par DPPH.....	54
CONCLUSION.....	58
<i>LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :</i>	60

Liste des figures

Figure 01 : Variétés locales de navets.

Figure 02 : Différentes parties du navet (*Brassica rapa L.*).

Figure 03 : Formation des radicaux libres.

Figure 04 : Lésions de l'ADN induites par les radicaux libres.

Figure 05 : Modifications des protéines après attaque radicalaire.

Figure 06 : Processus de peroxydation lipidique.

Figure 07 : Balance entre radicaux libres et antioxydants.

Figure 08 : Effets biologiques des polyphénols.

Figure 09 : Classification simplifiée des composés phénoliques.

Figure 10 : Structure des acides phénoliques.

Figure 11 : Structure générale des flavonoïdes.

Figure 12 : Schéma du radical libre DPPH.

Figure 13 : Étapes de préparation de l'extrait méthanolique.

Figure 14 : Courbe d'étalonnage de l'acide ascorbique.

Figure 15 : Activité antioxydante de l'extrait de *Brassica rapa L.*

Liste des tableaux

Tableau 01 : Classification botanique de *Brassica rapa L.*

Tableau 02 : Exigences pédoclimatiques de la culture du navet.

Tableau 03 : Principaux constituants chimiques du navet.

Tableau 04 : Espèces réactives de l'oxygène.

Tableau 05 : Principales sources des ROS.

Tableau 06 : Rendement d'extraction des feuilles de *Brassica rapa L.*

Tableau 07 : Absorbances obtenues pour le test DPPH.

Tableau 08 : Pourcentage d'inhibition du radical DPPH.

Tableau 09 : Valeurs de l'IC₅₀ de l'extrait méthanolique et de l'acide ascorbique.

Tableau 10 : Comparaison des résultats avec des études antérieures.

Liste des abréviations

DPPH : 2,2-Diphényl-1-picrylhydrazyle

IC₅₀ : Concentration inhibitrice à 50 %

ROS : Reactive Oxygen Species

ERO : Espèces Réactives de l'Oxygène

ERN : Espèces Réactives de l'Azote

ERS : Espèces Réactives du Soufre

ADN : Acide Désoxyribonucléique

SOD : Superoxyde Dismutase

CAT : Catalase

GPx : Glutathion Peroxydase

GSH : Glutathion Réduit

GSSG : Glutathion Oxydé

H₂O₂ : Peroxyde d'Hydrogène

OH• : Radical Hydroxyle

O₂•⁻ : Anion Superoxyde

FRAP : Ferric Reducing Antioxidant Power

ABTS : Acide 2,2'-azinobis-(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)

UV : Ultraviolet

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les plantes constituent depuis toujours une source importante de substances bioactives utilisées dans l'alimentation, la médecine traditionnelle et l'industrie pharmaceutique. Au cours des dernières décennies, l'intérêt porté aux ressources végétales s'est considérablement accru en raison de leur richesse en métabolites secondaires dotés de nombreuses propriétés biologiques, notamment les activités antioxydantes, anti-inflammatoires, antimicrobiennes et anticancéreuses (**Cartea et al., 2011**). Ces composés naturels représentent aujourd'hui une alternative prometteuse aux substances synthétiques utilisées dans divers domaines de la santé et de l'alimentation.

Parmi les espèces végétales d'intérêt nutritionnel et thérapeutique, le navet (*Brassica rapa* L.), appartenant à la famille des *Brassicaceae*, occupe une place importante. Cette espèce est largement cultivée et consommée dans de nombreuses régions du monde en raison de sa valeur nutritive élevée. En plus de sa richesse en vitamines, minéraux et fibres alimentaires, *Brassica rapa* renferme divers composés bioactifs tels que les polyphénols, les flavonoïdes, les glucosinolates et les vitamines antioxydantes, reconnus pour leurs effets bénéfiques sur la santé humaine (**Cartea et al., 2011 ; Zhang et Hamauzu, 2004**).

L'un des principaux mécanismes impliqués dans l'apparition de nombreuses maladies chroniques est le stress oxydatif. Celui-ci résulte d'un déséquilibre entre la production des espèces réactives de l'oxygène (ERO) et les systèmes de défense antioxydants de l'organisme (**Halliwell et Gutteridge, 2015**). Une production excessive de radicaux libres peut provoquer des dommages au niveau des lipides, des protéines et de l'ADN, favorisant ainsi le développement de diverses pathologies telles que les maladies cardiovasculaires, le diabète, les cancers et les maladies neurodégénératives (**Shahidi et Zhong, 2015**).

Face à cette problématique, la recherche de nouvelles sources naturelles d'antioxydants suscite un intérêt croissant. Les composés phénoliques d'origine végétale sont particulièrement étudiés pour leur capacité à neutraliser les radicaux libres et à limiter les dommages causés par le stress oxydatif. Dans ce contexte, l'évaluation de l'activité antioxydante des extraits végétaux constitue une étape essentielle pour la valorisation des ressources naturelles et l'identification de nouvelles molécules bioactives.

Parmi les méthodes les plus utilisées pour l'évaluation de l'activité antioxydante, le test du radical libre DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle) occupe une place privilégiée en raison de sa simplicité, de sa rapidité et de sa fiabilité. Cette méthode, développée par **Blois (1958)**, repose sur la capacité des composés antioxydants à réduire le radical DPPH, entraînant une diminution de son absorbance mesurable par spectrophotométrie.

INTRODUCTION GENERALE

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail, dont l'objectif principal est d'évaluer l'activité antioxydante de l'extrait méthanolique des feuilles de *Brassica rapa L.* par la méthode DPPH. Cette étude vise à mettre en évidence le potentiel antioxydant de cette plante et à contribuer à sa valorisation comme source naturelle de composés bioactifs d'intérêt alimentaire, nutraceutique et pharmaceutique.

Le présent mémoire est structuré en deux parties principales. La première partie, consacrée à l'étude bibliographique, présente des généralités sur *Brassica rapa L.*, les antioxydants, le stress oxydatif ainsi que les principales méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante. La seconde partie est dédiée à l'étude expérimentale et comprend la description du matériel et des méthodes utilisés, suivie de la présentation, de l'analyse et de la discussion des résultats obtenus.

PARTIE I

Revue

Bibliographique

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉS ET
HISTORIQUE DE
BRASSICA RAPA

I. Généralités

Dans le cadre du renforcement de la santé et du bien-être, la recherche scientifique et l'innovation industrielle contemporaine s'orientent vers l'exploitation des substances d'origine naturelle, dans des domaines variés tels que la nutrition, la cosmétique et la pharmacie. Ces substances constituent un élément fondamental de la biodiversité de la flore algérienne, laquelle bénéficie, grâce à sa situation géographique, d'une grande diversité d'espèces appartenant à différents ensembles biogéographiques **(INRA/FAO, 2006)**.

Par ailleurs, les légumes représentent une ressource biologique précieuse encore insuffisamment valorisée, dont le potentiel reste largement sous-exploré et requiert davantage d'études scientifiques.

La famille des *Brassicaceae*, autrefois connue sous le nom de Crucifères, compte 3400 espèces réparties en 340 genres **(Stevens 2001 ; Hall et al., 2002)**. Elles sont dispersées à travers le monde entier, bien qu'elles soient plus répandues dans l'hémisphère Nord. C'est un groupe facilement identifiable et bien distinctif grâce à ses fleurs aux pétales agencés en forme de croix, d'où son ancien nom de crucifères (issu du latin *crucem ferre*, signifiant porter une croix). Certaines espèces sont appropriées à des environnements spécifiques, tels que les montagnes ou les déserts, et montrent alors une forte lignification et une surface foliaire diminuée **(Sakhri et Tatemante, 2018)**.

Cette famille englobe une multitude de plantes économiquement significatives que les humains ont considérablement modifiées et domestiquées, notamment celles du genre *Brassica*. Ce genre inclut le chou, le chou-fleur, le brocoli, les choux de Bruxelles, le chou frisé, le colza, le navet, le rutabaga et le cresson. *Brassica* est le genre qui a le plus d'importance économique et comprend 37 espèces distinctes, dont beaucoup sont cultivées. Elles fournissent des racines, des feuilles, des tiges, des bourgeons comestibles, des fleurs et des graines **(Hadji et Tarfaya, 2019)**.

Le navet est une plante cultivée depuis l'Antiquité, faisant partie intégrante de l'alimentation des Romains, des Gaulois et des Germains. L'origine du terme "navet" remonte au XII^e siècle, où il était initialement désigné sous la forme "naviet", venant du mot latin "napus" diverses régions et se décline aujourd'hui en de nombreuses variétés cultivées à travers le monde **(Araar, 2012)**.

I.1. L'origine et répartition géographique

Il est généralement dit que le navet a ses origines dans la région méditerranéenne. Cependant, on trouve plusieurs variétés de plantes potagères de l'espèce *Brassica rapa* qui ont leur origine en Chine. Selon l'une des théories actuellement examinées, cette espèce aurait plutôt deux lignées distinctes. La première origine serait les régions plus occidentales (Europe, Inde et Asie centrale) et inclurait le navet, le rutabaga ainsi que la navette (actuellement connue sous le nom de colza ou canola). Quant à la seconde, elle serait plutôt liée à l'Asie de l'Est et regrouperait une multitude de variétés de « chou chinois » cultivées pour leurs racines ou leurs feuilles : ta-tsoi, hon tsai tai, mibuna, mizuna, komatsuna, pac choi, bok choi, pai lo lo, etc. De nombreuses sortes de navets étaient déjà connues des Grecs et des Romains. C'est Jacques Cartier qui introduira le navet en Amérique en 1541 (**Azara et Belbacha, 2020**).

En Algérie, le navet est cultivé à travers tout le pays en tant que culture irriguée de printemps et d'été, ainsi qu'en tant que culture non irriguée à la fin de l'automne et au début du printemps. De nos jours, il est principalement perçu comme un légume de diversification. On dénombre plus de trente variétés dans le monde entier, notamment le navet d'automne qui s'épanouit dans les zones nordiques, et le navet précoce (parfois appelé navet de mai). La variété la plus répandue est le navet pygmée ou goût très relevé (**Araar, 2012**).

Brassica rapa a besoin de températures plus fraîches, typiques des hautes terres tropicales, et s'adapte bien aux conditions de longues journées. Ils nécessitent une grande quantité d'eau. La plupart des variétés de navet végétal ont besoin d'une induction à froid pour fleurir, ce qui n'est pas possible sur les hauts plateaux tropicaux en dessous de 2000 m (**Azara et Belbacha, 2020**).

I.2. Principales variétés de navet

Il existe une multitude de types de navets. Ils sont généralement répartis en divers groupes en fonction de la forme et de la couleur de leur racine épaisse.

Groupe 1 : Ce groupe regroupe les navets longs et demi-longs, classés selon leur précocité des plus cultivés aux moins cultivés :

- Navet demi long blanc extra hâtif,
- Navet à forcer blanc des halles,
- Navet précoce de Croissy,

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS ET HISTORIQUE DE BRASSICA RAPA

- Navet des vertus marteau,
- Navet de Viarmes,
- Navet blanc dur d'hiver,
- Navet noir long,
- Navet de Montesson.

Groupe 2 : Ce groupe regroupe les navets ronds, dont on privilégie principalement la culture selon l'ordre de précocité :

- Navet d'Auvergne hâtif à collet rouge,
- Navet rond de Croissy ou navet rond des vertus,
- Navet noir rond Navet blanc globe à collet violet,
- Navet jaune boule d'or.

Groupe 3 : Ce groupe englobe les navets plats, dont certains sont particulièrement appréciés et cultivés

- Navet blanc plat hâtif à feuille entière,
- Navet de Milan rouge,
- Navet blanc plat hâtif,
- Navet jaune de Hollande,
- Navet jaune de Finlande.

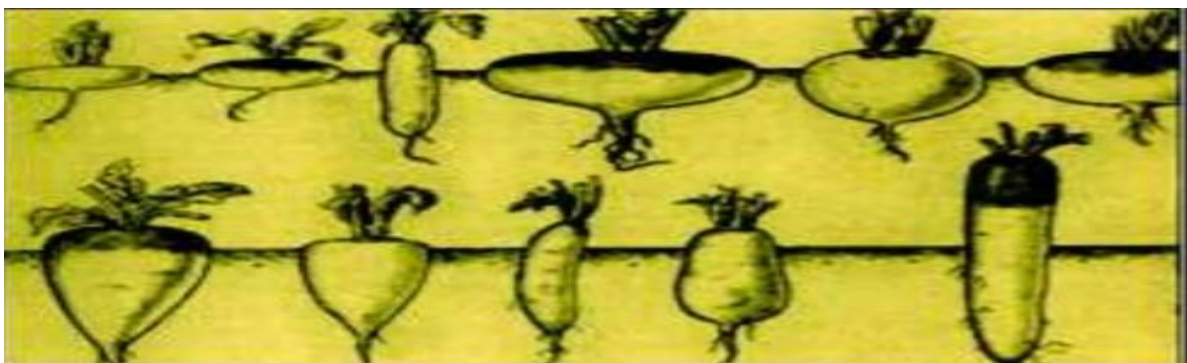


Figure 01 : Variétés locales de navets: un patrimoine génétique et culturel en perdition (Araar, 2012).

I.3. Classification botanique du navet

Le navet se classe comme suit (**Tableau 01**) :

Tableau 01 : Classification botanique du navet (**Reggai et Zekrini, 2014**).

Taxonomie	Classification
Règne	Plantae
Embranchement	Spermaphyte
Classe	Dicotylédone
Ordre	Brassicale
Famille	Brassicaceae ou crufière
Sous famille	Brassicoideae
Tribu	Brassiceae
Genre	Brassica
Espèce	Rapa

Noms communs : navet, naveau.

Noms vernaculaires : **français** : navet, naveau, rave, **espagnol** : nabo, **italien** : navone ou rapa, **turc** : şalgam, **arabe** : شَلْجَم [left] ou شَلْجَم [chaljam] (**Hadji et Tarfaya, 2019**).

Noms latine : *Brassica rapa* (**Bouklachi et Mamouni, 2019**).

I.4. Description botanique du navet :

Le Navet, ou *Brassica rapa*, fait partie de la famille des crucifères, les *Brassicacées*. C'est une plante herbacée dressée qui peut atteindre jusqu'à 1,5 mètre de hauteur. Sa tige est parfois trapue et partiellement ramifiée. Les feuilles sont disposées en spirale, mais elles peuvent également apparaître sous forme de rosette ou à un stade végétatif. Il n'y a pas de stipules, et les feuilles internes sont plus ou moins pétiolées avec une structure pennatifide. Elles présentent entre 1 et 5 paires de petites lobes latéraux ainsi qu'un grand lobe terminal pouvant atteindre 90 cm x 35 cm. Les feuilles caulinaires sont simples et embrassent la base, présentant une texture glabre et glauque (**Couplan, 2011**).

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS ET HISTORIQUE DE BRASSICA RAPA

I.4.1. Les feuilles de navet : Le radis a des tiges érigées qui portent 8 à 12 feuilles formant une couronne. Ont généralement une structure claire et fine, possédant à la base des pétioles de feuilles une racine globuleuse ou effilée. Essentiellement, le stockage des racines se fait à travers l'hypocotyle, qui est la partie de la plante située entre la véritable racine et les premières feuilles de la plantule (**Couplan, 2011**).

I.4.2. Floraison : apparaît la deuxième année de culture sur une tige ramifiée pouvant atteindre environ 80 cm de hauteur. La tige porte environ une centaine de petites fleurs jaunes à quatre pétales, mellifères (**Bellal, 2018**).

Les fruits se présentent sous forme de siliques allongées, cylindriques et effilées, renfermant entre 15 et 25 petites graines sphériques de couleur rougeâtre, parfois presque noires (**Hadji et Tarfaya, 2019**).

I.4.3. Racine : cultivée comme plante potagère ou fourragère pour sa racine charnue, allongée ou arrondie. Une racine globale ou effilée se développe à la base des pétioles des feuilles. La racine de stockage est principalement constituée de l'hypocotyle, la partie située entre la vraie racine et les premières feuilles de la jeune plante (**Bellal, 2018**).



Figure 02: Différents parties du navet (*Brassica rapa* L.) (**Hadji et Tarfaya, 2019**).

I.5. Besoins cultureux

I.5.1. Exposition : Les navets sont cultivés en mi-ombre, car les températures élevées rendent leur chair fibreuse et vide (**Bouklachi et Mamouni, 2019**).

I.5.2. Sol : Les navets sont cultivés en mi-ombre, car les températures élevées rendent leur chair fibreuse et vide. Le navet prospère particulièrement sur des sols limoneux ou plutôt argileux, qui demeurent frais durant les chaleurs. La surabondance de calcaire réduit la productivité et la qualité (**Bouklachi et Mamouni, 2019**).

I.5.3. Exigences pédoclimatiques de la culture

Tableau 02 : Exigences de la culture du navet (**Bellal, 2018**).

	Favorable	Défavorable	Remarques
Climat	Tempéré, même un peu froid.	Chaleur, sécheresse.	Sensible aux gelées (-3, -4°C) Variable selon les variétés.
Sol	Sol gardant la fraîcheur pH 6.5-7	Sol grossier	Peu exigeant.
Fertilisation	Reliquat de la culture précédente ou engrais organique	fumures organiques fraîches	-
Rotation, Durée, Précédents	3 à 4 ans Blé, trèfle, vesce	Autres espèces de la même famille	-
Association	Carottes, pois, haricots, laitue, tomate.	-	-

I.5.4. Fertilisation : Durant le mois de mars, pour la préparation du parterre, intégrez un fertilisant complet qui soit riche en potasse et en phosphate. Lors du labour à l'automne (octobre/novembre), il est essentiel d'ajouter des matières organiques (**Bouklachi et Mamouni, 2019**).

I.5.5. Entretien : Le binage et le désherbage ainsi qu'un arrosage fréquent sont nécessaires pour maintenir la fraîcheur du sol en permanence (**Bouklachi et Mamouni, 2019**).

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS ET HISTORIQUE DE BRASSICA RAPA

I.5.6. Multiplication : Ensemencement en place, de février (sous abri) à août, pour une récolte s'étalant de la mi-avril au mois de novembre. Il est conseillé de faire un éclaircissement tous les 10 à 12 cm (**Bouklachi et Mamouni, 2019**).

I.5.7. Taille : Enlevez les feuilles qui sont jaunies ou endommagées.

