

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Section 1.01

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

جامعة 20 اوت 1955 - سكيكدة

UNIVERSITE 20 AOUT 1955- SKIKDA



Faculté des Sciences

Département des Sciences de la Nature et de la Vie

Mémoire Présenté en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité: Microbiologie Appliquée

Intitulé

**Etude de l'impact de l'encapsulation dans des cellules de levure
sur la teneur en composés phénoliques et l'activité antioxydante
d'une plante médicinale (*Cynara scolymus* L.)**

Présenté Par :

Faghrou hadil

Laouar wafa

Gouiez imane

Boutata faiza

Membre de Jury:

Mr. Bouzebda AbdErrezak M.C.B Examineur

Univ. du 20 Août 1955 – Skikda

Mme. Laib imane M.C.A Promoteur

Univ. du 20 Août 1955 – Skikda

Mme. Fekrache Fadila M.C.A président

Univ. du 20 Août 1955 – Skikda

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon Dieu de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté pour achever ce modeste travail.

Nos vifs remerciements et profonde gratitude s'adressent à notre promoteur Mme LAIB. I, qui a accepté de nous encadrer, nous le remercions infiniment pour tous ses conseils avisés et sa supervision éclairée durant la réalisation du présent travail. Également pour sa patience et le temps qu'elle nous a consacré.

Nous remercions les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont accordés en jugeant ce travail: Mme. Fekrache fadila ,qui nous a fait l'honneur par sa présence en qualité de présidente de jury et Mr. Bouzebda Abderrezak, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Un chaleureux remerciement à nos parents pour leur amour inestimables, leurs Confiances, leurs soutiens, leurs sacrifices et leurs encouragements, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Je tiens c'est avec grand plaisir que je dédie ce travail à tous ce qui en participe à ma réussite :

A mon cher père "**Mohamed**" En exprimant ma gratitude, mon profond amour et ma passion, pour sa confiance, son soutien moral et matériel, pour son amour infini.

A ma chère mère "**Nadira**" Qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que dieu la garde.

A mes chères sœurs **Aya** , **Razane** et **Rahma** . ceux qui ont partagé avec moi les moments d'émotions, elles sont une source de motivation et de tendresse dans tous les moments de stress, que dieu vous protège et vous donne le meilleur.

A mon fiancé "**Oussama**" Mon spéciale Personne qui toujours encourage moi, et qui pousse moi à l'avant par leur conseils.

Pour ma chère sœur, mon amie fidèle et ma merveilleuse cousine "**Rayane**" et sa petite "**Iline**",

qui a été pour moi comme une sœur, toujours présente pour me soutenir dans tous les moments de ma vie. Merci, ma chérie."

A ma adorable amie "**Aya**" qui ont été toujours à mes coté dans les moments difficiles.

A mes collègues et amis dans ce travail "**Hadil**" "**Wafa**" "**Faiza**" pour leur patience et leur compréhension pendant toute la durée des travaux tous mes amies qui ont été à mes cotés

A tous ce qui m'aiment et qui sont les plus chères pour moi.

Imane

Dédicaces

Louange à Allah Seigneur des univers. Celui dont toutes sortes de succès et de réussite viennent de Sa part. Et le salut et la paix soient sur le meilleur parmi toutes les créatures, le bien aimé Mohamed qui a été envoyé comme une miséricorde à toutes les créatures.

Je dédie ce modeste travail

À mes deux sources inépuisables d'affection et de tendresse ; celle de ma mère(**Naïma**) qu'Allah la protège de tous les maux. Et l'autre de mon père(**Mohamed**) qu'Allah allonge sa vie et lui accorde la bonne santé.

À mes frères(**Amar, Yassine et Radouane**)

Qui m'ont aidé par tous ce qu'ils possèdent. Qu'Allah Le Tout Puissant remplisse leur vie de toutes sortes de bonheur et de joie !

À mes deux chères sœurs(**Fella et Mouna**)

Qui étaient ,et qui ne cessent encore , un appui inébranlable dans toute ma vie. Qu'Allah leur octroie la joie et la bonne santé !

À mon fiancé(**Abdelkader**)

Merci pour ton encouragement soutenu

À mes proches et relatives qui m'ont souhaité le succès et la réussite.

À mes amies "**Hadil**" "**Wafa**" "**Imane**" qui m'ont encouragé et soulagé pendant cette période de préparation.

À tous mes enseignants et enseignantes qui m'ont aidé et motivé à parvenir à ce stade

À tous qui aiment le savoir et les savants !

Faiza

Dédicaces

Je remercie Allah de m'avoir illuminé le chemin du savoir et de m'avoir donné la patience et le courage pour arriver jusqu'ici.

Avec ma gratitude et tout mon amour, je dédie ce travail:

À mon grand-père "**Mohammed**". Je tiens à t'exprimer ma gratitude pour la sagesse et la force que tu as transmises à travers les générations. Tu es une source inépuisable d'inspiration, et ton respect et ton estime sont pleinement mérités.