I.6. Composition chimique de Navet :

Le navet est riche en composés biologiquement actifs, comme les flavonoïdes (l'isorhamnétine, le kaempférol, la quercétine), et des glycosides issus de phénylpropanoïdes, ainsi que des alcaloïdes indoliques (**Couplan, 2011**). Les différentes parties du *Brassica rapa* sont particulièrement riches en huiles essentielles, possédant des propriétés antioxydants et antimicrobiennes. Des études ont prouvé la présence de divers composants, tels que les alcools, les aldéhydes, les cétones, les esters terpéniques et azotés (voir tableau III). Par ailleurs, les feuilles sont majoritairement composées de soufre qui figure parmi les principaux éléments volatils présents dans les huiles essentielles (**Saka et al., 2017**).

Tableau 03 : Les principaux constituants chimique de navet (**Nabi, 2020**).

Les organes	Les constituants chimiques	
Les racines	-Eau (92g/100g) -Calories (27kcal/100g) -Protides (1g/100g) -Lipides (0.1g/100g) -Glucides (6.5g/100g) -Ca (30mg/100g) -P (27mg/100g) -Fe (0.3 mg/100g)	-Na (67mg/100g) -K (191mg/100g) -Mg (11mg/100g) -Vitamine A (0UI/100g) -Vitamine B1 (0.04mg/100g) -Vitamine B2 (0.03mg/100g) -Vitamine PP (0.4mg/100g) -Vitamine C (21mg/100g)
Les feuilles	-Eau (91g/100g) -Calories (27kcal/100g) -Protides (1.5g/100g) -Lipides (6g/100g) -Glucides (0.3g/100g) -Ca (191mg/100g) -P (42mg/100g) -Fe (1.1mg/100g)	-Na (40mg/100g) -K (296mg/100g) -Mg (31mg/100g) -Vitamine A (7600UI/100g) -Vitamine B1 (0.8mg/100g) -Vitamine B2 (0.1mg/100g) -Vitamine PP (0.6mg/100g) -Vitamine (60mg/100g)

I.7. La valeur nutritionnelle

Le navet est un légume peu calorique, fournissant approximativement 17 à 18 kcal pour 100 g, grâce à son importante proportion d'eau (environ 93 %) (**Araar, 2012**).

Le navet est riche en vitamines, y compris la vitamine C, les vitamines du groupe B (B5, B6 et autres, sauf la B12), ainsi que dans une mesure limitée de provitamine A. Il fournit également des fibres, principalement insolubles, qui stimulent le transit intestinal.

Du point de vue minéral, il renferme du potassium, du calcium, du phosphore et divers oligo-éléments comme le fer, le zinc, le cuivre, le manganèse et le soufre. Sa saveur distinctive est due à sa concentration en hétérosides, des composés contenant du soufre. De plus, le navet offre des vertus salutaires pour l'organisme, notamment un effet apaisant et diurétique (**Bellal, 2018**).

I.8. Application dans la médecine traditionnelle et la pharmacologie

Depuis longtemps, les crucifères sont employées en alimentation, mais aujourd'hui, elles sont également prises en compte dans le domaine de la santé, notamment pour des usages pharmaceutiques. Dans la médecine traditionnelle, on a fréquemment utilisé les différentes parties du navet (racines, feuilles, graines) pour soigner certaines affections comme le diabète (**Benkhniq et al., 2014**).

De nombreuses recherches épidémiologiques ont prouvé qu'une ingestion élevée de fruits et légumes réduisait le risque de maladies cardiovasculaires, de certains cancers et d'autres pathologies chroniques. Le navet, un légume aux feuilles comestibles, est une excellente source de vitamine A et de folate. De plus, il est également riche en vitamine C et vitamine E. et des antioxydants qui défendent les cellules corporelles contre les dommages infligés par les radicaux libres, tels que la lutéine et la zéaxanthine, deux composés appartenant à la famille des caroténoïdes. L'étude pharmacologique du navet a démontré que les flavonoïdes, anthocyanes et d'autres composés ont des effets bénéfiques, notamment une action hépatoprotectrice, anti-tumorale, antioxydante, antimicrobienne ainsi qu'anti-inflammatoire (**Paul et al., 2019**). *Brassica rapa* possède des caractéristiques antibactériennes contre certaines bactéries telles que le staphylococcus aureus et le Bacillus cereus. Elle peut être employée dans le traitement des infections dues au Helicobacter pylori, et a une action antifongique contre le Candida albicans (**Paul et al., 2019**).

Les polyphénols, (flavonoïdes, acides phénoliques) présents dans la *Brassica rapa*, ont la capacité d'exercer un effet antimicrobien. L'acide phénolique, grâce à sa polarité, peut traverser la membrane bactérienne qui est perméable ou semi-perméable et interagir avec le cytoplasme ou les protéines cellulaires. C'est pourquoi la plupart des polyphénols rencontrent une barrière significative lorsqu'il s'agit de pathogènes Gram-négatifs (**Beltagy, 2014**).

La richesse de leurs feuilles en flavonoïdes et en métabolites secondaires, ainsi que l'ensemble de ces données, attirent notre attention sur cette plante pour son exploitation dans la découverte de molécules antimicrobiennes.

I.9. Données toxicologiques

Brassica rapa fait partie des plantes souvent exposées à divers pathogènes présents dans l'environnement. Ces derniers peuvent parfois contaminer les cultures avant la récolte, devenant ainsi des vecteurs potentiels de maladies entériques chez l'homme (**Jahangir et al., 2008**).

Par ailleurs, plusieurs espèces du genre *Brassica*, comme *Brassica napus* et *Brassica rapa*, renferment des thioglucosides, notamment les progoitrines. Sous l'effet de l'enzyme myrosinase, ces composés peuvent se transformer en oxazolidines-thiones, connues pour leur effet goitrigène chez les animaux non-ruminants (**Benkhniue et al., 2014**).

CHAPITRE II :
ANTIOXYDANTS
ET ACTIVITÉ
ANTIOXYDANTE

I. Notion d'oxydation et de stress oxydatif

I.1. Définition des radicaux libre

Un radical libre est un élément qui contient un ou plusieurs électrons non appariés dans sa structure moléculaire la plus externe (orbitale), ce qui le rend hautement réactif. Il se stabilise généralement par le biais de couples ou paires d'électrons (**Leverve, 2009 ; Sen *et al.*, 2010**).

Les radicaux libres peuvent avoir des origines internes ou externes. Les radicaux libres endogènes sont produits à l'intérieur des cellules par auto-oxydation ou désactivation de petites molécules, tandis que les sources exogènes de radicaux libres proviennent de la fumée du tabac, de divers polluants, des solvants organiques, des anesthésiques et des pesticides.

Tous les éléments cellulaires, comme les mitochondries, lysosomes, peroxysomes, etc., sont inclus dans les sites de production de radicaux libres. De plus, certains médicaments transformés en produits intermédiaires de radicaux libres provoquent aussi des lésions oxydatives dans les tissus ciblés (**Rao *et al.*, 2011**).

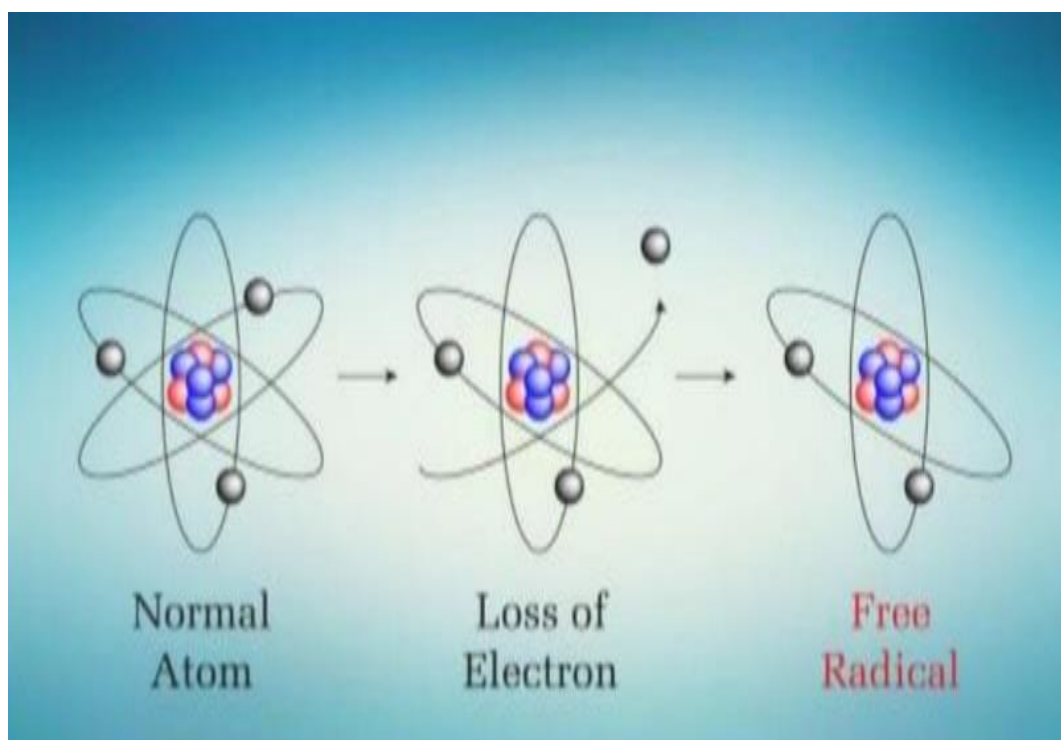


Figure 03 : La formation des radicaux libres (**Ramdaoui et Rouahi, 2022**).

Tableau 04 : Espèces réactives de l'oxygène radicalaire et non radicalaire (Ait Yahia et Zemoura, 2014).

ERO (radicalaire)	Formule chimique
Oxygène moléculaire	$^3\text{O}_2$
Dioxygène singulet	$^1\text{O}_2$
Anion superoxyde	O_2^-
Radical hydroxyle	$\bullet\text{OH}$
Radical hydroperoxyde	HOO°
Radical peroxyde	ROO°
Radical alkoxyle	RO°
Radical oxyde nitrique	NO°
Peroxinitrite	ONOO°
ERO (non radicalaires)	Formule chimique
Hydroperoxyde	ROOH
Hypochlorite	ClOH
Ozone	O_3
Peroxyde d'hydrogène	H_2O_2

I.2. Principale source de ROS

Tableau 05 : Principales sources des ROS (Boughellout et amara, 2015)

Source endogènes	Source exogènes
NADH Oxydases	Tabagisme
Chaine respiratoire mitochondrial	Cytokine pro-inflammatoire
Xanthine Oxydase	Chimiothérapie
Atherogénèse	Radiation ionisantes
Lipo-Oxygénase	Radiation UV
phagocytes	Toxique environnementaux
Inflammation	Champs électriques
Etat d'ischémie-reperfusion	Xénobiotique pro-oxydant

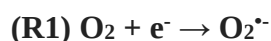
I.3. Les types

I.3.1. Espèces réactives d'oxygène (ERO)

Il s'agit de molécules fortement réactives qui contiennent de l'oxygène. On peut les catégoriser en superoxydes, hydroxyles et radicaux hypochlorites. Elles sont formées à la suite de réactions de signalisation enzymatique, tant intercellulaires qu'intracellulaires. Les espèces réactives de l'oxygène (ERO) comprennent les dérivés non radicalaires d'oxygène tels que l'oxygène singulet, les peroxydes lipidiques, le peroxyde d'hydrogène, entre autres (**Mathew et al., 2011**).

a) L'anion superoxyde $O_2^{\cdot-}$

L'anion superoxyde est peu réactif, car il ne peut pas passer à travers les membranes biologiques. Il se crée grâce à l'ajout d'un électron à la molécule d'oxygène **(R1)** par auto-oxydation dans la mitochondrie pendant la respiration cellulaire. Il peut également être généré par des voies enzymatiques telles que la xanthine oxydase, la NADPH oxydase, etc. (**Hamma et al., 2015**). Ce radical est responsable de la création de radicaux comme le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 , le radical hydroxyle $OH^{\cdot}$ et l'oxygène singulet O_2 (**Stief, 2003**).



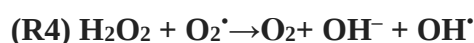
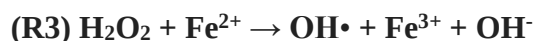
b) Peroxyde d'hydrogène H_2O_2

Les mitochondries et le réticulum endoplasmique sont les principaux sites de production du peroxyde d'hydrogène. C'est un produit de la dismutation du radical anion superoxyde par l'enzyme superoxyde dismutase **(R2)** (**Hamma et al., 2015**). Le H_2O_2 est extrêmement soluble dans l'eau, traverse aisément les membranes biologiques et peut entraîner la dégradation des protéines, la libération de Fe^{3+} , l'oxydation de l'ADN, des lipides, l'inactivation d'enzymes, entre autres. En réalité, une grande partie de la cytotoxicité du H_2O_2 est attribuée aux espèces réactives de l'oxygène qu'il génère, telle que le radical hydroxyle $OH^{\cdot}$ (**Ait Yahia et Zemoura, 2014**).



c) Radical hydroxyle OH[•]

Le radical hydroxyle est hautement réactif. Il peut se former soit par la décomposition du peroxyde d'hydrogène en présence de métaux de transition sous leur forme réduite (c'est-à-dire via la réaction de Fenton) **(R3)**, soit par son interaction avec le radical superoxyde, conformément à la réaction de d'Haber-Weiss **(R4)** **(Ait Yahia et Zemoura, 2014)**.



I.3.2. Espèces réactives d'azote (ERN)

Les radicaux libres d'azote réactifs ont un rôle clairement défini dans les dommages aux cellules et la transduction du signal **(Mathew et al., 2011)**. À des concentrations faibles, les ERN sont perçus comme des intermédiaires régulateurs dans les processus de signalisation. Tandis qu'elles peuvent être nuisibles pour les êtres vivants à des niveaux modérés ou élevés en désactivant des molécules importantes **(Di Meo et al., 2016)**, les deux espèces réactives de l'azote sont l'oxyde nitrique et le dioxyde d'azote **(Mathew et al., 2011)**.

L'oxyde nitrique, généré par l'enzyme oxyde nitrique synthase (NOS), est un radical libre fortement réactif qui cause des dommages aux glucides, lipides, protéines et nucléotides, menant à des inflammations, adhérences et lésions tissulaires. Il a aussi pour effet d'inhiber l'agrégation plaquettaire et de relaxer les muscles artériels et veineux **(Agarwal et al., 2005)**. Toutefois, le dioxyde d'azote affecte les poumons en entravant certaines de ces fonctions telles que la réponse immunitaire, ce qui réduit la résistance aux infections. De ce fait, cela perturbe le système nerveux qui contrôle le cœur, entraînant ainsi des arythmies **(Ackermann, 2011)**.

I.3.3. Espèces réactives de soufre (ERS)

Ce genre de radicaux libres se forme suite à l'oxydation des thiols et des disulfures. Dans la nature, les éléments redox-actifs se caractérisent par la présence de soufre à un état d'oxydation élevé. On peut citer parmi les exemples de l'ERS le disulfure, l'acide sulfénique et les radicaux thiyliques. Ils induisent l'inhibition des protéines et des enzymes thiol par le biais d'une oxydation rapide **(Mathew et al., 2011)**.

I.4. Les dommages dus aux radicaux libres

Les radicaux libres basés sur l'oxygène, tels que le peroxynitrite issu de la réaction entre le radical monoxyde d'azote et le radical superoxyde, possèdent un fort pouvoir oxydant contre les lipides, les protéines et l'ADN (Therond, 2006).

I.4.1. Oxydation de l'ADN

Les radicaux libres, en particulier le radical hydroxyle (HO°), sont capables de provoquer des ruptures d'ADN, des mutations ponctuelles (sur un ou deux brins) ou de perturber les mécanismes de réparation. Les EROs peuvent causer, entre autres, des oxydations, des nitrations ou des méthylations de bases. Dans le processus d'oxydation des bases, la guanine peut être transformée en 8-hydroxy-Guanosine (8-OH-G) par le radical hydroxyle, ce qui conduit à la production de 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine (8-OH-dG). Cette dernière peut ensuite être quantifiée en tant qu'indicateur de stress oxydatif. Ces changements vont donc altérer la transcription et ultérieurement la traduction, conduisant à la création d'une protéine incomplète et/ou inefficace. Ces modifications sont fréquemment responsables de processus tels que la mutagenèse, la carcinogénèse ou encore le vieillissement anticipé (Figure 04) (Lizorieux, 2013).

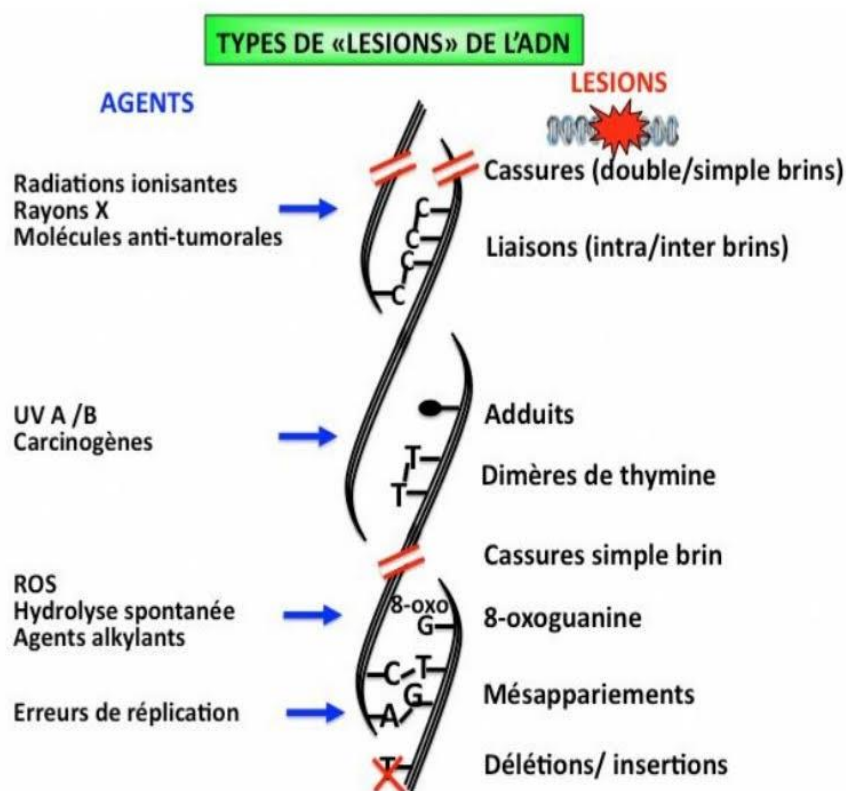


Figure 04 : Les lésions de l'ADN (Boughellout et amara, 2015).

I.4.2. Oxydation des protéines

Bien que tous les radicaux aient la capacité d'oxyder les protéines, c'est le radical hydroxyle $\text{HO}\cdot$ qui se révèle être le plus réactif. On appelle généralement cette méthode d'oxydation des protéines « metal-catalysed oxidation (MCO) », et elle conduit de préférence à la carbonylation des acides aminés aromatiques comme le tryptophane ou la tyrosine. La rupture des liaisons peptidiques ou la carbonylation de certaines chaînes latérales d'acides aminés sont les deux résultats possibles de l'oxydation primaire des protéines. Cette réaction, décrite comme une modification post-traductionnelle irréversible, expose un groupe carbonyle actif sur les chaînes latérales des protéines, semblables à des aldéhydes ou des cétones (**Figure 05**) (Malezieu, 2019).

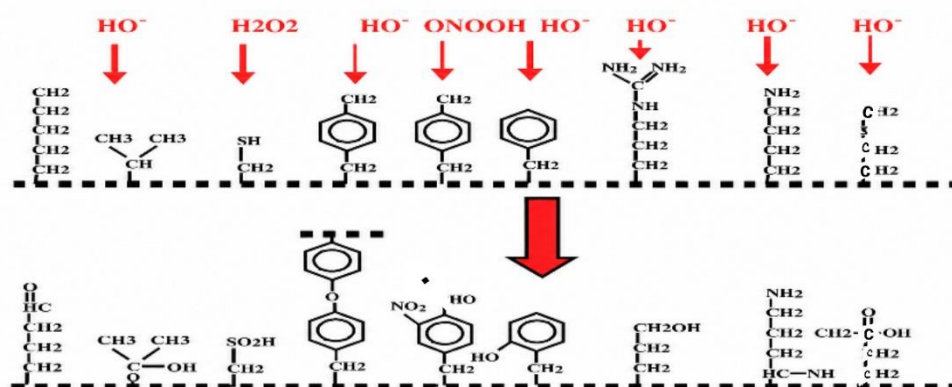


Figure 05 : Nature de quelques modifications des chaînes latérales d'acides aminés des protéines après attaque radicalaire (Favier, 2003).

I.4.3. Oxydation des lipides

La peroxydation lipidique se réfère à l'agression des cibles lipidiques par les EROs. L'initiation de la réaction requiert la présence d'oxygène dans l'environnement. Les acides gras polyinsaturés, qui possèdent au moins deux ou trois doubles liaisons, sont particulièrement vulnérables à l'oxydation. La peroxydation lipidique est une réaction séquentielle déclenchée par un radical qui aboutit à la production d'hydroperoxydes. Ces derniers se décomposent en aldéhydes, ce qui affecte la membrane cellulaire et peut causer une détérioration de l'intégrité de la cellule ainsi que de ses organites. Dans les produits finaux formés, le malondialdéhyde

(MDA) et le 4-hydroxynonénal (4-HNE) possèdent une capacité mutagène et cancérigène (Figure 06) (Lizorieux, 2013).

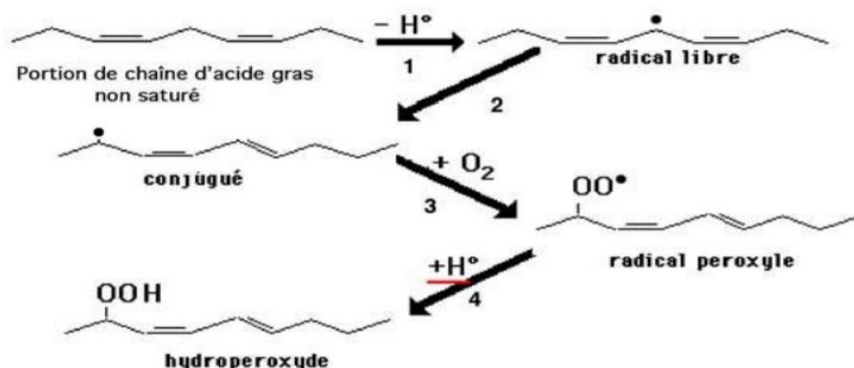


Figure 06 : La peroxydation lipidique (Boughellout et amara, 2015).

II. Stress oxydatif

II.1. Définition

Depuis plusieurs années, le concept du « stress oxydant » s'est propagé dans le domaine des sciences biologiques et médicales. Il fait référence à une situation où la cellule ne parvient plus à réguler la présence abondante de radicaux oxygénés nocifs, un phénomène que les chercheurs associent à la majorité des maladies humaines. L'oxydation cellulaire désigne une altération du statut oxydatif au sein de la cellule, provoquée soit par une génération excessive de radicaux libres, soit par une réduction de la capacité antioxydante de défense. L'équilibre redox ou l'homéostasie est alors dérangé et les cellules deviennent susceptibles aux attaques de radicaux, entraînant des lésions oxydatives sur les éléments cellulaires (Figure 07) (Sabour-Madani, 2016).



Figure 07 : Balance radicaux libre\antioxydants (Boughellout et amara, 2015).

II.2. Source du stress oxydatif

Le stress oxydatif peut être causé par différentes sources, comme la production excessive interne de prooxydants liés à l'inflammation, une carence en antioxydants ou même une exposition environnementale à des éléments prooxydants (tabac, alcool, médicaments, rayons UV, pesticides, ozone, amiante, métaux toxiques) (**Magder, 2006**).

II.3. Les maladies liées au stress oxydant

Le stress oxydatif joue un rôle dans un grand nombre de pathologies, soit comme facteur déclencheur, soit en tant qu'élément lié aux complications de l'évolution. La majorité des affections liées au stress oxydatif se manifestent avec le temps, puisque le vieillissement réduit les défenses antioxydants tout en augmentant la production de radicaux mitochondriaux (**Sohal et al., 2002**). Parmi ces maladies, on peut citer les affections neurodégénératives (comme la maladie d'Alzheimer [MA] et la maladie de Parkinson [MP]), les problèmes cardiaques (tels que les maladies coronariennes [MC] et l'athérosclérose, ainsi que les accidents vasculaires cérébraux), les troubles rénaux (comme la néphropathie diabétique), les maladies pulmonaires (entre autres l'asthme, la fibrose pulmonaire et le cancer du poumon), les maladies oculaires (par exemple, la rétinopathie diabétique [RD] et la rétinite pigmentaire [RP]), ainsi que diverses pathologies de l'estomac, de la peau, du sang (bêthalthalassémie, leucémie lymphoblastique aiguë [LLA]), du foie, du pancréas, du cerveau, sans oublier des conditions telles que la maladie de Wilson, le diabète et l'obésité,...etc (**Mancinelli et al., 2011 ; Rahman et al., 2012**).

III. Antioxydants

III.1. Définition

On appelle antioxydant toute molécule capable de réduire ou d'interrompre l'activité des espèces oxygénées réactives, soit en inhibant leur production, soit en contrôlant leur diffusion en servant de pièges à radicaux libres pour donner finalement des composés stables. Ces molécules ont la capacité d'interagir de manière sécurisée avec les radicaux libres et d'arrêter la réaction en chaîne avant que les molécules essentielles ne subissent des dommages (**Favier, 2003**).

Cette définition fonctionnelle concerne une vaste gamme de substances, y compris les enzymes ayant des caractéristiques catalytiques particulières, ainsi que les petites molécules qui sont hydro- ou liposolubles. Cette large diversité physico-chimique permet la présence d'antioxydants dans tous les organismes, qu'ils soient à l'intérieur des cellules, au niveau des membranes ou en dehors des cellules (**Cano et al., 2006**).

III.2. Classification des antioxydants

III.2.1. Selon l'origine

➤ **Les antioxydants se divisent selon l'origine en antioxydants endogènes et exogènes :**

Pour se prémunir des effets néfastes des espèces réactives de l'oxygène (ERO), l'organisme s'appuie sur un système complexe de défenses antioxydantes. Ces antioxydants proviennent de deux sources principales : la première est exogène, issue de l'alimentation, notamment via les fruits et légumes riches en vitamines, caroténoïdes et ubiquinone ; la seconde est endogène, composée d'enzymes telles que la superoxyde dismutase, la glutathion peroxydase et la catalase, ainsi que de protéines comme la ferritine et l'albumine. Des mécanismes de réparation des dommages oxydatifs, à l'instar des endonucléases, complètent ce dispositif. Par ailleurs, quelques oligoéléments tels que le sélénium, le cuivre et le zinc, qui agissent en tant que cofacteurs des enzymes antioxydantes, participent également à cette protection (**Haleng et al., 2007**).

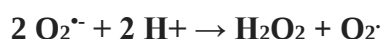
III.2.2. Antioxydants endogènes

III.2.2.1. Antioxydants enzymatiques

Les antioxydants enzymatiques jouent un rôle essentiel en tant que première ligne de défense contre le stress oxydatif (**Haleng et al., 2007**). Ils comprennent principalement :

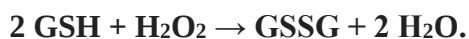
- **Superoxydes dismutases (SOD) :**

Ces métalloprotéines sont responsables de la neutralisation de l'ion superoxyde $O_2^{\cdot-}$ par une réaction de dismutation. Ce processus transforme l'ion en peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et en oxygène (O_2) (**Haleng et al., 2007 ; Bensakhria, 2018**). L'équation de réaction est la suivante :



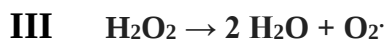
- Glutathion peroxydase (GPx) :

Enzyme antioxydante présente dans le plasma, les fluides extracellulaires et le cytosol, elle dépend du sélénium pour fonctionner. Son rôle principal consiste à éliminer le H₂O₂ produit, empêchant ainsi son comportement néfaste en tant que pro-oxydant. Elle transforme également les hydroperoxydes lipidiques en alcools non toxiques, contribuant ainsi à interrompre la chaîne de peroxydation **lipidique** (Sachdeva *et al.*, 2014 ; Mebarki *et al.*, 2016). La réaction associée est :



- Catalase (CAT) :

Cette enzyme omniprésente dans les organismes vivants aérobies catalyse la décomposition du peroxyde d'hydrogène en eau et oxygène par dismutation (Chelikani *et al.*, 2004 ; Sharma *et al.*, 2012). L'équation de la réaction est :



III.2.2.2. Antioxydants non enzymatiques

Ce groupe de systèmes antioxydants comprend une variété de substances endogènes, parmi lesquelles figurent le glutathion, l'acide urique, la bilirubine, les hormones sexuelles, la mélanine, la mélatonine, l'acide lipoïque et le coenzyme Q10. Parmi ces composés synthétisés par les cellules, le glutathion réduit est sans doute le plus essentiel. Ce thiol intracellulaire majeur joue un rôle clé en protégeant contre les radicaux oxygénés, les peroxydes et même le monoxyde d'azote (•NO). En effet, selon Favier (2003), le glutathion se trouve en concentration millimolaire dans la plupart des cellules et en concentration micromolaire dans le plasma.

Dans des conditions physiologiques normales, la forme réduite du glutathion (GSH) constitue de 90 à 98 % du glutathion total. Cependant, en cas de stress oxydant, le GSH peut être oxydé pour former un pont disulfure (GSSG) ou des ponts disulfures mixtes (GSSR, où R est lié à un autre radical thiol). Son rôle dépasse toutefois la simple neutralisation des radicaux libres : il agit également comme cosubstrat pour plusieurs enzymes antioxydantes telles que la glutathion peroxydase, la glutathion réductase et les transférases (Bouldjadj, 2009).

La bilirubine possède quant à elle la capacité de neutraliser les radicaux peroxydes (ROO•) et l'oxygène singulet, ce qui lui permet de protéger l'albumine et les acides gras associés des agressions radicalaires. Les hormones sexuelles féminines jouent également un rôle antioxydant grâce à un groupe hydroxyle phénolique présent dans leur structure chimique qui

inhibe la peroxydation lipidique des LDL à des concentrations micromolaires *in vitro* (Bouldjadj, 2009).

Enfin, bien que l'importance de leur impact reste encore incertaine, des composants tels que les thiorédoxines, les glutarédoxines et les métallothionéines semblent exercer une fonction protectrice (Favier, 2003).

III.2.3. Antioxydants exogènes

a) Médicaments

- Probucol (Lurselle)

Le probucol est un médicament qui, en plus de ses effets bien établis sur la réduction du taux de cholestérol sanguin, joue un rôle important dans la prévention de l'athérogénèse. Il agit en tant qu'antioxydant en inhibant l'oxydation des lipoprotéines de faible densité (LDL) (Medjoujda, 2014).

- N-acétylcystéine

La N-acétylcystéine est une molécule d'intérêt notable, capable de pénétrer dans les cellules et de participer efficacement à la régénération du glutathion. Des études ont également montré qu'elle pourrait être bénéfique pour traiter les lésions pulmonaires induites par les espèces réactives de l'oxygène (Medjoujda, 2014).

b) Alimentations

- La vitamine C

L'acide L-ascorbique, plus communément connu sous le nom de vitamine C, est considéré comme l'antioxydant le plus significatif dans les fluides extracellulaires. Il agit comme un piège hautement efficace pour les ions superoxydes, le peroxyde d'hydrogène, l'hypochlorite, ainsi que pour les radicaux hydroxyles, peroxydes et l'oxygène singulet. Ses propriétés antioxydantes reposent principalement sur sa capacité à réagir avec les radicaux peroxydes présents dans l'eau. Cette réaction conduit à la formation du radical ascorbyle. En neutralisant ces radicaux peroxydes dans le milieu aqueux avant qu'ils ne puissent déclencher des processus de peroxydation lipidique, la vitamine C contribue à protéger les biomembranes et les lipoprotéines (Bouldjadj, 2009).

La vitamine C joue un rôle clé dans divers processus métaboliques et contribue au renforcement des défenses naturelles de l'organisme. Une carence en cette vitamine peut entraîner le scorbut,

CHAPITRE II : ANTIOXYDANTS ET ACTIVITÉ ANTIOXYDANTE

mais également une réduction de son effet antioxydant, ainsi qu'un risque accru de développer un cancer ou une cataracte (**Amrane et Dib, 2021**).

- La vitamine E

Est un terme générique qui englobe une famille de composés comprenant les tocophérols et les tocotriénols, parmi lesquels l' α -tocophérol se distingue comme la forme la plus active. Cette vitamine joue un rôle essentiel en tant qu'antioxydant liposoluble prédominant dans le plasma et les érythrocytes humains. Présente dans les lipoprotéines et les membranes cellulaires, l' α -tocophérol peut, d'un côté, neutraliser l'oxygène singulet (1O_2) en s'oxydant en quinone et, de l'autre, interagir avec le radical hydroxyle ($\bullet OH$). Toutefois, sa fonction biologique principale réside dans la réaction avec les radicaux peroxydes ($ROO^\bullet$), conduisant à la formation d'un radical tocophéryle (**Bouldjadj, 2009**).

Le processus de régénération de l' α -tocophérol repose principalement sur deux mécanismes. Premièrement, la vitamine C (acide ascorbique) peut réduire le radical tocophéryle. Deuxièmement, une enzyme spécifique, la tocophéryl réductase, dépendante du glutathion, est également capable de ramener le radical tocophéryle à son état initial d' α -tocophérol. Simultanément, le glutathion sous sa forme réduite (GSH) est transformé en glutathion oxydé (GSSG). Ce cycle métabolique nécessite l'intervention de la vitamine B2, qui agit comme cofacteur de la glutathion réductase, indispensable pour restaurer le GSH après sa consommation lors de la réduction du radical tocophéryle (**Bouldjadj, 2009**).

- Caroténoïdes

Les caroténoïdes constituent un groupe de pigments naturels colorés, produits et présents dans de nombreuses cellules végétales. Ils se divisent en deux grandes catégories : les caroténoïdes à chaîne oxygénée et ceux à chaîne non oxygénée. Parmi eux, certains, notamment les bêta-carotènes, jouent un rôle important en tant que précurseurs de la vitamine A. Dans l'organisme, les caroténoïdes affichent des propriétés antioxydantes significativement supérieures à leur potentiel pro-oxydant, en particulier lorsqu'ils interviennent dans un contexte de peroxydation lipidique (**Hassaine et Heddi, 2023**).

- Les oligoéléments

Le mot oligoélément tire son origine du grec « oligo », qui signifie « petit » ou « peu abondant ». Dans le corps humain, leur concentration est inférieure à 0,01 %. Ils doivent être apportés

par l'alimentation, car l'organisme ne peut les produire. Les oligoéléments comme le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le manganèse (Mn), le sélénium (Se) et le fer (Fe) jouent un rôle crucial dans la défense de l'organisme contre le stress oxydatif. Les enzymes antioxydantes, pour maintenir leur activité catalytique, dépendent de cofacteurs spécifiques. Par exemple, la superoxyde dismutase (SOD) mitochondriale nécessite du manganèse, tandis que la SOD cytosolique dépend du cuivre et du zinc. La catalase utilise le fer, et la glutathion peroxydase (GPx) fait appel au sélénium. Toutefois, certains de ces oligoéléments, comme le fer, lorsqu'ils sont présents en excès et sous leur forme réduite, peuvent exercer une action prooxydante, ce qui peut être néfaste pour l'organisme (**Garait, 2006**).

- Les polyphénols

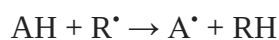
Les polyphénols, classés parmi les métabolites secondaires, forment une vaste famille d'antioxydants. Leur rôle principal consiste à protéger les constituants cellulaires des atteintes oxydatives, contribuant ainsi à réduire le risque de diverses maladies dégénératives associées au stress oxydatif.

III.2.2. Selon leur mécanisme d'action

Les antioxydants peuvent être classés en fonction de leurs modes d'action. Deux stratégies principales permettent de ralentir les réactions d'oxydation : soit en neutralisant les radicaux libres responsables des réactions en chaîne, soit en bloquant la décomposition des hydroperoxydes en radicaux libres. Ces deux mécanismes servent de base pour distinguer les antioxydants en deux grandes catégories : les antioxydants primaires et secondaires (**Rolland, 2004**). Une classification élargie inclut également un troisième type lié aux facteurs environnementaux influençant les réactions d'oxydation.