À mes chers parents, "**Chadli**" et "**Ghaniya**", je souhaite exprimer toute ma gratitude. Vous avez toujours été là pour me pousser vers le meilleur, et vous avez été une source de force et de motivation inépuisable. Ce modeste travail est donc l'aboutissement de votre soutien constant, de vos sacrifices et de vos prières. Aucun hommage ne pourrait véritablement rendre justice à l'amour infini que vous me portez. Que Dieu vous bénisse d'une longue vie et d'une bonne santé.

À mes chers frères, "**Raouf**" et "**Abdel Nasser**", je tiens à vous exprimer l'importance que vous avez dans ma vie et ma fierté d'avoir des frères comme vous.

À ma chère cousine "**Wissal**" et à ma belle cousine "**Jihene**", je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude pour tout le soutien inestimable que vous m'avez accordé, ainsi qu'à toute la famille.

À mes collègues et amis dans ce travail, "**Imane**", "**Wafa**" et "**Faiza**", je vous remercie pour votre patience et votre compréhension tout au long de ce projet.

Et enfin, à tous mes enseignants, je suis reconnaissant pour votre soutien et votre motivation tout au long de mon parcours. Merci à tous ceux qui valorisent la connaissance et qui apprécient les chercheurs.

Hadil

Dédicaces

Avant tous je remercie ALLAH de m'avoir donné le courage et la volonté nécessaire pour atteindre mon objectif.

Je tiens à dédier mon travail :

À mon cher père " Mohamed "

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude, mon amour intense et ma passion immense pour votre confiance absolue, votre soutien spirituel et financier, et votre amour infini.

Que Dieu vous protège.

À ma chère mère " Sabah "

Celle qui m'entoure de son amour profond et de son affection sincère, et qui se consacre inlassablement à ma réussite, que Dieu la préserve.

À mes sœurs " Afaf ", " Chaima ", " Hadil ", et surtout à ma belle " Assil "

La source de ma force et de mon bonheur.

À mes chers frères " Ahmed " et " Aymen "

Je tiens à vous remercier pour l'amour et l'encouragement que vous me témoignez.

À mes chers grands-parents

Merci pour l'amour et l'affection que vous nous avez donnés.

À ma chère amie et ma plus belle sœur " Amina "

À mes collègues dans ce travail

Je voudrais exprimer ma gratitude pour vos efforts et votre patience.

À tous mes amis et mes proches

Je voudrais exprimer mon amour et ma gratitude envers vous.

Table des matières

| | |
|----------------------|---|
| Résumé | |
| Liste de tableaux | |
| Liste des figures | |
| Liste d'abréviations | |
| Introduction | 1 |

Chapitre 1 : Artichaut *Cynara scolymus* L.

| | |
|-----------------------------------|---|
| 1. Généralités | 3 |
| 2. Description botanique..... | 3 |
| 3. Classification..... | 4 |
| 4. Composition chimique..... | 4 |
| 5. Bienfaits de l'artichaut | 5 |

Chapitre 2 : Composés phénoliques

| | |
|--|----|
| 1. Généralités | 6 |
| 2. classification des polyphénols | 6 |
| 2.1. Les flavonoïdes | 6 |
| 2.2. Non flavonoïdes..... | 7 |
| 2.3. Lestannins | 8 |
| 3. Localisation des polyphénols dans les plantes | 9 |
| 4. Biosynthèse des produits phénoliques | 9 |
| 4.1. La voie des shikimate | 10 |
| 4.2. La voie des phénylpropanoïdes | 10 |
| 4.3. La voie de l'acide malonique | 11 |
| 5. Propriétés biologiques des composés phénoliques | 11 |
| 5.1 Activité antioxydante | 11 |
| 5.2. Autre activités biologique des polyphénols | 13 |
| 6. Facteurs de variabilités des polyphénols | 14 |

Chapitre 3 : Encapsulation des composés phénoliques

| | |
|--------------------------------------|----|
| 1. Généralité | 16 |
| 2. Objectif de l'encapsulation | 16 |
| 3. Domaine d'encapsulation | 17 |
| 4. Procédés d'encapsulation | 18 |
| 4.1. Procédés physicochimique | 19 |
| 4.2. procédés chimique..... | 19 |
| 4.3.procéds mécanique | 19 |
| 5. Encapsulation des levures | 19 |

Matériel et méthodes

| | |
|---------------------------|----|
| 1. Lieu de travail | 21 |
| 2. Matériel végétal | 21 |
| 3. Méthodologie | 21 |
| 3.1. Extraction | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2. Microencapsulation des composés phénoliques | 22 |
| 3.2.1. Préparation de la souche de levure | 22 |
| 3.2.2. Plasmolyse des souche de levures | 22 |
| 3.2.3. Microencapsulation des composés phénoliques | 22 |
| 3.2.4. Efficacité d'encapsulation | 23 |
| 3.3. Dosage des composés phénoliques | 23 |
| 3.3.1. Dosage des polyphénols totaux | 23 |
| 3.3.2. Dosage des flavonoïdes | 24 |
| 3.3.3. Dosage des tanins | 24 |
| 3.4. Analyse FTIR | 24 |
| 3.5. Effet de la microencapsulation sur l'activité antioxydante | 25 |
| 3.5.1. Méthode DPPH | 25 |
| 3.5.2. Méthode ABTS | 25 |
| 3.6. Analyse statistique | 26 |