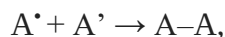
III.2.2.1. Antioxydants primaires ou radicalaires (Type I)

Également appelés antioxydants vrais ou radicalaires, les antioxydants primaires interrompent les chaînes auto-catalytiques de l'oxydation en neutralisant les radicaux libres. Leur mécanisme repose sur le don d'un atome d'hydrogène aux radicaux libres, freinant ainsi la propagation des réactions radicalaires (**Rolland, 2004**). La réaction générale peut être décrite ainsi :



- AH correspond à la molécule antioxydante
- A[•] désigne un radical libre

Une molécule AH est qualifiée d'antioxydant lorsque le radical qu'elle génère ($A\bullet$) se révèle être plus stable. La stabilité accrue de ce radical peut être expliquée par sa conversion éventuelle en composés non-radicalaires, selon la réaction suivante **(Rolland, 2004)** :



-A' représente un second radical libre.

III.2.2.2. Antioxydants secondaires ou préventifs (Type II)

Les antioxydants secondaires interviennent en empêchant directement la formation de radicaux libres par divers mécanismes. L'un des principaux modes consiste à inhiber la décomposition des hydroperoxydes en composés radicalaires, par exemple en les transformant en alcools. Des substances comme les thiols (glutathion, acides aminés soufrés) et les disulfures sont particulièrement efficaces dans ce rôle **(Rolland, 2004)**.

En outre, cette catégorie inclut des chélateurs de métaux pro-oxydants tels que le fer et le cuivre. Des composés comme l'acide citrique, l'acide phosphorique et les lécithines réduisent l'effet pro-oxydant des ions métalliques en formant des complexes stables. Par ailleurs, d'autres substances telles que les carotènes protègent contre les rayons UV, et l'acide ascorbique agit comme séquestrant de l'oxygène **(Rolland, 2004)**.

Les flavonoïdes font également partie des antioxydants secondaires, grâce à leur capacité à piéger les radicaux libres et à chélater les métaux pro-oxydants **(Ramdaoui et Rouahi, 2022)**.

III.2.2.3. Antioxydants de type III

Cette troisième catégorie regroupe des facteurs environnementaux qui exercent un effet antioxydant en modifiant les conditions du milieu. Parmi ces facteurs figurent le potentiel redox, la température, la pression partielle de l'oxygène ainsi que l'intensité lumineuse. Ces variables influencent le déroulement des réactions d'oxydation.

L'efficacité des antioxydants peut être optimisée par l'association d'antioxydants de type I et II, permettant d'agir simultanément sur les phases d'initiation et de propagation de l'oxydation des lipides **(Ramdaoui et Rouahi, 2022)**.

III.2.3. Selon la nature chimique

III.2.3.1. Les antioxydants synergiques

Les antioxydants synergiques sont des substances qui, individuellement, ont une activité limitée en tant qu'antioxydants, mais dont l'efficacité se manifeste surtout en association avec d'autres antioxydants. C'est le cas des lécithines, des acides citrique et tartrique, des acides aminés et de certains flavonoïdes. Leurs propriétés sont souvent expliquées par leur capacité à chélater des métaux tels que le fer ou le cuivre, connus pour agir comme catalyseurs de l'oxydation à faible concentration. Certains composés inhibent la dégradation des hydroperoxydes, tandis que d'autres semblent favoriser la régénération d'antioxydants comme les tocophérols ou les dérivés de l'acide ascorbique à partir de leurs formes oxydées. Parmi ces synergistes, les lipoaminoacides se distinguent par leur potentiel usage en cosmétologie. Par ailleurs, le glutathion a également été proposé comme ingrédient dans diverses formulations cosmétiques (Cheriet, 2017).

III.2.3.2. Les antioxydants naturels

Dans le domaine de l'industrie alimentaire, le recours aux antioxydants naturels représente une avancée relativement récente, datant du début des années 1980. Ces composés sont apparus comme des alternatives aux antioxydants synthétiques et sont aujourd'hui largement préférés par les consommateurs (Pelli et Lyly, 2003). Diverses substances biologiques peuvent prendre le rôle d'antioxydants *in vivo*, notamment le bêta-carotène, l'albumine, l'acide urique, les œstrogènes, les polyamines, les flavonoïdes, l'acide ascorbique, les composés phénoliques et la vitamine E. Ces molécules favorisent la stabilisation des membranes en réduisant leur perméabilité et ont aussi la faculté de se lier aux acides gras libres.

Les antioxydants naturels se retrouvent dans presque toutes les plantes, les micro-organismes, les champignons et même dans les tissus animaux. Parmi eux, les tocophérols (vitamine E), les flavonoïdes et autres composés végétaux constituent le groupe le plus remarquable (Pelli et Lyly, 2003). Ils composent déjà une source précieuse de molécules exploitables à des fins pharmacologiques. Malgré leurs propriétés intéressantes, nombre de ces substances se limitent encore à un usage non médicamenteux ne nécessitant pas de prescription médicale. Les applications cosmétiques, énergétiques et anti-âge de ces produits naturels leur confèrent une réputation grandissante. De plus, certaines recommandations diététiques privilégient une consommation accrue d'aliments riches en ces agents antioxydants pour des bienfaits préventifs ou thérapeutiques (Cheriet, 2017).

III.2.3.3. Les antioxydants synthétiques

Élaborés principalement en laboratoire à partir de substances chimiques (**Pelli et Lyly, 2003**), sont largement utilisés dans l'industrie alimentaire en raison de leur efficacité élevée, de leur faible coût et de leur disponibilité accrue. Comparés à leurs homologues naturels, ils offrent une solution pratique pour prévenir l'oxydation et ralentir le processus de rancissement des aliments riches en lipides. Ils sont intégrés dans diverses formulations, incluant des matières grasses insaturées ou des phases aqueuses contenant des extraits végétaux riches en oxydases (**Cheriet, 2017**).

Face à l'instabilité souvent associée aux antioxydants d'origine naturelle, les composés synthétiques comme :

- Le butylhydroxyanisole (BHA).
- Le butylhydroxytoluène (BHT).
- Le gallate de propylée (PG).
- Tetra-butylhydroquinone (TBHQ)

Sont privilégiés pour offrir une meilleure stabilité aux produits. Depuis leur introduction dans les aliments en 1954, ces additifs figurent parmi les plus couramment employés pour protéger les matières grasses (**Amrane et Dib, 2021**).

Cependant, malgré leur puissante capacité antioxydante, une utilisation excessive de ces substances peut poser des risques pour la santé humaine. Certaines études ont montré que le BHA pourrait transformer certains aliments ingérés en produits toxiques ou cancérogènes en augmentant l'activité des enzymes microsomaux du foie et d'autres organes extra-hépatiques. Par ailleurs, le BHT a été associé à des effets cancérogènes chez le rat (**Amrane et Dib, 2021**). Ces préoccupations sanitaires, couplées à un intérêt croissant des consommateurs pour des produits plus naturels, ont conduit à une recherche accrue de nouvelles sources d'antioxydants naturels (**Cheriet, 2017**).

III.3. L'effet des antioxydants sur la santé

III.3.1. Les effets bénéfiques des antioxydants sur la santé

Le stress oxydant avait un réel impact négatif sur la santé, notamment par la favorisation de la survenue de pathologies telles que l'athérosclérose, le cancer, le diabète de type 2, les maladies neurodégénératives et les maladies rhumatismales. Ainsi, il est légitime de penser que si l'on supplémente la population en antioxydants, toutes ces pathologies pourraient tendre à disparaître.

Le régime méditerranéen riche en fruits et légumes a démontré ses effets sur le système cardiovasculaire. Une des hypothèses avancées pour justifier ce mécanisme protecteur est la richesse en antioxydants des fruits et légumes. En effet, de nombreuses études conseillent une alimentation variée riche en fruits et légumes afin de prévenir l'apparition de nombreuses pathologies, notamment les cancers, les maladies cardio-vasculaires et le diabète de type 2.

Certaines études confèrent également un rôle important aux polyphénols dans ses effets bénéfiques, ceci étant lié au caractère antioxydant de ces molécules (**Guilloty, 2016**). Les Composés phénoliques sont des antioxydants exogènes jouent un rôle de protection des plantes contre les invasions microbiennes, et présentent d'autres mécanismes d'action de lutte contre les champignons bactéries et virus, ces propriétés antifongiques et antivirales trouvent de nombreuses applications en médecine humaine (**Figure 08**) (**Xia et al., 2011**). Les polyphénols devenus aussi des molécules préférées des nutritionnistes, des épidémiologistes, des industries de l'agroalimentaire et des laboratoires pharmaceutiques et cosmétiques, sont présentent d'autre activités anti-inflammatoire et antiviral et en particulier anti-HIV (**Zakkad, 2017**).

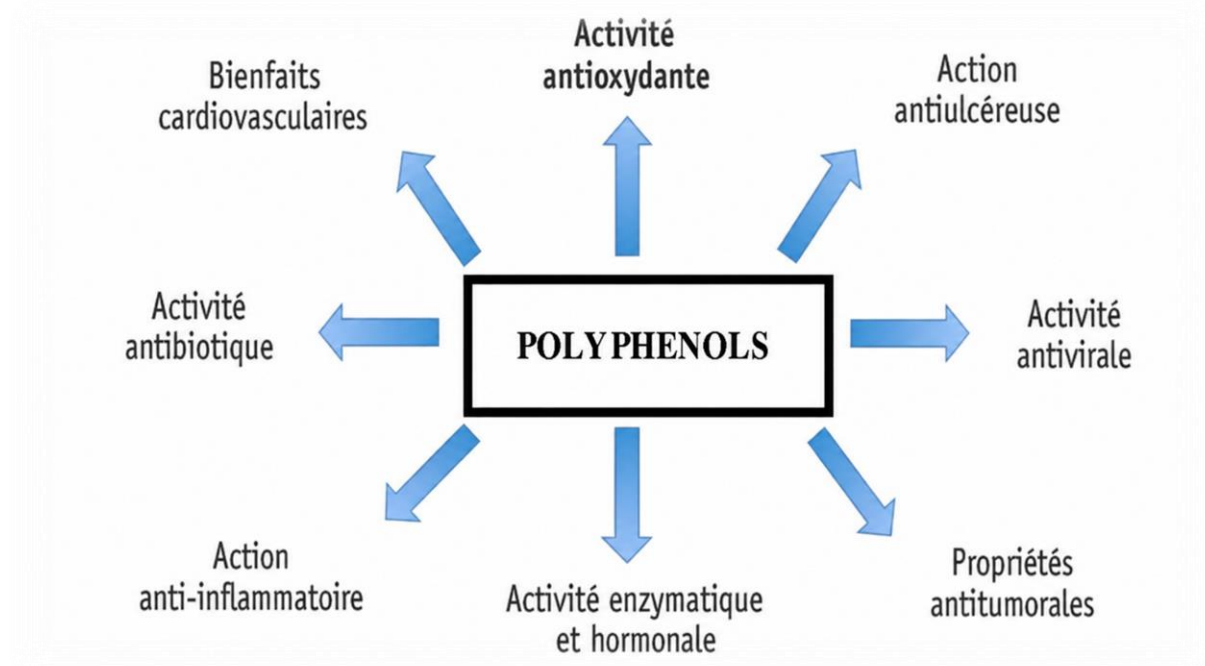


Figure 08: Effet biologiques des polyphénols.

III.3.2. Effets néfastes des antioxydants sur la santé

Par ailleurs, les antioxydants sont, à raison, très largement utilisés dans l'industrie agroalimentaire et cosmétologique à des fins de conservateurs. Le réservoir naturel de ces substances en fait un matériel quasi inépuisable, il s'agit pour la plupart de molécules naturelles ou hémisynthétiques. Cependant une certaine prudence est de mise quant à l'utilisation de ces substances. Il ressort de certaines études un pouvoir potentiellement délétère de ces produits s'ils sont utilisés de façon excessive ou inappropriée. Récemment, de nombreux scandales ont émergés car les antioxydants puissants utilisés ont présenté un éventuel pouvoir cancérigène ainsi que de possible troubles hormonaux. Un cadre de réglementation est donc nécessaire afin d'encadrer plus strictement leur utilisation (Desmier, 2016).

IV. Les composés phénoliques

IV.1. Définition et localisation

Les composés phénoliques sont des métabolismes secondaires de la plante qui sont des déterminants importants de la qualité sensorielle et nutritionnelle des fruits, légumes et autres plants.

Les polyphénols forment le groupe des composés organiques phytochimiques le plus important dans le royaume des végétaux avec plus de 8000 structures phénoliques présentes dans tous les organes de la plante (**Seliamia et al., 2019**). Les polyphénols sont des produits résultant de la condensation de molécules d'acétylcoenzyme A et l'acide amine de phénylalanine. Cette biosynthèse permet la formation d'une grande diversité de molécules qui sont spécifiques pour chaque d'une espèce végétale, d'un organe et d'un tissu particulier (**Laouini., 2014**).

Dans la cellule, les composés phénoliques sont essentiellement localisés sous forme soluble dans les vacuoles. Ils peuvent également s'accumuler dans les parois végétales : c'est le cas de la lignine (hétéropolymère d'alcools coniférylique, p-coumarylique et sinapylique) ou de certains flavonoïdes (**Robards et al., 1999**).

IV.2. Classification des métabolites secondaires

Les métabolites secondaires se classent selon différents critères : leur structure chimique (présence de cycles ou de sucres), leur composition (avec ou sans azote), leur solubilité dans divers solvants ou encore la voie métabolique par laquelle ils sont synthétisés. On les regroupe en trois grandes catégories chimiques : les composés phénoliques, les alcaloïdes et les terpénoïdes. Parmi ces catégories, les polyphénols représentent une diversité importante de composés bioactifs, jouant un rôle clé dans de nombreux processus d'interactions, allant de la symbiose à la résistance des plantes face aux maladies (**Tiwari et Rana, 2015 ; Pham, 2017**).

IV.2.1. Les composés phénoliques

Les composés phénoliques sont des micronutriments naturels essentiels présents dans les plantes. Ils constituent une catégorie majeure de composés physiologiques jouant un rôle clé dans le métabolisme végétal. Parmi eux, les polyphénols représentent le groupe chimique le plus important du règne végétal, avec plus de 8 000 structures différentes identifiées à ce jour. On trouve ces composés dans divers aliments et parties de plantes, notamment les fruits, légumes, noix, graines, racines, écorces, feuilles, ainsi que dans des herbes, produits céréaliers complets, aliments transformés, le thé et le café (**Gorzynik-Debicka et al., 2018 ; Silva et al., 2020**).

Les composés phénoliques possèdent une grande variété d'activités biologiques bien documentées. Parmi celles-ci figurent leurs propriétés antioxydantes, antimutagènes, anticancérogènes, antiprolifératives et anti-estrogéniques. En outre, il a été démontré que ces

biométabolites jouent un rôle crucial dans la défense des plantes contre divers types de stress (Fadel *et al.*, 2011).

IV.2.1.1. Classification des composés phénoliques

Les composés phénoliques sont des métabolites secondaires issus de la voie du shikimate et du métabolisme des phénylpropanoïdes. Ces substances, présentes dans toutes les plantes, se caractérisent par la présence d'au moins un noyau aromatique de type benzène, assorti d'un ou plusieurs groupements hydroxyles. Selon leur structure, ils peuvent être relativement simples, comme c'est le cas des acides phénoliques, ou bien fortement polymérisés, à l'exemple des tanins condensés (Figure 09) (Laguna, 2019).

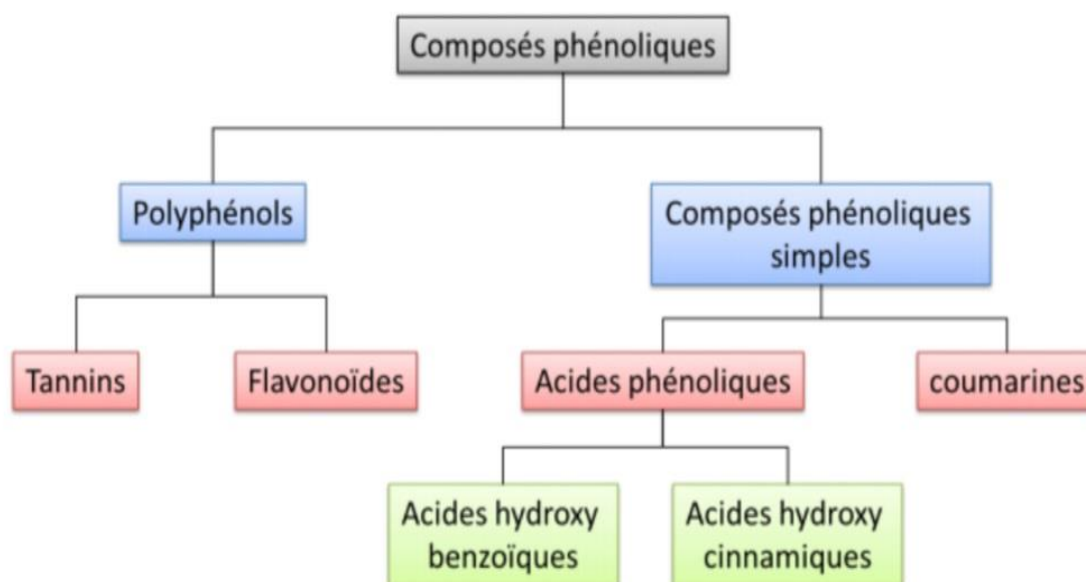


Figure 09 : Classification simplifiée des composés phénoliques (Laguna, 2019).

a) Les acides phénoliques

Également appelés acides-phénols, sont des composés omniprésents dans tous les fruits et légumes. Ils constituent les principaux types de polyphénols présents dans notre alimentation. On peut les diviser en deux grandes catégories : les dérivés de l'acide benzoïque (C6-C1) et ceux de l'acide cinnamique (C6-C3) (Figure 10) (Matou, 2019).

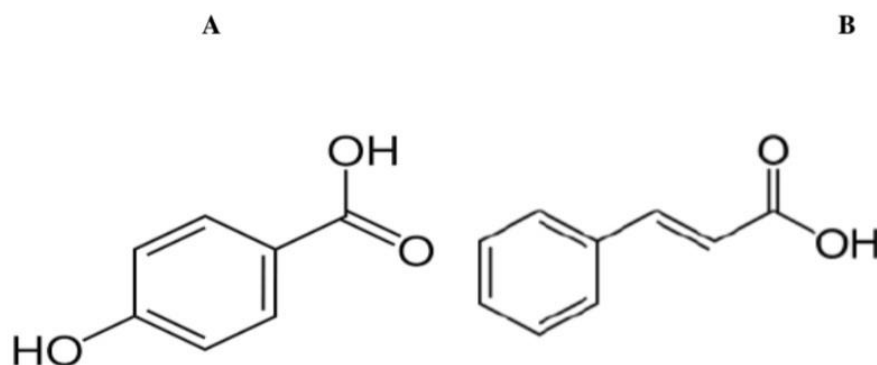


Figure 10: Structure chimique de l'acide phénolique : l'acide de hydroxybenzoïque (A) et Hydroxycinnamique (B) (Călinoiu *et al.*, 2018).

b) Les flavonoïdes

Représentent un vaste groupe de plus de 6 000 composés naturels, presque omniprésents chez les plantes vasculaires. Ils sont les pigments responsables des teintes jaune, orange et rouge observées dans divers organes végétaux (Ghedira, 2005).