Résultats et discussion

| | |
|--|-----------|
| 1. Teneurs en composés phénolique | 27 |
| 1.1. Courbe d'étalonnage | 27 |
| 1.2. L'effet de l'encapsulation sur la teneur en composés phénoliques | 28 |
| 1.4. Analyse FTIR des extraits avant et après encapsulation | 30 |
| 2. Effet de l'encapsulation sur l'activité antioxydante d'artichaut | 32 |
| Conclusion | 34 |
| Références bibliographiques | 35 |

Résumé

Cette étude visait à évaluer l'impact de l'encapsulation des composés phénoliques dans les cellules de levure *Saccharomyces cerevisiae* sur leur teneur et leur activité antioxydante. Des méthodes spectrophotométriques ont été utilisées pour doser les composés phénoliques, et une analyse FTIR a confirmé l'interaction moléculaire entre la levure et les composés phénoliques. Les tests DPPH et ABTS ont été employés pour évaluer l'activité antioxydante. Les résultats ont démontré que l'encapsulation préservait la teneur en polyphénols des composés phénoliques et améliorait même leur activité antioxydante par rapport aux composés libres. Cette approche d'encapsulation utilisant les cellules de levure *Saccharomyces cerevisiae* pourrait ainsi être efficace pour préserver la teneur en composés phénoliques et leur activité antioxydante dans les extraits de plantes médicinales, notamment l'artichaut (*Cynara scolymus* L.). Ces résultats revêtent une importance significative dans le développement de nouvelles formes d'administration de composés phénoliques, avec des avantages potentiels pour la santé. Toutefois, des recherches ultérieures sont nécessaires pour approfondir la compréhension des mécanismes d'encapsulation et leur impact sur les autres propriétés bioactives des composés phénoliques encapsulés.

Mots clés : *Cynara scolymus* L., composés phénoliques ,encapsulation , activité antioxydante , *Saccharomyces cerevisiae*.

Abstract

This study aimed to evaluate the impact of encapsulation of phenolic compounds in the yeast cells of *Saccharomyces cerevisiae* on their content and antioxidant activity. Spectrophotometric methods were used to quantify the phenolic compounds, and FTIR analysis confirmed the molecular interaction between yeast and phenolic compounds. DPPH and ABTS tests were employed to assess the antioxidant activity. The results demonstrated that encapsulation preserved the polyphenol content of the phenolic compounds and even enhanced their antioxidant activity compared to free compounds. This encapsulation approach using *Saccharomyces cerevisiae* yeast cells could be effective in preserving the content of phenolic compounds and their antioxidant activity in medicinal plant extracts, particularly artichoke (*Cynara scolymus* L.). These findings hold significant importance in the development of new forms of phenolic compound administration, with potential health benefits. However, further research is needed to deepen the understanding of encapsulation mechanisms and their impact on other bioactive properties of encapsulated phenolic compounds.

Keywords: *Cynara scolymus* L., phenolic compounds, encapsulation, antioxidant activity, *Saccharomyces cerevisiae*.

ملخص

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثير تغليف المركبات الفينولية داخل خلايا خميرة *Saccharomyces cerevisiae* على محتواها ونشاطها المضاد للأكسدة. تم استخدام طرق الطيف الطيفي لقياس المركبات الفينولية، وأكد تحليل الأشعة تحت الحمراء التفاعل الجزيئي بين الخميرة والمركبات الفينولية. تم استخدام اختبارات DPPH و ABTS لتقييم النشاط المضاد للأكسدة. أظهرت النتائج أن التغليف يحافظ على محتوى البوليفينول للمركبات الفينولية ويعزز حتى نشاطها المضاد للأكسدة بالمقارنة مع المركبات الحرة. بالتالي، يمكن أن يكون هذا النهج للتغليف باستخدام خلايا خميرة *Saccharomyces cerevisiae* فعالاً في الحفاظ على محتوى المركبات الفينولية ونشاطها المضاد للأكسدة في مستخلصات الأعشاب الطبية، بما في ذلك الخرشوف (*Cynara scolymus* L.). تعتبر هذه النتائج ذات أهمية كبيرة في تطوير أشكال جديدة لإدارة المركبات الفينولية، مع فوائد محتملة للصحة. ومع ذلك، هناك حاجة لمزيد من البحوث لتعميق فهم آليات التغليف وتأثيرها على الخصائص الحيوية الأخرى للمركبات الفينولية المغلفة.