Sur le plan chimique, les flavonoïdes possèdent une structure de type C6-C3-C6, constituée de deux cycles benzéniques reliés par une chaîne à trois atomes de carbone formant un hétérocycle oxygéné. Ces composés se répartissent en six classes principales : flavonols, flavanols, flavanones, isoflavones, flavones et anthocyanidines. Ces différentes catégories se distinguent en fonction du degré d'oxydation et du modèle de substitution du cycle C (Benslama, 2020).

Selon Lahouel *et al.* (2004), divers travaux ont mis en évidence le rôle clé des flavonoïdes dans la neutralisation des radicaux libres. Cette famille de substances présente un potentiel significatif pour réduire la toxicité des radicaux libres grâce à leur structure chimique, laquelle permet de les piéger en neutralisant ces radicaux via la fixation de deux atomes d'hydrogène provenant de deux fonctions thiols (Figure 11).

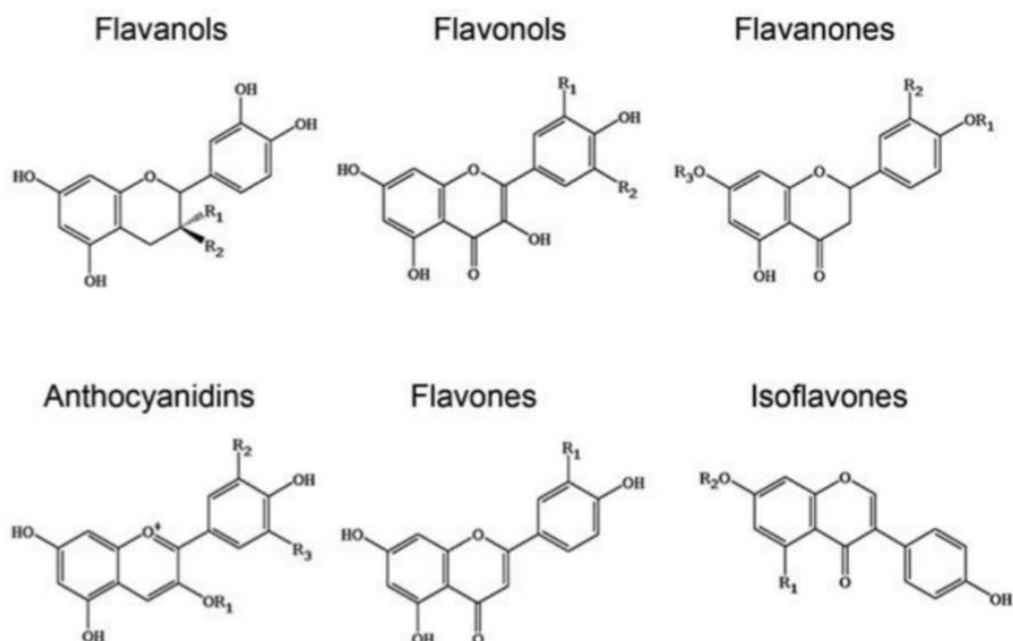


Figure 11 : Classes de flavonoïdes (Abotaleb *et al.*, 2019).

c) Les tanins

Les tanins constituent un groupe extrêmement complexe de métabolites secondaires présents dans les végétaux. Appartenant à la classe des polyphénols, ils se retrouvent dans diverses familles botaniques. Leur localisation varie selon les espèces : on peut les trouver dans les fruits, les écorces et les feuilles. Ces molécules sont caractérisées par une structure complexe composée d'unités monomériques répétitives, souvent qualifiées de polymères naturels (Permal, 2017).

- Les tanins hydrolysables

Ce type de tanins est appelé hydrolysable en raison de leur sensibilité à l'hydrolyse chimique ou enzymatique. Ils résultent d'une estérification d'un glucide, généralement le glucose, par l'acide gallique. Cette particularité est particulièrement notable dans le cas des tanins galliques (Zeghad, 2018).

- Les tanins condensés

Les tanins condensés, aussi connus sous le nom de proanthocyanidines ou tanins catéchiques, sont des polyphénols issus de la polymérisation d'unités monomériques de flavan-3-ol. Leur

structure chimique repose sur un système d'hétérocycles (Manolaraki, 2011 ; Theophile, 2017) (Figure 12).

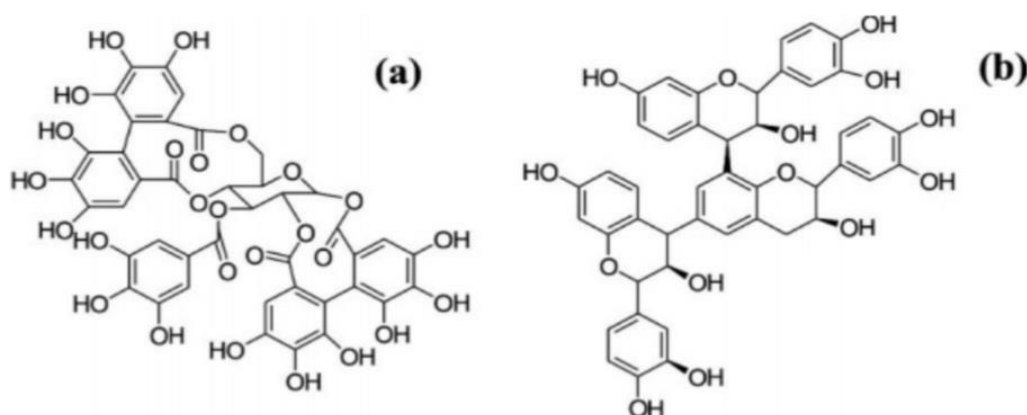


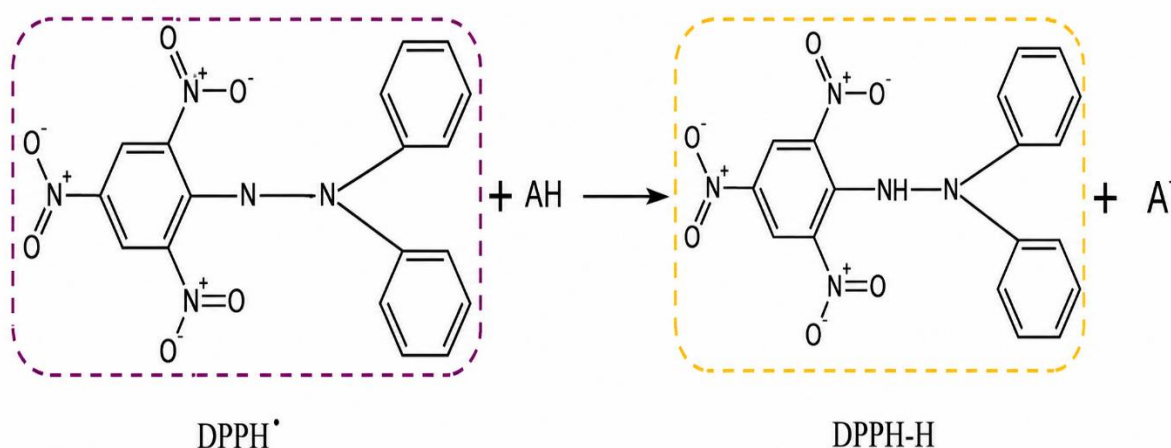
Figure 12 : Structure chimique des tanins hydrolysables(a) et condensés(b) (Bayart, 2019).

V. Méthode de recherche de l'activité antioxydante

L'activité antioxydante des molécules peut être mesurée soit par des études *in vivo*, soit par des essais *in vitro*. Dans le cadre de ces derniers, de nombreuses approches sont disponibles pour évaluer l'activité antioxydante des plantes. La plupart de ces méthodes reposent généralement sur un changement de coloration ou une décoloration d'un réactif spécifique lorsqu'il interagit avec un agent antioxydant, reflétant ainsi sa capacité à résister aux processus d'oxydation (Hammoudi, 2015 ; Brahimi et Terrai, 2018 ; Righi et Boukhalat, 2021).

V.1. La méthode DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl)

Développée par BLOIS en 1958, utilise un spectrophotomètre pour évaluer la réduction du radical DPPH[•]. Cette réduction provoque un changement de couleur, passant du violet du radical libre au jaune de sa forme non radicalaire, DPPH-H (2,2 Diphenyl 1 picryl hydrazine), comme illustré à la Figure 13. Ce processus se déroule en présence d'un antioxydant capable de donner des hydrogènes (AH) et est mesuré à une longueur d'onde de 517 nm. La capacité de réduction est évaluée par une diminution de l'absorbance due aux substances antiradicalaires, comme décrit par Majhenič *et al.* (2007) et Hammoudi (2015).



Figures 13: Mécanisme réactionnel intervenant lors du test DPPH entre l'espèce radicalaire DPPH[•] et un antioxydant (AH) (Michel, 2011).

V.2 Test de FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power)

La méthode FRAP repose sur la capacité d'un antioxydant (AH) à réduire l'ion ferrique (Fe³⁺) en ion ferreux (Fe²⁺) (**Figure 14**). Cette réaction entraîne l'apparition d'une couleur bleue intense, mesurable par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 710 nm (Ou *et al.*, 2001 ; Hammoudi, 2015).

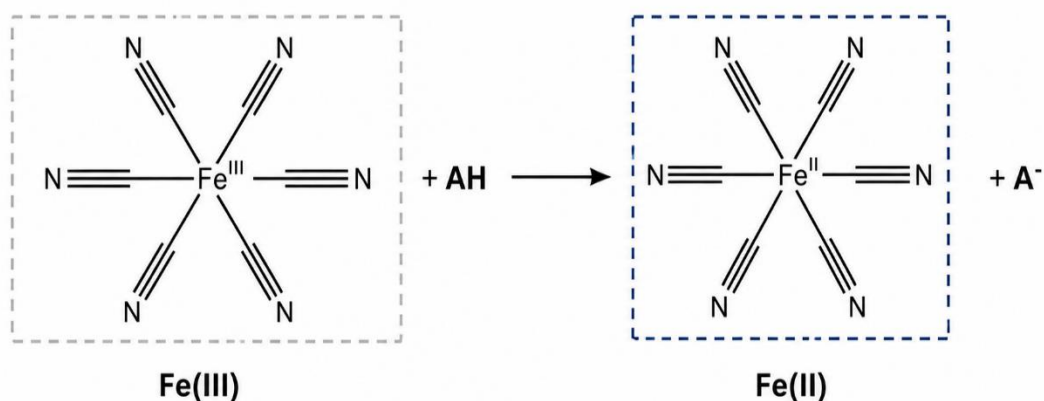


Figure 14 : Mécanisme réactionnel intervenant lors du test FRAP entre le complexe ferricyanide ferrique Fe (III) et un antioxydant (AH) (Laraba *et al.*, 2016).

V.3. Test ABTS (Acide 2,2'-azinobis (3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique))

Dans ce protocole, l'ABTS, initialement incolore, est oxydé à l'aide de persulfate de potassium ($K_2S_2O_8$) afin de générer le radical cationique $ABTS^{+\bullet}$, caractérisé par une teinte bleu-vert (**Figure 15**). L'ajout d'un composé antioxydant provoque une réduction du radical $ABTS^{+\bullet}$ en sa forme initiale, l'ABTS. L'activité antioxydante est alors évaluée en fonction de l'intensité de la coloration de la solution, qui est mesurée par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 734 nm (**Osman *et al.*, 2006 ; Moon et Shibamoto, 2009**).

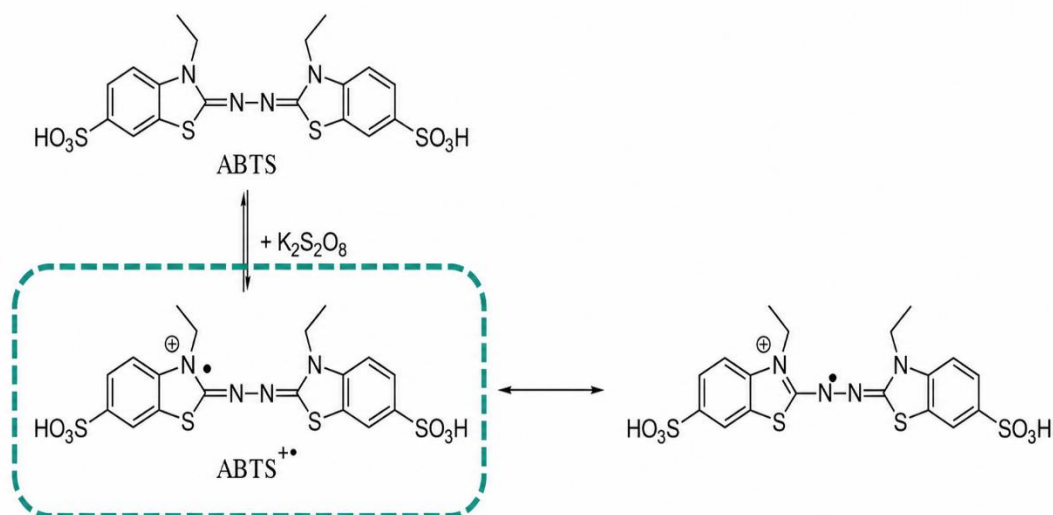


Figure 15 : Formation du radical cation $ABTS^{+\bullet}$ à partir de l'ABTS (**Sarr *et al.*, 2015**).

PARTIE II

ETUDE

EXPERIMENTAL

CHAPITRE I
MATERIEL ET
METHODES

Cette étude a été réalisée au sein du laboratoire de recherche : Microorganismes bénéfiques, aliments fonctionnels et santé (LMBAFS) de l'université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.

I. Matériel

I.1. Matériel végétal

Notre étude a été portée sur la partie aérienne (feuille) de plante médicinale *Brassica rapa L.*

I.1.1. La récolte

Le matériel végétal a été récolté dans la commune de Khadra située dans la wilaya de Mostaganem durant le mois de février 2026 à l'abri de la pollution, afin de préserver intacte la composition chimique de cette plante (**Figure 16**).



Figure 16 : Lieu de récolte de *Brassica rapa L.*

I.1.2. Lavage et conservation

Les échantillons sélectionnés sont soigneusement nettoyés et lavés à l'eau courante afin d'éliminer toute trace de poussière, de sable, de sol ou d'autres impuretés. Une fois cette étape terminée, ils sont entreposés dans un lieu sec et à l'abri de la lumière.

I.1.3. Séchage

Après la récolte et le nettoyage, les échantillons sont mis à sécher à température ambiante dans un espace bien ventilé et protégé de la lumière. Cette étape garantit :

- Une extraction optimale des composés souhaités.
- Une homogénéisation du taux d'humidité résiduelle pour faciliter un broyage plus efficace.

I.2. Matériel de laboratoire

Eprouvette graduée, Tubes à essai + support, entonnoir, Spatule, Boîte de Pétri, Spatule, bécher, papier wattman, micropipettes, embouts, flacons.

I.2. Réactifs chimiques et solvants

Solvants	Formule	Réactifs
Acide ascorbique (vit c)	$C_6H_8O_6$	DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl)
Méthanol	CH_3OH	

I.3. Appareils utilisés (Figure 17)

a) Spectrophotomètre

C'est un appareil conçu pour mesurer l'absorbance ou la transmittance de la lumière par un échantillon selon des longueurs d'onde spécifiques. Il permet d'évaluer la concentration de divers composés présents dans une solution.

b) Bain à ultrasons

Appelé aussi sonicateur, cet appareil utilise des ondes ultrasonores dont la fréquence se situe généralement entre 20 et 400 kHz. Il favorise la dissolution des produits et optimise l'extraction des composés bioactifs des matrices végétales grâce à l'action mécanique des ultrasons.

c) Centrifugeuse

Dispositif permettant, par le biais de la force centrifuge, de séparer les constituants d'un mélange en fonction de leur densité. Elle facilite ainsi la séparation entre les particules solides et le liquide.

d) Incubateur

Équipement conçu pour maintenir les échantillons à une température constante et contrôlée pendant un temps défini, favorisant certaines réactions ou assurant leur conservation dans des conditions idéales.

e) Agitateur vortex

Instrument essentiel en laboratoire permettant de mélanger rapidement et efficacement les solutions. Il crée un vortex puissant grâce à un mouvement orbital rapide appliqué à la base du tube contenant l'échantillon.

f) Agitateur magnétique

Appareil utilisé pour mélanger de manière continue et homogène des solutions à l'aide d'un barreau aimanté. Celui-ci est entraîné par un champ magnétique généré par un moteur électrique à vitesse réglable, généralement comprise entre 60 et 1200 tours par minute.

g) Balance de précision

Outil incontournable en laboratoire servant à peser des échantillons, extraits ou réactifs avec une grande exactitude, tout en minimisant les marges d'erreur lors de la pesée.



Figure 17 : Les différents appareils utilisés dans l'étude.

II. Méthode

II.1. Broyage

Les feuilles de navet (*Brassica rapa L.*) ont été délicatement séchées avant d'être réduites en une poudre fine à l'aide d'un broyeur électrique. La poudre obtenue a ensuite été stockée dans un récipient en verre hermétique, enveloppé de papier aluminium pour la protéger de la lumière, préservant ainsi les composés bioactifs et minimisant le risque de photo-oxydation.

II.2. Choix du solvant

Le choix du solvant constitue l'un des facteurs les plus importants influençant l'extraction des composés phénoliques et des molécules bioactives à partir des plantes. Des études ont montré que l'extraction assistée par ultrasons améliore l'efficacité du processus d'extraction en augmentant la pénétration du solvant dans les tissus végétaux et en favorisant la libération des composés actifs, ce qui en fait une technique efficace et économique pour l'extraction des antioxydants (**Chen et al., 2014**). Par ailleurs, il a été démontré que le méthanol est l'un des solvants les plus efficaces pour l'extraction des composés phénoliques et des flavonoïdes. Les extraits obtenus avec ce solvant présentent des teneurs élevées en ces composés ainsi qu'une activité antioxydante importante par rapport à certains autres solvants. Pour cette raison, le méthanol a été choisi comme solvant d'extraction dans la présente étude (**Mohammed et al., 2022**).