الكلمات الرئيسية: *Cynara scolymus* L.، المركبات الفينولية، التغليف، النشاط المضاد للأكسدة، *Saccharomyces cerevisiae*

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Classification et les sources des certains composés polyphénoliques sélectionnés ... | 7 |
| Tableau 2 : Application de microencapsulation..... | 17 |
| Tableau 3 : L'efficacité en composés phénolique (polyphénol totaux , Flavonoïde,tannins).... | 30 |
| Tableau 4 : Activité antioxydant par la méthode DPPH et ABTS | 32 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1: Feuille d'artichaut | 4 |
| Figure 2: Capitule d'artichaut | 4 |
| Figure 3: Structures chimiques typique des tanins | 9 |
| Figure 4: Mécanisme d'action antiradicalaire des polyphénols | 12 |
| Figure 5: Sites de chelation des ions métalliques par les flavonoïdes | 13 |
| Figure 6: Effets biologiques des polyphénols | 14 |
| Figure 7: Technique de l'encapsulation dans les cellules de levure saccharomyces cerevisiae | 20 |
| Figure 8: Artichaut (cynara scolymus L.) | 21 |
| Figure 9 : Courbe d'étalonnage : Acide gallique, 2 : quercétine, 3 :Acide tannique | 27 |
| Figure 10 : Effet d'encapsulation sur la teneur en composés phénoliques | 28 |
| Figure 11 : Spectres FTIR des extraits avant et après encapsulation | 31 |

Liste des abréviations :

ABTS: 2, 2-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid)

AH: antioxydant hydrophile

AlCl₃: chlorure d'aluminium

ANOVA : Analyse de la variance

ATR: réflexion totale atténuée

ATR-FTIR :spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier avec réflexion totale atténuée

CH₂: Méthylène

CH₃: Méthyle

DPPH: 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyle

EAG: Equivalent acide gallique

EAT: Equivalent acide tannique

EE(%): efficacité d'encapsulation

EQ: Equivalent quercétine

ERO: Espèces réactives de l'oxygène en excès

ES: Système endocrinien

FTIR: spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

H⁺: Ion hydrogène

H₂SO₄: acide sulfurique

HCl: acide chlorhydrique

IC₅₀: a concentration d'échantillon nécessaire pour réduire de moitié la quantité initiale

IRE: réflexion infrarouge diffuse

K₂S₂O₈: Dioxyde de soufre

Na₂CO₃: carbonate de sodium

NaCl: chlorure de sodium

OH: Groupe hydroxyle

PA: polyamide

pH: Potentiel hydrogène

pH₂O: potentiel hydrogène dans l'eau

PIKE: accessoire de transmission infrarouge

TPE: concentration totale de polyphénols, flavonoïdes et tanins encapsulés

TPT: la concentration de composés phénoliques (polyphénols, flavonoïdes et tanins) de l'extrait non encapsulé

UV-1800: spectrophotomètre ultraviolet-visible

Introduction

Introduction

L'étude de la phytochimie des plantes médicinales reste d'actualité malgré sa longue histoire, principalement en raison du règne végétal qui constitue une source précieuse d'une vaste gamme de molécules bioactives. Les composés présents dans les plantes offrent de multiples avantages qui sont exploités dans l'industrie alimentaire, la cosmétologie et la pharmacie (**Ouedraogo et al.,2021**). Parmi les plantes médicinales qui composent la couverture végétale, nous trouvons le genre *Cynara*.

L'artichaut (*Cynara scolymus* L.) est une plante médicinale qui suscite un intérêt continu en raison de ses nombreuses propriétés bénéfiques pour la santé humaine. Depuis longtemps, l'artichaut est utilisé à des fins médicinales en raison de son implication dans la prévention et le traitement de diverses affections. Cette plante, originaire de la région méditerranéenne, est appréciée non seulement pour ses qualités gustatives, mais aussi pour sa richesse en composés bioactifs. L'étude de l'artichaut a révélé une composition phytochimique remarquable, avec des niveaux élevés de composés tels que les polyphénols et les flavonoïdes. Ces composés sont connus pour leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et hépatoprotectrices, ce qui en fait une plante médicinale d'intérêt dans la recherche scientifique (**Salem et al.,2021**).

Cependant, ces substances présentent des caractéristiques qui les rendent instables au fil du temps et sensibles à l'oxydation et aux variations de température. De plus, elles contiennent des principes actifs qui sont facilement oxydables et insolubles dans l'eau, ce qui entraîne une faible biodisponibilité, c'est-à-dire une capacité limitée à être absorbée par l'organisme et à produire l'effet thérapeutique recherché. Par conséquent, il est nécessaire de trouver une solution pour protéger ces substances de l'environnement extérieur.

Une stratégie attrayante pour protéger ces substances est l'encapsulation par la levure *Saccharomyces cerevisiae*. L'encapsulation par la levure consiste à incorporer le principe actif dans des cellules de levure intactes ou plasmolysées, qui agissent comme une enveloppe protectrice. Cette technique offre plusieurs avantages. Tout d'abord, la levure *Saccharomyces cerevisiae* est naturellement résistante à l'oxydation et aux variations de température, ce qui garantit la stabilité du principe actif encapsulé. De plus, la levure est capable de métaboliser certains composés insolubles dans l'eau, ce qui facilite la solubilité du principe actif et améliore sa biodisponibilité (**Karaman, 2020**).

Introduction

L'encapsulation par la levure offre également la possibilité de libérer progressivement le principe actif dans l'organisme, ce qui peut être bénéfique pour certains traitements. Les cellules de levure se dégradent lentement, permettant ainsi une libération contrôlée du principe actif sur une période prolongée. Cela peut aider à maintenir des concentrations thérapeutiques constantes dans le corps et éviter les pics et les chutes brusques de concentration (**Coradello et Tirelli.,2021**).

En utilisant l'encapsulation par la levure pour protéger les composés phytochimiques des plantes médicinales, nous ouvrons de nouvelles perspectives pour améliorer leur utilisation et leur efficacité. Cette approche innovante permet de préserver l'intégrité et la stabilité des principes actifs, en les protégeant des conditions environnementales défavorables, tout en améliorant leur biodisponibilité (**Dadkhodazade et al.,2021**).

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'analyser l'effet de la microencapsulation par des cellules de levure sur les composés phénoliques et l'activité antioxydante de l'artichaut *Cynara scolymus* L.

Le travail est divisé en deux parties. La première partie, intitulée "Revue bibliographique", consiste en une étude approfondie de la littérature existante sur les polyphénols, l'encapsulation et la plante étudiée. L'objectif est de synthétiser les connaissances actuelles dans ces domaines.

La deuxième partie décrit le matériel et les méthodes utilisés pour réaliser la microencapsulation, ainsi que les protocoles de dosage des composés phénoliques tels que les polyphénols totaux, les flavonoïdes et les tanins. L'évaluation de l'activité antioxydante, mesurée par des tests tels que l'activité antiradicalaire DPPH et ABTS, est également incluse. Les résultats obtenus sont ensuite discutés.

Enfin, une conclusion générale résume l'ensemble des résultats obtenus et présente les perspectives envisagées pour de futures recherches.

Chapitre 01

Artichaut *Cynara scolymus* L.

Chapitre 01 : Artichaut *Cynara scolymus* L.

1. Généralités

L'artichaut, une plante ancestrale qui regagne en popularité grâce à ses nouvelles applications dans le domaine des aliments fonctionnels. L'artichaut est une plante vivace herbacée originaire de la région méditerranéenne, largement cultivée à travers le monde. Elle est appréciée pour ses grandes inflorescences immatures appelées "capitules" ou "têtes", qui possèdent des feuilles charnues comestibles (bractées) et un réceptacle. L'artichaut est une source riche en composés phénoliques, en inuline, en fibres et en minéraux, jouant ainsi un rôle essentiel dans le régime méditerranéen. Ses feuilles sont également riches en composés phénoliques et sont utilisées depuis l'Antiquité comme plante médicinale, en raison de leurs effets bénéfiques et thérapeutiques, notamment pour la protection du foie et la réduction du cholestérol (**Lattanzio *et al.*, 2009**).

2. Description botanique

L'artichaut est une plante herbacée vivace originaire du bassin méditerranéen, appartenant à la forme culturale de *Cynara cardunculus*. Contrairement à son état naturel, il est inconnu à l'état spontané. La plante possède une partie souterraine constituée d'un gros rhizome doté d'un système racinaire puissant. La tige, qui peut mesurer entre 1 et 1,50 mètre de hauteur, est dressée, cannelée et ramifiée. Au cours de la première année, une rosette de grandes feuilles se développe, caractérisées par leur couleur vert grisâtre, leur forme profondément découpée, leurs nervures très apparentes, leur absence d'épines, ainsi que leur face inférieure blanchâtre et tomenteuse. La tige apparaît généralement au cours de la deuxième année et porte des feuilles presque entières, plus petites et sessiles dans sa partie supérieure. Ces feuilles peuvent atteindre une longueur d'environ 1 mètre (Fig. 1).

Les fleurs de l'artichaut sont de couleur bleu violacé et tubulées. Elles se regroupent en gros capitules solitaires, qui peuvent être verts ou violacés. Les fleurs, hermaphrodites, se forment généralement au cours de la deuxième année. Les capitules terminaux sont de grande taille, dépassant parfois 10 cm de diamètre. Ils se composent d'un réceptacle charnu, hérissé de soies, entouré par un involucre de bractées ovales. Les bractées sont charnues à la base et pointues au sommet (Fig. 2) (**Goetz et Le jeune, 2007**).



Figure 1: Feuille d'artichaut (Plagès, 2014).
Le



Figure 2: Capitule d'artichaut (Goetz et jeune, 2007).

3. Classification

L'artichaut (*Cynara scolymus* L.) est une plante herbacée de la famille des Astéracées.