II.3. Préparation du matériel végétal

L'extraction des substances bioactives contenues dans les feuilles de navet (*Brassica rapa L.*) a été réalisée par extraction assistée par ultrasons (UAE). Dix grammes (10 g) de poudre végétale ont été pesés à l'aide d'une balance électronique de précision puis mélangés à 100 ml de méthanol à 99,7 %. La solution obtenue a été transférée dans un flacon en verre et placée dans un bain à ultrasons réglé à 40 °C pendant 60 à 90 minutes afin d'optimiser l'extraction des composés bioactifs. À l'issue de ce traitement, la solution a été répartie dans huit tubes gradués de 12,5 ml chacun ensuite soumise à une centrifugation à 4 000 tr/min pendant 10 minutes afin de séparer le surnageant du sédiment. Le surnageant récupéré a ensuite été filtré sur papier filtre Wattman n° 1.

Après filtration, l'extrait obtenu a été réparti dans trois boîtes de Pétri préalablement pesées et placé dans une étuve réglée à 40 °C pendant 48 heures, à l'abri de la lumière, afin d'assurer l'évaporation complète du solvant et le séchage de l'extrait. Après séchage, les boîtes de Pétri contenant l'extrait, ont été pesées (**Figure 18**).

III.3. Rendements des extraits

L'extraction des plantes étudiées, nous a permis de déterminer les rendements de leurs extraits.

L'extrait a été quantifié selon la formule suivante :

$$\mathbf{R\% = PE / PMV * 100}$$

R : rendement

PE : poids de l'extrait sec (g)

PMV : poids de matière végétale (g)

(Figure 18).

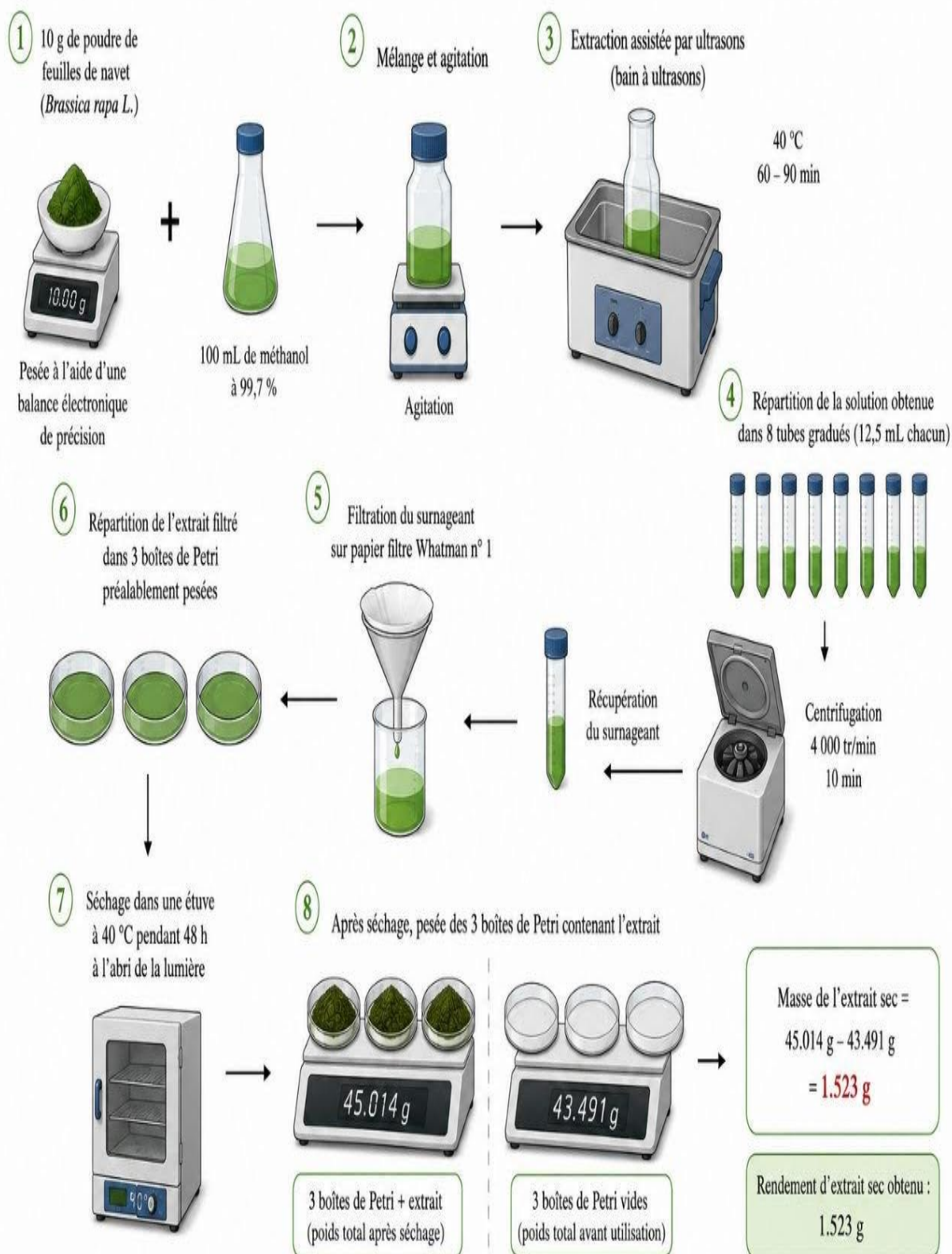


Figure 18 : Détermination du rendement des extraits étudiés.

Activité antioxydante

1. Le teste de piégeage du radical DPPH

Le radical libre DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle) est un outil couramment employé pour évaluer l'activité antioxydante en raison de sa simplicité d'utilisation, de sa rapidité et de son coût abordable (Hadbaoui, 2012) (Figure 19).

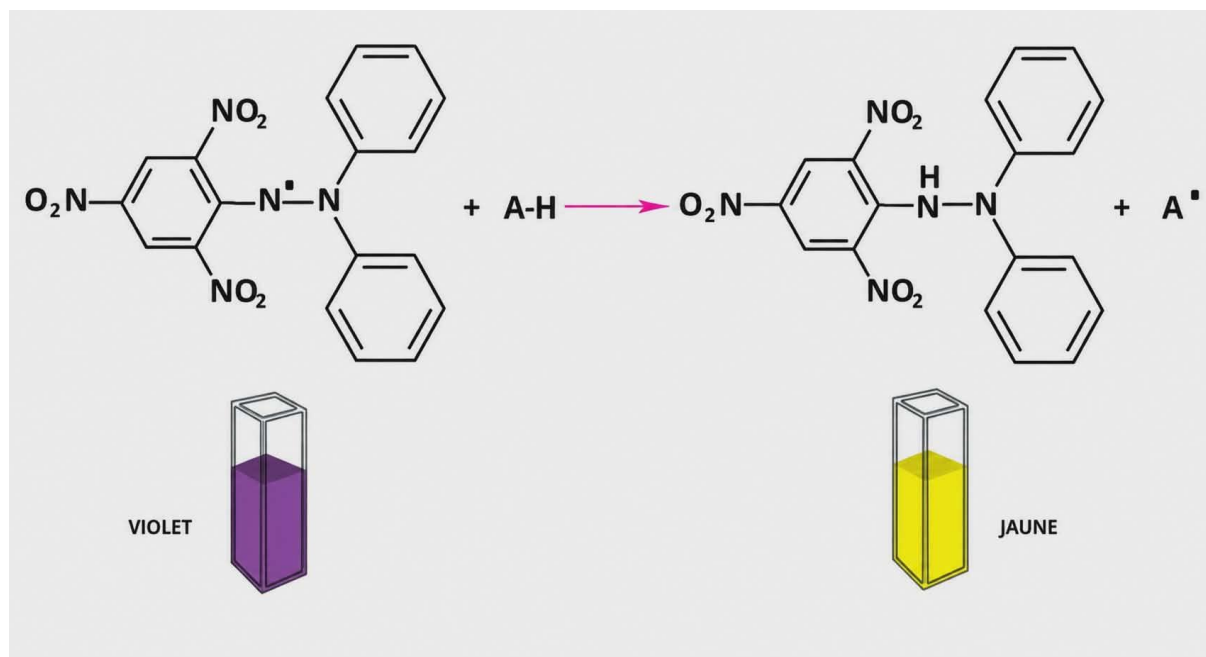


Figure 19: Mécanisme de réduction du radical libre DPPH (Benyoucef, 2020).

Mode opératoire

Préparation du DPPH

Le teste a été réalisé selon la méthode de (Blois, 1958). Une quantité de 4mg de DPPH a été dissoute dans un volume de 100 ml méthanol pure (CH_3OH) et mélangé pendant 30 min à l'abri de la lumière pour obtenir une solution de DPPH.

Préparation d'une solution mère et des dilutions

7,3 g d'extrait est dissout dans 7,3ml de méthanol (CH_3OH), à partir de cette concentration ; on prépare 5 tubes moins concentré que le premier et un tube contenant seulement la solution de DPPH (contrôle négatif) ; on prépare (100 ; 50 ; 25 ; 12,5 ; 6,25) en ajoutant 1 ml de DPPH en chaque tube et mélangé par vortex.

Le mélange obtenu est ensuite gardé à l'abri de lumière à température ambiante pendant 30 min, la lecture de la densité optique à 517 nm par spectromètre (**Figure 19**).

- **Calcul des pourcentages d'inhibition**

$$I (\%) = [(A \text{ cont} - A \text{ éch}) / A \text{ cont}] \times 100$$

I (%) : Pourcentage d'inhibition.

A cont : Absorbance du contrôle négatif.

A éch : Absorbance du l'échantillon testé.

- **Calcul des IC50**

Selon **Dupont (2010)** la concentration inhibitrice médiane IC50 constitue un indicateur de l'efficacité d'un inhibiteur à réduire une activité biologique ou biochimique spécifique. Elle correspond à la concentration nécessaire pour atteindre 50 % d'inhibition de l'activité ciblée. Dans le cadre du test du radical libre DPPH, la CI50 représente la concentration d'un extrait permettant de générer une inhibition de 50 % du radical DPPH. Elle est calculée graphiquement à partir des régressions logarithmiques reliant les pourcentages d'inhibition aux différentes concentrations des extraits analysés. Un extrait est considéré comme ayant une activité antioxydante supérieure lorsqu'il présente une valeur de CI50 plus faible.

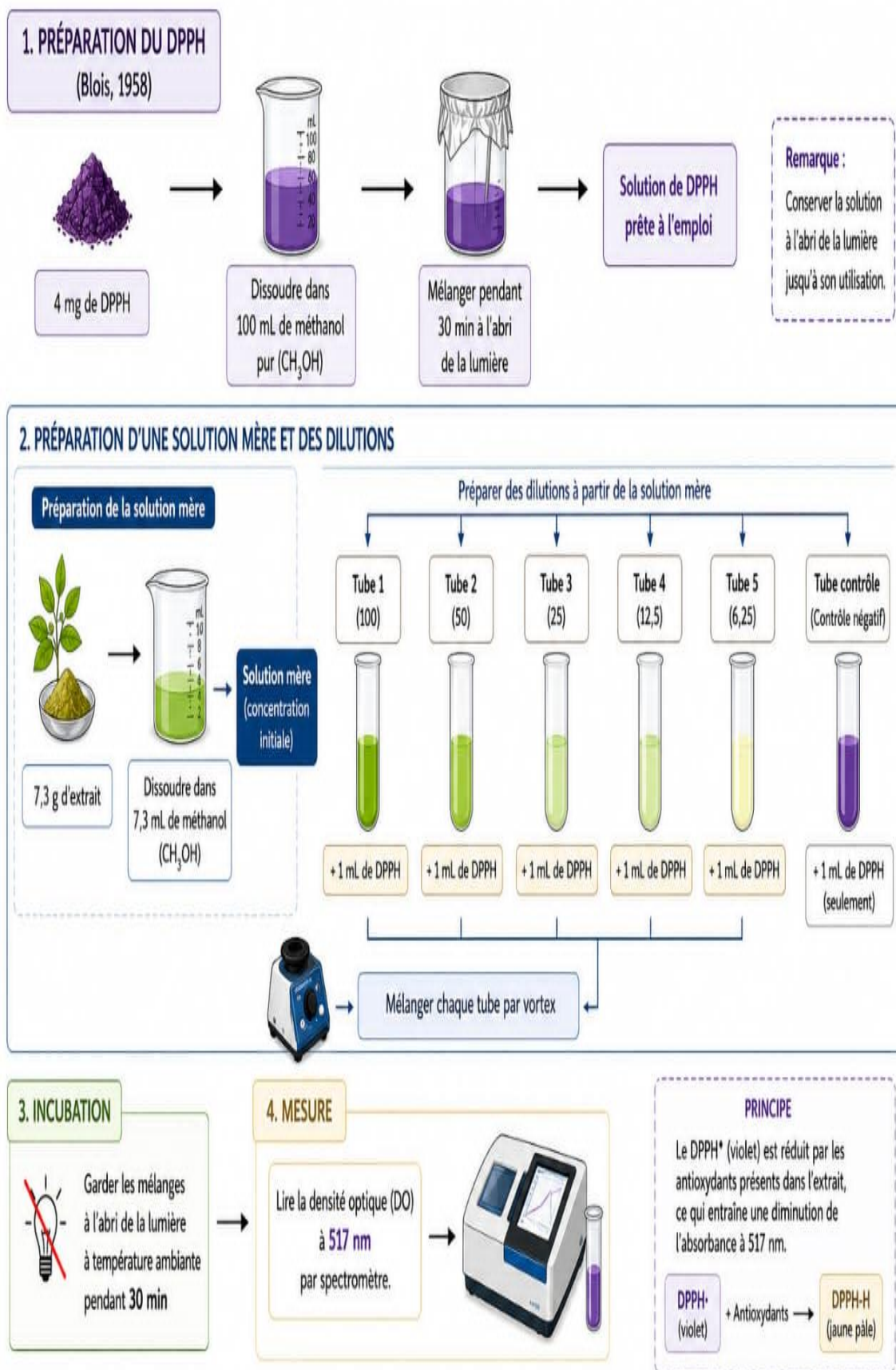


Figure 19 : Test du piégeage des radicaux libres par DPPH.

• Calcul des IC50

Selon **Dupont (2010)** la concentration inhibitrice médiane IC50 constitue un indicateur de l'efficacité d'un inhibiteur à réduire une activité biologique ou biochimique spécifique. Elle correspond à la concentration nécessaire pour atteindre 50 % d'inhibition de l'activité ciblée. Dans le cadre du test du radical libre DPPH, la CI50 représente la concentration d'un extrait permettant de générer une inhibition de 50 % du radical DPPH. Elle est calculée graphiquement à partir des régressions logarithmiques reliant les pourcentages d'inhibition aux différentes concentrations des extraits analysés. Un extrait est considéré comme ayant une activité antioxydante supérieure lorsqu'il présente une valeur de CI50 plus faible.

Courbe d'étalonnage de l'acide ascorbique

Des solutions d'acide ascorbique (vitamine C) à différentes concentrations sont préparées, en suivant un protocole uniforme pour chaque échantillon. Un spectrophotomètre UV-visible, réglé à une longueur d'onde de 517 nm, est utilisé pour l'analyse des résultats (**Figure 20**).

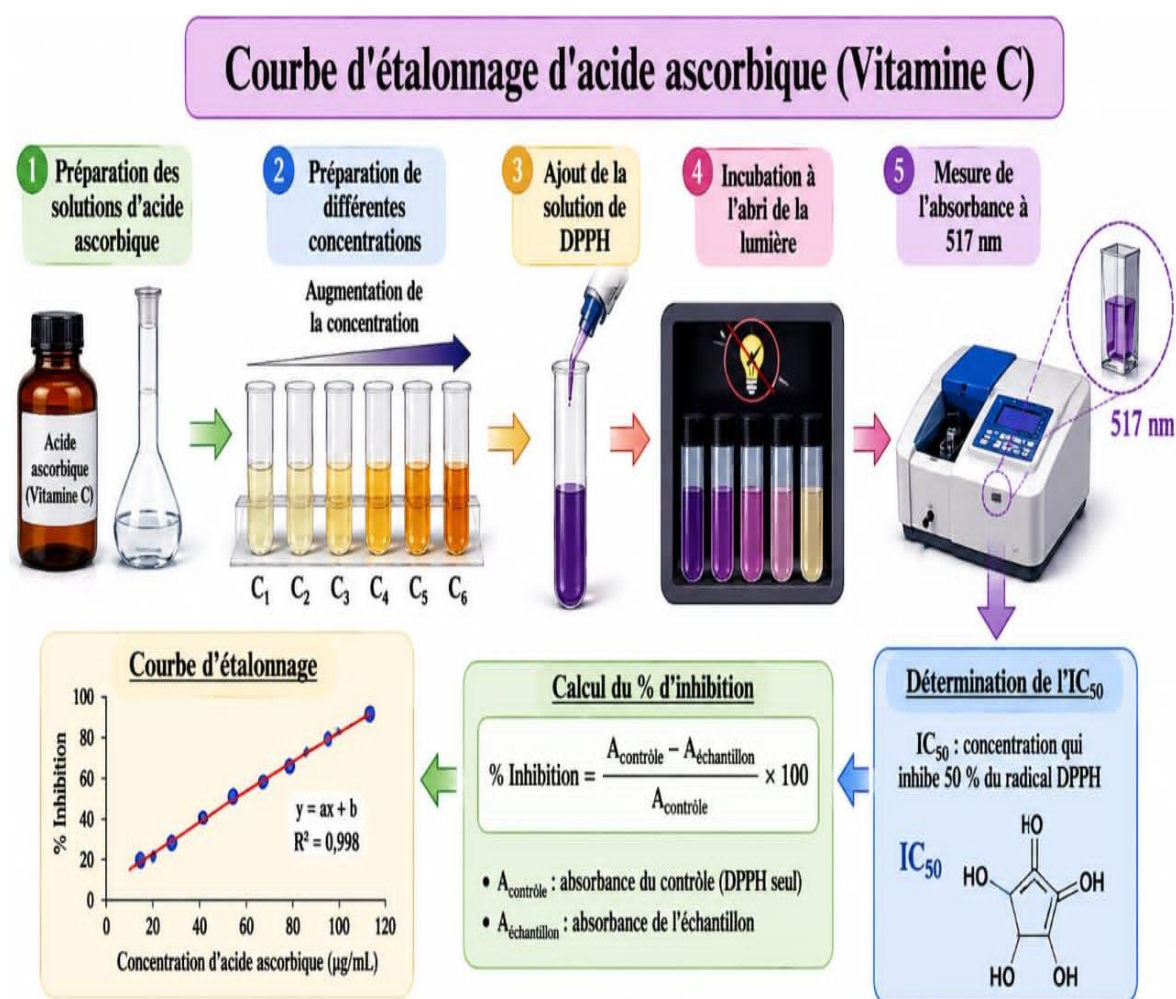


Figure 20 : Courbe d'étalonnage de l'acide ascorbique.