Règne : Plantae

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Ordre : Asterales

Famille : Asteraceae

Genre : *Cynara*

Nom binominal : *Cynara scolymus* L. (Romani *et al.*, 2006).

4. Composition chimique

L'artichaut est reconnu pour sa richesse en composés polyphénoliques, notamment des acides caféoylquiniques et des flavonoïdes, qui sont principalement présents dans les extraits polaires de la plante. On trouve également de l'inuline, un polysaccharide, dans cette plante. En ce qui concerne la fraction lipophile, elle contient principalement des acides gras, des triterpènes et des sesquiterpènes, qui sont les principaux métabolites présents. Les quantités de ces composants peuvent varier considérablement en fonction de divers facteurs tels que l'environnement, les caractéristiques génétiques, le stress, le moment de la récolte, les pratiques agronomiques, les parties de l'artichaut étudiées (bractées internes, intermédiaires ou externes, réceptacles, tiges, capitules et feuilles), ainsi que les méthodes de séchage utilisées (Lattanzio et Morone 1979 ; Lattanzio et Van Sumere 1987 ; Lombardo *et al.*, 2010).

5. Bienfaits de l'artichaut

Les parties comestibles de l'artichaut, ainsi que ses sous-produits, renferment une multitude de composés chimiques bénéfiques pour la santé humaine, tels que les acides phénoliques, les flavonoïdes et les sesquiterpènes. Ces composés sont associés à divers effets positifs, tels que la protection du foie, la réduction des niveaux de cholestérol dans le sang, l'activité anticancéreuse, ainsi que l'augmentation de la sécrétion biliaire hépatique et la stimulation du système digestif (**Shen *et al.*, 2010 ; Pandino *et al.*, 2011 ; Jacociunas *et al.*, 2013**). De plus, ces composés jouent un rôle crucial dans l'activité antioxydante des parties de l'artichaut, en aidant à stabiliser les radicaux libres présents dans le corps humain (**Biglari *et al.*,2008 ; Rufino *et al.*,2011**).

Les composés antioxydants détiennent la capacité de ralentir ou de prévenir l'oxydation des substrats, offrant ainsi diverses applications supplémentaires. Parmi celles-ci, on compte la préservation des graisses, des huiles comestibles, voire même des lubrifiants moteurs, en les protégeant contre les effets néfastes de l'oxydation (**Focke *et al.*,2012 ; Impellizzeri *et al.*,2012**).

Chapitre 02

Composés phénoliques

1. Généralités

Les polyphénols, également désignés sous le terme de composés phénoliques, représentent une vaste famille de molécules organiques présentes de manière répandue dans le règne végétal. Ils se retrouvent dans toutes les parties des plantes, depuis leurs racines jusqu'à leurs fruits, et jouent un rôle essentiel dans notre alimentation. Ces métabolites secondaires sont produits par les plantes afin d'interagir avec d'autres végétaux et animaux, bien qu'ils ne soient pas directement impliqués dans les fonctions primordiales de croissance et de reproduction des organismes végétaux (**Bravo, 1998**).

Les composés phénoliques sont des molécules caractérisées par la présence d'au moins un groupe hydroxyle (OH) attaché à un cycle aromatique. Ce terme est dérivé du phénol, qui est la substance la plus élémentaire de cette famille (**Harbon, 1989**).

Les polyphénols se présentent sous différentes formes dans le règne végétal, allant de molécules simples telles que les acides phénoliques à des composés hautement polymérisés comme les tanins (**Dai et Mumper, 2010**). Actuellement, environ 8000 composés phénoliques ont été identifiés, tous partageant la caractéristique commune d'avoir un ou plusieurs cycles benzéniques contenant une ou plusieurs fonctions hydroxyles (**Waksmundzka-Hajnos et Sherma, 2011**).

2. Classification des polyphénols

Les polyphénols peuvent être divisés en deux groupes principaux, les flavonoïdes et les non-flavonoïdes, en fonction du nombre d'anneaux aromatiques et de leur affinité de liaison pour différents composés, sans oublier les tannins qui sont des polyphénols complexes (**Fraga et al. 2010; Surai, 2014**).

2.1. Les flavonoïdes

Les flavonoïdes sont le plus grand groupe de polyphénols, subdivisé en six sous-groupes : anthocyanines, isoflavones, flavanones, flavonols, flavones et flavanols (**D'Archivio et al., 2007; Surai, 2014**). Ils sont constitués de deux cycles benzéniques reliés par un pont de trois carbones, qui forment la structure C6-C3-C6 (**Jasiński et al., 2009; Fraga et al., 2010**). Dans les plantes, les flavonoïdes sont présents sous forme de glycosides avec des résidus de sucre ou sous forme d'aglycones libres. Les composés individuels sont classés selon les différents substituants de l'anneau créés lors de l'hydroxylation, la méthylation, la glycosylation et l'acylation (**D'Archivio et al., 2007; Jasiński et al., 2009; Majewska et Czczot, 2009**).