CHAPITRE II
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

I. Résultats

- Le rendement d'extraction

- Les valeurs obtenues sont représentées dans le tableau

La plante	PMV (g)	PE (g)	R (%)
<i>Brassica rapa L.</i>	10	1,523	15,23

Tableau : Rendement d'extraction par méthanol.

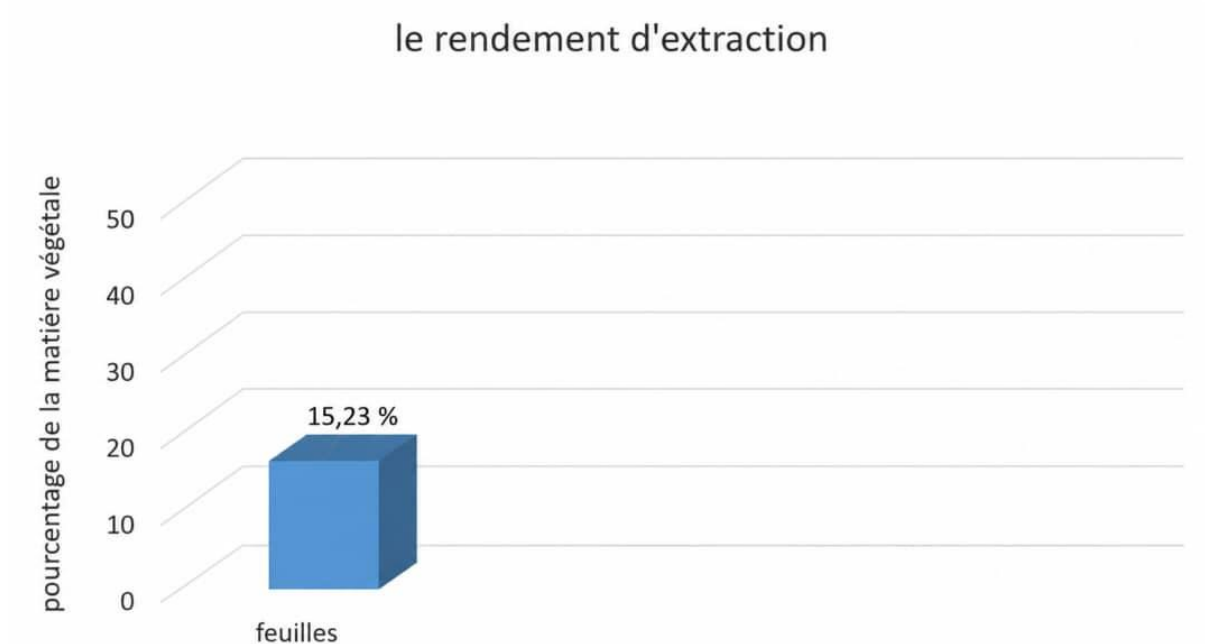


Figure 21 : Rendement d'extraction de la plante *Brassica rapa L.*

Le rendement d'extraction obtenu pour les feuilles de *Brassica rapa L.* a été évalué à 15,23 %, une valeur qui s'aligne avec celles mentionnées dans diverses études consacrées aux espèces du genre *Brassica*. **Mishra et al. (2022)** ont en effet démontré que les extraits méthanoliques des feuilles de cette plante sont particulièrement riches en composés bioactifs et que les résultats d'extraction dépendent étroitement des conditions expérimentales utilisées. De plus, **Rauf et al. (2018)** ont mis en évidence l'importance de la polarité du solvant dans l'efficacité de l'extraction des composés antioxydants, en soulignant que le méthanol figure parmi les solvants les plus performants. Toutefois, le rendement obtenu dans cette étude reste inférieur à celui rapporté par **Ould Yerou et al. (2022)**, qui avaient atteint un rendement de 24 % pour l'extrait méthanolique de *Brassica rapa L.* Cette divergence peut s'expliquer par plusieurs paramètres, tels que la nature et l'origine du matériel végétal, le stade de croissance de la plante, la concentration de méthanol utilisé, le rapport solide-liquide, la durée d'extraction ou encore la technique appliquée lors du processus d'extraction.

II. Résultats d'activité antioxydant par DPPH

Selon **Wootton-Beard et al. (2011)**, il s'agit d'un radical libre stable de couleur violette, caractérisé par une absorption maximale à 517 nm dans le spectre UV-visible. **Floegel et al. (2011)** ont souligné que le DPPH figure parmi les premiers radicaux libres utilisés pour explorer les liens entre la structure chimique des composés phénoliques et leur activité antioxydante. De leur côté, **Popovici et al. (2009)** ont mis en évidence que ce radical possède un électron non apparié délocalisé sur un atome d'azote, ce qui lui confère une stabilité élevée à température ambiante tout en empêchant la formation de dimères. **Hadbaoui (2012)** a précisé que la méthode repose sur la réduction du DPPH par des molécules antioxydantes capables de donner un électron ou un atome d'hydrogène, engendrant ainsi le composé DPPH-H (2,2-diphényl-1-picrylhydrazine). Cette réaction entraîne un changement de couleur du violet au jaune, accompagné d'une réduction de l'absorbance à 517 nm, mesurée par spectrophotométrie UV-visible. Par ailleurs, **Benyoucef (2020)** a noté que la baisse de l'absorbance est proportionnelle à la quantité de substances antiradicalaires présentes, reflétant ainsi le potentiel antioxydant des extraits analysés.

L'activité antioxydante de l'extrait méthanolique des feuilles de *Brassica rapa L.* a été mesurée à l'aide de la méthode basée sur le radical libre DPPH, introduite pour la première fois par **Blois en 1958**. Cette technique repose sur la capacité des composés antioxydants à convertir le radical violet DPPH[•] en sa forme réduite jaune, DPPH-H, entraînant ainsi une diminution de l'absorbance à 517 nm.

Selon **Brand-Williams et al. (1995)**, la baisse de l'absorbance reflète la faculté de l'échantillon à céder des électrons ou des atomes d'hydrogène aux radicaux libres, offrant une estimation précise du potentiel antioxydant de l'échantillon. Le pourcentage d'inhibition (%I) a été calculé pour chaque concentration testée à partir de la formule décrite par ces auteurs. Toutes les analyses ont été menées en triplicata afin de garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats (**Figure 22, 23**).

Le niveau d'activité antioxydante est généralement exprimé par une valeur IC₅₀, représentant la concentration nécessaire pour inhiber 50 % des radicaux libres DPPH[•] présents dans le milieu de réaction. Une faible valeur d'IC₅₀ indique une activité antioxydante importante, tandis qu'une valeur élevée reflète une activité moindre. La détermination de l'IC₅₀ a été réalisée graphiquement, en traçant la courbe du pourcentage d'inhibition en fonction des concentrations testées. Les performances obtenues ont été comparées à celles de l'acide ascorbique, utilisé comme standard de référence en matière d'antioxydants **Molyneux (2004)**.

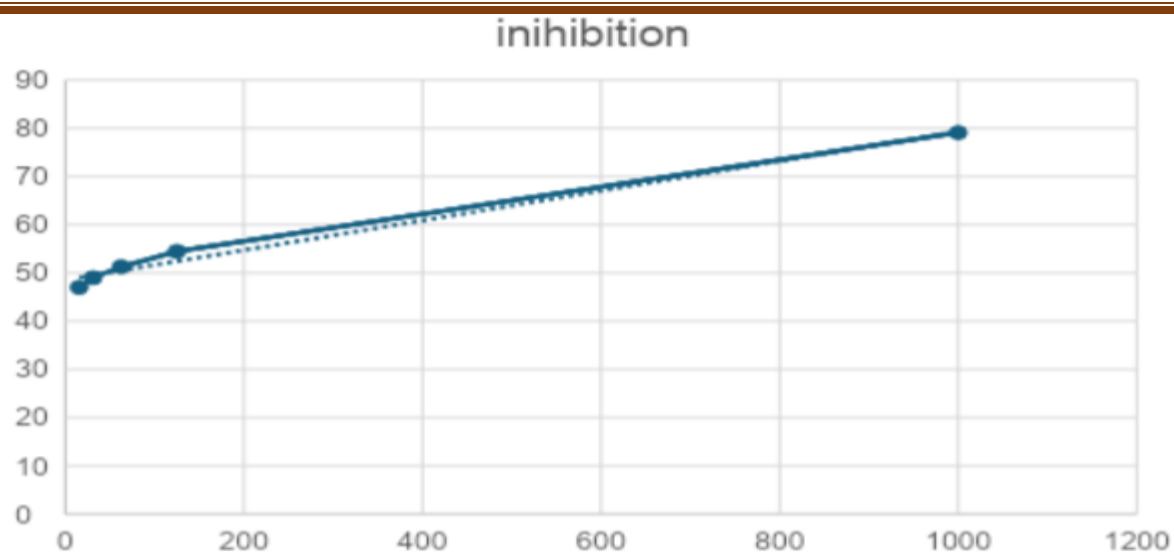


Figure 22 : Activité antioxydante de *Brassica rapa* L. par la méthode du DPPH.

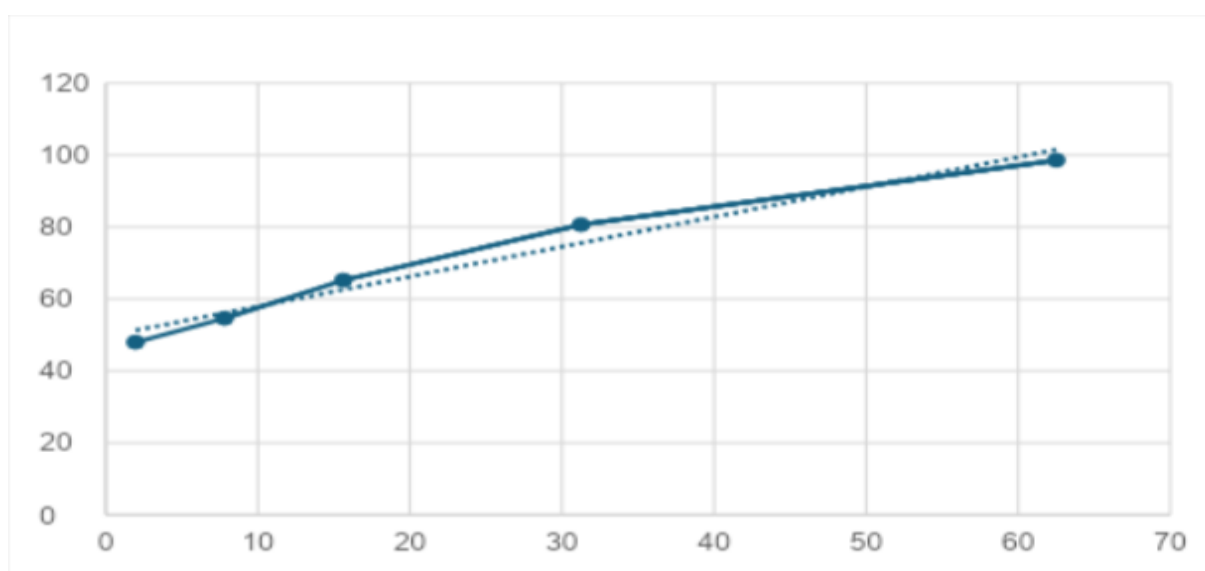


Figure 23 : Activité antioxydante de l'acide ascorbique par méthode de DPPH

• Discussion

Environ 30 à 40 % des cancers sont liés à une alimentation déséquilibrée et à d'autres facteurs corrélés (**Czapski, 2009**). Des études épidémiologiques établissent un lien direct entre la consommation de fruits et légumes et une diminution de la mortalité par cancer, maladies cardiovasculaires et autres maladies dégénératives (**Art and Hollmam, 2005 ; Vita , 2005**). De nombreux légumes de la famille des crucifères sont consommés en grande quantité dans le monde entier.

Les légumes de l'espèce *Brassica rapa* sont le navet, le chou chinois et le pak choi (**Cartea et al., 2011**). Ces espèces végétales regorgent de métabolites secondaires importants tels que les glucosinolates, l'acide folique, la vitamine C, le sélénium, les caroténoïdes et les composés phénoliques (**Howard et al., 1997 ; Fimognari et al., 2002**), ces composés agissent efficacement contre de nombreux types d'agents cancérogènes. Ces composés sont particulièrement actifs contre un large éventail de cancers, notamment ceux de l'ovaire, du côlon, de la vessie, du poumon et du sein (**Higdom et al., 2007 ; Zhao et al., 2007**).

L'oxygène, élément indispensable à la vie, peut, dans certaines circonstances, nuire à l'organisme humain. Les processus d'oxydation sont essentiels aux organismes vivants. La plupart des effets potentiellement nocifs de l'oxygène sont dus à la formation d'espèces réactives de l'oxygène (ERO).

La production incontrôlée d'ERO et le déséquilibre du système de protection antioxydante entraînent l'apparition de nombreuses maladies et accélèrent le vieillissement. Les ERO sont une classe de molécules très réactives formées lors de la vie aérobie chez les organismes vivants et comprennent les radicaux anions superoxyde ($O_2^{\bullet-}$), les radicaux hydroxyles ($OH^{\bullet}$) et des espèces non radicalaires, telles que H_2O_2 et l'oxygène singulet (1O_2) (**Halliwell et Gutteridge, 1989 ; Gülçin et al., 2002a ; 2002b**).

Il existe un équilibre entre la production d'ERO et leur inactivation par le système antioxydant des organismes. En cas de déséquilibre entre les ROS et les mécanismes de défense antioxydants, les ROS entraînent une modification oxydative des membranes cellulaires ou des molécules intracellulaires (**Duh et al., 1999 ; Gülçin et al., 2003**).

Les résultats de cette étude révèlent que l'extrait méthanolique des feuilles de *Brassica rapa L.* présente une activité antioxydante notable contre le radical libre DPPH, avec une valeur d'IC₅₀

CHAPITRE II RESULTATS ET DISCUSSIONS

de 19.59. Néanmoins, cette activité demeure inférieure à celle de l'acide ascorbique, utilisé comme référence standard ($IC_{50} = 6.41$). Une telle différence est attendue, l'acide ascorbique étant un composé pur doté d'un pouvoir réducteur élevé, tandis que l'extrait végétal contient un mélange complexe de composés bioactifs dont l'efficacité dépend de leur nature et de leur concentration relative.

L'activité antioxydante obtenue peut s'expliquer par la présence de composés phénoliques, de flavonoïdes, ainsi que d'autres métabolites secondaires capables de neutraliser les radicaux libres à travers le transfert d'électrons ou d'atomes d'hydrogène. Selon les travaux de **Cartea et al. (2011)**, les espèces du genre *Brassica* se distinguent par leur richesse en composés phénoliques, reconnus pour jouer un rôle clé dans la protection contre le stress oxydatif.

Les conclusions de cette recherche corroborent celles d'**Ould Yerou et al. (2022)**, qui avaient également mis en évidence une activité antioxydante notable chez *Brassica rapa*. Les écarts observés entre les valeurs d' IC_{50} pourraient découler de divers facteurs, notamment le choix du solvant et la méthode d'extraction, mais aussi des conditions environnementales, de l'origine géographique des échantillons végétaux ou encore du stade physiologique de la plante lors de la récolte. Ces paramètres influencent directement la concentration en composés bioactifs présents et, par extension, leur efficacité antioxydante.

Par ailleurs, l'utilisation du méthanol comme solvant d'extraction a probablement optimisé la récupération des composés phénoliques responsables de l'activité antioxydante. En effet, plusieurs études suggèrent que les extraits méthanoliques des espèces du genre *Brassica* présentent généralement une forte activité antioxydante en raison de leur teneur élevée en polyphénols et en flavonoïdes.

Ainsi, malgré inférieure à celle de l'acide ascorbique, l'extrait méthanolique des feuilles de *Brassica rapa L.* démontre un potentiel antioxydant prometteur. Ces résultats ouvrent la voie à la valorisation de cette plante comme source naturelle de molécules bioactives, présentant un intérêt potentiel pour les secteurs alimentaire, nutraceutique et pharmaceutique.

CONCLUSION

CONCLUSION

Notre travail a été consacré à l'évaluation de l'activité antioxydante de l'extrait méthanolique des feuilles de *Brassica rapa* L. à l'aide de la méthode du radical libre DPPH. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence une activité antioxydante appréciable de cet extrait, traduite par une valeur d'IC₅₀ de 19,59. Bien que cette activité soit inférieure à celle de l'acide ascorbique utilisé comme composé de référence (IC₅₀ = 6,41), elle témoigne néanmoins d'un potentiel antioxydant intéressant des feuilles de navet.

L'activité observée peut être attribuée à la présence de composés bioactifs, notamment les polyphénols, les flavonoïdes et d'autres métabolites secondaires connus pour leur capacité à neutraliser les radicaux libres et à limiter les effets du stress oxydatif. Ces composés jouent un rôle important dans la protection des cellules contre les dommages oxydatifs associés à diverses maladies chroniques.

La comparaison de la valeur d'IC₅₀ obtenue avec celles rapportées dans la littérature confirme que les feuilles de *Brassica rapa* L. constituent une source naturelle prometteuse d'antioxydants. Les variations observées entre les différentes études peuvent être liées à plusieurs facteurs tels que les conditions de culture, l'origine géographique de la plante, le stade de développement, ainsi que la méthode et les conditions d'extraction utilisées.

En somme, les résultats de cette étude soulignent l'intérêt de valoriser les feuilles de navet, souvent peu exploitées, comme source de molécules naturelles à activité antioxydante. Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour leur utilisation potentielle dans les domaines alimentaire, nutraceutique et pharmaceutique. Toutefois, des études complémentaires sont nécessaires afin d'identifier précisément les composés responsables de cette activité, de déterminer leurs mécanismes d'action et d'évaluer leurs effets biologiques dans des systèmes plus complexes.

***LES REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES***

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

1. Abotaleb M., Samuel S., Varghese E., Varghese S., Kubatka P., Liskova A. Büsselberg D. (2019). Flavonoids in cancer and apoptosis. *Cancers*. 11(1): 13-28.
2. Ackermann-Liebrich, U. (2011). Respiratory and Cardiovascular Effects of NO₂ in Epidemiological Studies. *Encyclopedia of Environmental Health*: 840–844.
3. Agarwal, A., Gupta, S., & Sharma, R. K. (2005). Role of oxidative stress in female reproduction. *Reproductive biology and endocrinology*, 3: 1-21.
4. Aires, A., Carvalho, R., Rosa, E., & Saavedra, M. J. (2007). Phytochemical characterization and antioxidant activity of Brassica vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(21), 8464–8470.
5. Aires, A., *et al.* (2011). Seasonal variation of phenolic compounds and antioxidant activity in *Brassica rapa* tissues. *Food Chemistry*, 129(2), 432–439.
6. Ait Yahia, L., & Zemoura, H. D. (2014). Etude de l'effet d'un stress oxydatif et le système défensif enzymatique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mémoire de master en biologie et génomique végétales. Université, Frères Mentouri- Constantine.
7. Amrane, k., Dib, L. (2021). Etude de l'activité antioxydante et dosage des composés Phénoliques des extraits d'épices et du thé vert. Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou
8. Araar, H. (2012). Ressources phytogénétiques légumières en Algérie: diversité et répartition territoriale. Caractérisation et évaluation de la diversité agromorphologique de six populations de navet «Saidi» de Sétif. Mémoire de Magister, ENSA-El Harrach.
9. Azara, D et Belbacha, R.(2020). Évaluation de l'activité antimicrobienne et antioxydante de cinq extraits des feuilles de *Brassica rapa*. Mémoire de master, Ecologie microbienne, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Des frères mentouri, costantine
10. Bayart M. (2019). Élaboration et caractérisation de biocomposites à base d'acide polylactique et de fibres de lin: compatibilisation interfaciale par dépôt de revêtements à base d'époxy, de dioxyde de titane, de lignine ou de tanin.
11. Beltagy, A. M. (2014). Investigation of new antimicrobial and antioxidant activities of *Brassica rapa* L. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 6(6), 84-88.
12. Benkhniq, O., Ben Akka, F., Salhi, S., Fadli, M., Douira, A., & Zidane, L. (2014). Catalogue des plantes médicinales utilisées dans le traitement du diabète dans la région d'Al Haouz-Rhamna (Maroc). *J Anim Plant Sci*, 23(1), 3539-68.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

13. Bensakhria, A. (2018). Le stress oxydatif, Aide- mémoire de toxicologie générale (p. 70-86). ISBN: 9-781234-567897.
14. Benslama A. (2020). Etude phytochimique et activités antioxydante et hépatoprotectrice des extraits de *Thymus pallidus*. pp: 17.
15. BENYOUCEF, F. (2020). Extraction et caractérisation des huiles essentielles de six plantes provenant de l'ouest Algérien (*Salvia argentea*, *Ammoides verticillata*, *Satureja candidissima* *Thymus fontanesii*, *Artemisia herba alba* et *Rosmarinus officinalis*): Effet de synergisme ou d'antagonisme sur l'activité antioxydante et antimicrobienne (Doctoral dissertation, 08 -04-2021).
16. Blois, M. S. (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature*, 181(4617), 1199–1200. <https://doi.org/10.1038/1811199a0>
17. Bouklachi, A et Mamouni, A. (2019). Influence des plusieurs doses d'un purin d'ortie pour le développement et le rendement d'une culture de légumes racinaires, cas du carotte (*Daucus carota* L.) et du navet (*Brassica rapa* L.). Mémoire de master, productions végétales, Faculté des Sciences de la Nature et de la vie, Université de Blida I.
18. BOULDJADJ R., Étude de l'effet antidiabétique et antioxydant de l'extrait aqueux lyophilisé d'*Artemisia herba alba* Asso. Université de Constantine. 2009.
19. Brahimi, I., & Terrai, R. (2018). Evaluation de l'activité antioxydante des deux plantes *Rosmarinus officinalis* et *Curcuma longa*. Mémoire de Master en biochimie de la nutrition. Université, Frères Mentouri- Constantine: 25.
20. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
21. Călinoiu L., Vodnar D. (2018). Whole grains and phenolic acids: A review on bioactivity, functionality, health benefits and bioavailability. *Nutrients*. 10(11): 1615-1624
22. Cano N., Barnoud D., Schneider S.M., Vasson M.P., Hasselmann M., Leverve X. (2006). *Traité de nutrition artificielle de l'adulte*. Edition Springer. P : 255.
23. Chelikani, P., Fita I., & Loewen, P. C. (2004). Diversity of structures and properties among catalases. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 61: 192-208.
24. Chen, M., Zhao, Y., & Yu, S. (2014). Optimisation of ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds, antioxidants, and anthocyanins from sugar beet molasses. *Food Chemistry*, 172, 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.110>

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

25. Cheriet R., 2017. Contribution à l'étude de l'activité antioxydante d'un sous-produit alimentaire : Feuilles de vigne. Sciences Biologiques. Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie. Université de Larbi Tébessi –Tébessa-
26. Couplan, F. (2011). Guide nutritionnel des plantes sauvages et cultivées. Édition de Sophie Daguin, p : 187.
27. Desmier, T. (2016) Les antioxydants de nos jours définition et application (Doctorat dissertation, éditeur inconnu)
28. Di Meo, S., Reed, T. T., Venditti, P., & Victor, V. M. (2016). Role of ROS and RNS sources in physiological and pathological conditions. *Oxidative medicine and cellular*
29. Dupont, J. (2010). Synthèse et évaluation de nouvelles molécules inhibitrices de l'enzyme de conversion de l'angiotensine II (ECA) (Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud).
30. Fadel F., Fattouch S., Tahrouch S., Lahmar R., Benddou A., Hatimi A. (2011). The phenolic compounds of *Ceratonia siliqua* pulps and seeds (Les composés phénoliques des pulpes et des graines de *Ceratonia siliqua*). *Journal of Materials and Environmental Science*. 2: 285-292.
31. Favier A. (2003) : Le stress oxydant Intérêt conceptuel et expérimental dans la compréhension des mécanismes des maladies et potentiel thérapeutique. *L'actualité Chimique*. p : 108-115.
32. Garait, B. (2006). Le stress oxydant induit par voie métabolique (régimes alimentaires) ou par voie gazeuse (hyperoxie) et effet de la GliSODin. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
33. Ghedira K. (2005). Les flavonoïdes : structure, propriétés biologiques, rôle prophylactique et emplois en thérapeutique. *Phytothérapie*. 3(4) : 162-169.
34. Gorzynik-Debicka M., Przychodzen P., Cappello F., Kuban-Jankowska A., Marino Gammazza A., Knap N., Gorska-Ponikowska M. (2018). Potential health benefits of olive oil and plant polyphenols. *International journal of molecular sciences*. 19(3): 686.
35. Guilloty, A. (2016). Plantes médicinales et antioxydants (Doctorat dissertation Université Toulouse III-Paul Sabatier)
36. Hadji, O et Tarfaya, F. (2019). Evaluation du pouvoir antioxydant, antilthésique et antimicrobien du *Brassica* spp. Mémoire de master, microbiologie appliqué, Université Mohamed Boudiaf, m'sila
37. Halliwell, B. and Gutteridge, J.M.C., 2015. *Free Radicals in Biology and Medicine*. 5th ed. Oxford: Oxford University Press.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

38. Hamma, S., Nouri, N., Fergani, I., Lekhal, A., & Cheriet, S. (2015). Biologie des espèces réactives et Stress oxydant. *Journal Algérien de Médecine (JAM)*, 2: 49-50.
39. Hammoudi, R. (2015). Activités biologiques de quelques métabolites secondaires extraits de quelques plantes médicinales du Sahara méridional algérien. Thèse de doctorat en biologie. Université, Kasdi Merbah- Ouargla
40. Hassaine, H., Heddi, H. (2023). Etude phytochimique et évaluation de l'activité antioxydante des extraits préparés de la partie aérienne de *Portulaca oleracea* L. Université ABOU BEKR BELKAID –TLEMCEM–
41. Laguna O. (2019). Valorisation des composés phénoliques de colza et de tournesol : du fractionnement des matières premières à la synthèse de molécules multifonctionnelles. Pp : 34
42. Laouini Salah Eddine. (2014). Etude phytochimique et activité biologique d'extrait des feuilles de *Phoenix dactylifera* L dans la région du Sud d'Algérie (la région d'Oued Souf), thèse de magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 36 -38.
43. Laraba, M., Serrat, A., Ouassaa, G. (2016). Etude in vitro de l'activité antioxydante des polyphénols isolés à partir d'une plante médicinale. Mémoire de master en toxicologie et santé. Université, Frères Mentouri- Constantine.
44. longevity, 2016: 44.
45. Magder, S. (2006). Reactive oxygen species: toxic molecules or spark of life? *Critical care*, 10(1), 1-8.
46. Majhenič, L., Škerget, M., & Knez, Ž. (2007). Antioxidant and antimicrobial activity of guarana seed extracts. *Food chemistry*, 104 (3): 1258-1268.
47. Mancinelli, R., Barlocchi, E., Palminiello, S., & Saso, L. (2011). Oxidative stress and brain diseases. *Biomarkers and analytical methodologies*, 10: 395-403.
48. Manolaraki F. (2011). Propriétés anthelminthiques du sainfoin (*Onobrychis viciifoliae*) : Analyse des facteurs de variations et du rôle des composés phénoliques impliqués. Thèses.
49. Mathew, B. B., Tiwari, A., & Jatawa, S. K. (2011). Free radicals and antioxidants: A review. *Journal of Pharmacy Research*, 4 (12): 4340-4343.
50. Matou M. (2019). Composition et propriétés biologique d'extraits de *phyllanthus amarus schumacher* & *thonning* utilisés en médecine traditionnelle aux Antilles. Thèses.
51. Mebarki, K., Derbal, N., & Serrab, B., (2016). Implication de stress oxydatif dans la maladie de Parkinson. Mémoire de Master en Toxicologie et santé. Université, Frères Mentouri- Constantine.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

52. MEDJOUDA O., 2014.Méthodes d'études d'activité des antioxydants des plantes médicinales. Biochimie fondamentale et appliqué. Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie. Université KASDI MERBAH, OUARGLA.
53. Michel, T. (2011). Nouvelles méthodologies d'extraction, de fractionnement et d'identification : Application aux molécules bioactives de l'argousier (*Hippophaë rhamnoides*). Thèse de doctorat en chimie analytique- phytochimie. Université, Orléans- France.
54. Mishra, P. K., Singh, A. P., & Singh, A. P. (2022). Efficacy of aqueous and methanolic extracts of plant *Brassica rapa* leaves potential anti-pseudomonal activity. International Journal of Current Pharmaceutical Research, 14(1), 77–82. <https://doi.org/10.22159/ijcpr.2022v14i1.44115>
55. Mohammed, E. A., Abdalla, I. G., Alfawaz, M. A., Mohammed, M. A., Maiman, S. a. A., Osman, M. A., Yagoub, A. E. A., & Hassan, A. B. (2022). Effects of extraction solvents on the total phenolic content, total flavonoid content, and antioxidant activity in the aerial part of root vegetables. Agriculture, 12(11), 1820. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111820>
56. Molyneux, P. (2004). The use of the stable free radical DPPH for estimating antioxidant activity. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 26(2), 211–219.
57. Moon, J. K, & Shibamoto, T. (2009). Antioxidant assays for plant and food components. Journal of agricultural and food chemistry, 57 (5): 1655-1666.
58. Nabi, F. (2020). Contribution à l'étude de l'activité catalytique de l'enzyme peroxydase extraite du Navet rose (*Brassica rapa*). Mémoire de master, Biochimie appliqué, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen
59. Nisar, F., *et al.* (2018). Phenolic content and antioxidant activity in *Brassica rapa* extracts. Journal of Food Biochemistry.
60. Osman, A. M., Wong, K. K. Y., & Fernyhough, A. (2006). ABTS radical-driven oxidation of polyphenols: isolation and structural elucidation of covalent adducts. Biochemical and Biophysical Research Communications, 346 (1): 321-329.
61. Ou, B., Hampsch-Woodill, M., & Prior, R. L. (2001). Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 49: 4619 – 4626.
62. Ould Yerou, K., *et al.* (2022). Antioxidant activity of *Brassica rapa* extracts evaluated by DPPH assay. FENS Journal. <https://fens.usv.ro/index.php/FENS/article/view/875>

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

63. Paul, S., Geng, C. A., Yang, T. H., Yang, Y. P., & Chen, J. J. (2019). Phytochemical and Health-Beneficial Progress of Turnip (*Brassica rapa*). Journal of food science, 84(1), 19-30.
64. Permal A. (2017). Validation d'une méthode de dosage des tanins condensés dans les matières végétales. Pp : 9-13.
65. Pham H.N. (2017). Impact des métabolites secondaires de plantes sur des bactéries pathogènes de la rhizosphère : existe-t-il un lien entre la résistance sur métaux et la modulation de résistance aux antibiotiques. Pp: 22-23.
66. Rahman, T., Hosen, I., Islam, M. M., & Shekhar, H. U. (2012). Oxidative stress and human health. Advances in bioscience and biotechnology, 03 (07): 997-1019.
67. RAMDAOUI, S., ROUAHI, S. (2022). Evaluation des propriétés antioxydantes des extraits des feuilles de l'olivier cultivé (*Olea europaea* L). Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et Sciences de la Terre et de l'Univers. Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN.
68. Rauf, A., Nawaz, H., & Shad, M. A. (2018). Effect of solvent polarity and extraction time on in vitro antioxidant properties of *Brassica oleracea* Convar Capitata Var L. seeds. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 31(5), 1889–1897.
69. Reggai, kh et Zakrini, A. (2014). Caractérisation chimique et valeur alimentaire des résidus de quelque culture légumière (chou-fleur (*Brassica oleracea*), navet (*Brassica napus*), carotte (*Docus carola*) et fenouil (*Foeniculum vulgare*)). Mémoire de Master, productions animales, Faculté des sciences de la nature et de la vie, Université Saad Dahlab, Blida.
70. Righi, H., Boukhalat, N. E. (2021). Phytochimie et activité antioxydante du genre *Thymus* (synthèse théorique). Mémoire de Master en biodiversité et physiologie végétal. Université, Mohamed Boudiaf- Msila: 26.
71. Robards K., Prenzler P.D., Tucker G., Swatsitang P. Glover W. (1999). Phenolic compound and their role in oxidative processes in fruits. Food Chemistry, 66 : 401-436.
72. ROLLAND Y., 2004. Actualités des lipides en cosmétique. Antioxydants naturels végétaux. OCL. Vol 11(6) : 419 - 424.
73. SABOUR-MADANI, F. Z. (2016). Bilan nutritionnel et Marqueurs du stress oxydatif et de l'inflammation chez les agriculteurs utilisant les pesticides dans la région de TLEMCEN (Doctoral dissertation).
74. Sachdeva, M., Karan, M., Singh T., & Dhingra, S. (2014). Oxidants and Antioxidants in Complementary and Alternative Medicine: A Review. Spatula DD, 4 (1): 1-16.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

75. Saka, W., Akhigbe, R.E., Ajayi, A.F., Ajayi, L.O., Nwabuzor, O.E. (2017). Antidiabetic and antioxidant potentials of aqueous extract of *Eucalyptus globulus* in experimentally-induced diabetic rats. 14(6) : 20-26.
76. Sakhri, S et Tatemante, K. (2018). Caractérisation des protéines enzymatiques cas des peroxydases extraites du Navet Rose (*Brassica rapa*). Mémoire de master, Pharmacotoxicologie, Faculté des Science de la Nature et de la Vie, Université Abderrahmane Mira-Bejala, Algérie
77. Sarr, S. O., Fall, A. D., Gueye, R., Diop, A., Diatta, K., Diop, N., ... & Diop, Y. M. (2015). Etude de l'activité antioxydante des extraits des feuilles de *Vitex doniana* (Verbenacea). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 9 (3): 1263-1269
78. Saxena, M., Saxena, J., Pradhan, A. and Gupta, D., 2012. Phytochemistry of medicinal plants and their antioxidant potential. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 1(6), pp.168-182.
79. Selaimia H., Zerrouki S., Zarouri M.W. (2019). Etude des vertus thérapeutiques des feuilles d'olivier cultivé et sauvage *Olea europaea* L, thèse de magister, université Saad Dahlab, Blida, 17-34.
80. Shahidi, F. and Zhong, Y., 2015. Measurement of antioxidant activity. Journal of Functional Foods, 18, pp.757-781.
81. Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. Journal of botany, 2012: 1-26.
82. Silva R.F., Pogačnik L. (2020). Polyphenols from food and natural products: Neuroprotection and safety. Antioxidants. 9(1): 61.
83. Sohal, R. S., Mockett, R. J., & Orr, W. C. (2002). Mechanisms of aging: an appraisal of the oxidative stress hypothesis. Free Radical Biology and Medicine, 33 (5): 575-586.
84. Stevens, W. D., Ulloa, C., Pool, A., & Montiel, O. M. (2001). Flora de Nicaragua (Vol. 85, No. 1, p. 943). St. Louis: Missouri Botanical Garden Press.
85. Stief, T. W. (2003). The physiology and pharmacology of singlet oxygen. Medical Hypotheses, 60 (4): 567-572.
86. Theophile M. (2017). Contribution à l'élaboration d'une méthode pour la caractérisation des tanins condensés dans les végétaux. Thèses, France. Université des Antilles-Site de Guadeloupe (UA).

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

87. Tiwari R., Rana C.S. (2015). Plant secondary metabolites. À review. International Journal of Engineering Research and General Science. 3(5):661-666.
88. Xia.E,Q,Deng.G-F, Guo.Y,LI.H-B. (2011). Biological activities of polyphenols from grapes. International Journal of Molecular Sciences 11(2):622-646.
89. Zakkad, F. (2017). Etude phtochimique et évaluation de quelques propriétés biologiques de trois espèces de l'Euphorbia Thèse de doctorat. ANNABA: UNIVERSITE BADJI MOKHTAR.p168.
90. Zeghad N. (2018). Evaluation des propriétés biopharmacologiques, standardisation chimique et valorisation des agroressources fonctionnelles cas de granatum, Citrus aurantium et Opuntia. Thèses.
91. Zhang, D. and Hamauzu, Y., 2004. Phenolics, ascorbic acid, carotenoids and antioxidant activity of broccoli and their changes during conventional and microwave cooking. Food Chemistry, 88(4), pp.503-509.