Les flavonoïdes sont responsables de la coloration rouge, bleue et jaune des plantes et se trouvent principalement dans les oignons, les poireaux, le soja, les baies et le thé (**Jasiński et al., 2009; Majewska et Czczot, 2009; Landete, 2013**).

Chapitre 02 :Composés phénoliques

2.2. Non- flavonoïdes

Contenant au moins un noyau aromatique lié à un ou plusieurs groupes hydroxyle. Les non-flavonoïdes comprennent les acides phénoliques, les lignanes et les stilbènes. Les acides phénoliques sont ensuite subdivisés en deux groupes de dérivés d'acide cinnamique et de dérivés d'acide benzoïque. Ils sont présents dans le café, les raisins et le vin rouge (**D'Archivio et al., 2007; Han et al., 2007**).

La classification et les sources des composés polyphénoliques sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1:Classification et les sources de certains composés polyphénoliques sélectionnés (Han et al., 2007 ; Zalega et Szostak-Węgierek, 2013 ; Myburgh, 2014 ; Surai, 2014).

| Groupe | Les composés phénoliques | Exemples de composés | Sources |
|--------------------|--------------------------|--|---|
| Flavonoïdes | Anthocyanes | Cyanidine Pelargonidine Delphinidine | Noir, baie de sureau mûre, cerises, fraises , framboises, aronie...etc. |
| | Isoflavones | Genisteine Daidzeine Equol | Soja et ses produits, petits pois, lentilles et raisins . |
| | Flavanones | Naringenine Hesperetine ériodictyol | pamplemousse, oranges, mandarines, menthe poivrée |
| | Flavonols | Quercétine Kaempférol Isorhamnétine | oignons, brocoli, le thé noir, la laitue, les pommes , aneth ...etc. |
| | Flavones | Apigénine Lutéoline Diosmine | Céleri, Persil, Poivre rouge, Citron, Origan, Romarin |

Chapitre 02 : Composés phénoliques

| | | | |
|------------------------|--------------------|---|---|
| | Flavanols | Catéchine Epicatechine Epigallocatechine | Thé, Raisins, Vin rouge, Pommes, Mures, Abricots, Chocolat noir |
| Non flavonoïdes | acides phénoliques | Acide caféique chlorogénique, acide fêrulique | café, olives, chou, pommes, cerises, tomates, poires, sasperges. |
| | Lignanes | pinorésinol, podophyllotoxine, stéganacine | lin, graines de sésame, ciboulette, noix |
| | Stilbènes | Resvératrol | vin rouge, raisins secs rouges, cacahuètes, myrtilles, framboises |

2.3. Les tanins

Le terme "tanin" provient de la capacité de ce composé à transformer la peau animale en cuir par tannage. Les tanins appartiennent à un groupe de polyphénols de poids moléculaire élevé. Ces molécules sont hautement hydroxylées et peuvent former des complexes insolubles lorsqu'elles sont associées à des glucides, des protéines et des enzymes digestives, ce qui réduit la digestibilité des aliments. Ils peuvent également se lier à la cellulose et à de nombreux éléments minéraux.

Selon leurs structures biochimiques, on distingue deux classes de tannins : les tannins hydrolysables et les tannins condensés (*Alkurd et al., 2008*).

2.3.1. Les tanins hydrolysables

Ce sont des structures moléculaires composées d'oligo- ou de polyesters de glucides liés à divers acides phénoliques. Le D-glucose est généralement utilisé comme sucre constituant de ces composés, tandis que les acides phénoliques associés peuvent être l'acide gallique, pour les gallotannins, ou l'acide ellagique, pour les tanins également connus sous le nom d'ellagitanins (*Bruneton, 1999 ; Cowan, 1999*).

Ces tanins, comme leur nom l'indique, sont facilement sujets à l'hydrolyse acide et basique. Ils peuvent se décomposer sous l'effet des enzymes et de l'eau chaude (*Vermerris et Nicholson, 2006*).

2.3.2. Les tanins condensés

Chapitre 02 : Composés phénoliques

Les proanthocyanidines, également appelées tanins condensés, sont des composés formés par la liaison de dimères, d'oligomères et de polymères de catéchine. Ces composés sont liés ensemble par des liaisons entre les atomes de carbone 4 et 8 (ou 6).

Les tanins condensés confèrent aux fruits et aux boissons leur caractère astringent en formant des complexes avec les protéines salivaires. Ils se distinguent des tanins hydrolysables par l'absence de sucres dans leur composition moléculaire, et leur structure est similaire à celle des flavonoïdes (**Manach *et al.*, 2004**).

Les polymères de tanins se forment grâce à l'activité d'acides ou d'enzymes. Ils sont composés en général de 2 à 50 unités monomériques (**Vermerris et Nicholson, 2006**).

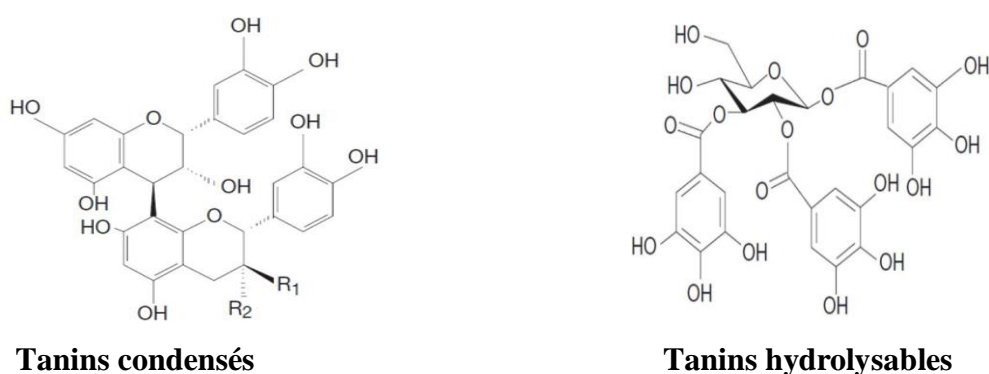


Figure 3: Structures chimiques typique des tanins (Achat, 2013).

3. Localisation de Polyphénols dans les plantes

Les composés phénoliques se répartissent principalement dans deux compartiments au niveau cellulaire, à savoir les vacuoles et la paroi. Dans les vacuoles, les polyphénols sont liés à des sucres ou des acides organiques pour améliorer leur solubilité et réduire leur toxicité pour la cellule. Dans la paroi, on observe principalement de la lignine et des flavonoïdes qui sont liés aux structures pariétales. La synthèse des composés phénoliques se produit dans le cytosol et certaines enzymes impliquées dans la biosynthèse des phénylpropanoïdes sont associées aux membranes du réticulum endoplasmique, où elles sont organisées en métabolons (**Winkel, 2004; Macheix *et al.*, 2005**).

La localisation des polyphénols au niveau tissulaire est étroitement liée à leur rôle dans la plante et peut être très distinctive. Dans les feuilles, les composés peuvent être répartis de manière variable ; par exemple, les anthocyanes et les flavonoïdes sont principalement présents dans l'épiderme. À l'échelle de la plante entière, il est important de noter que certains composés ne s'accumulent que dans des organes spécifiques. Dans les pommes, par exemple, les composés phénoliques jouent un rôle dans la coloration de la peau grâce aux anthocyanes, ainsi que dans la

qualité organoleptique de la chair, notamment en ce qui concerne l'amertume ou l'astringence (Tomas-Barberan et Espin, 2001; Cheynier et Sarni-Manchado, 2006).

4. Biosynthèses des produits phénoliques

Les polyphénols sont synthétisés par des voies métaboliques principales sont:

4.1. La voie de Shikimate est la principale voie biosynthétique par laquelle la majorité des polyphénols sont produits (Collin et Crouzet, 2011).

Dans une séquence de sept étapes métaboliques, le phosphoénolpyruvate, un intermédiaire de la glycolyse, et l'érythrose-4-phosphate, un intermédiaire de la voie des pentoses phosphates, subissent des conversions successives pour former du chorismate. Le chorismate est un composé clé dans la biosynthèse des acides aminés aromatiques. Ces acides aminés sont ensuite impliqués dans la formation de divers composés phénoliques, tels que les tanins hydrolysables, ainsi que dans la production de la chalcone. La chalcone est une molécule fondamentale à partir de laquelle dérivent tous les flavonoïdes et tanins condensés. Cette séquence métabolique est cruciale dans la biosynthèse des composés phénoliques, qui jouent un rôle important dans divers processus biologiques et ont des propriétés bénéfiques pour les plantes (Dewick, 1995).

Tous les intermédiaires de la voie métabolique de la phénylalanine peuvent être considérés comme des points de connexion vers d'autres voies métaboliques.

4.2. La voie des phénylpropanoïdes est une voie métabolique essentielle dans la biosynthèse de nombreux composés phénoliques naturels. Elle commence par la désamination de la phénylalanine, qui est une étape clé. La désamination de la phénylalanine conduit à la formation de l'acide cinnamique, qui est la première molécule phénylpropane formée au cours de cette voie.

L'acide cinnamique joue un rôle central dans la séquence biosynthétique de la voie des phénylpropanoïdes. Cette voie permet de faire le lien entre le métabolisme primaire du shikimate et le métabolisme secondaire des phénylpropanoïdes.

La voie métabolique des phénylpropanoïdes engendre la synthèse de multiples acides hydroxycinnamiques, dont l'acide p-coumarique, l'acide caféique, l'acide férulique et l'acide sinapique, qui jouent un rôle essentiel dans la signalisation cellulaire. Ces composés phénoliques possèdent une diversité de fonctions biologiques et sont impliqués dans de nombreux processus physiologiques chez les plantes, notamment la défense contre les pathogènes, la pigmentation des tissus et la modulation des voies de signalisation cellulaires.

Il est important de souligner que la voie métabolique des phénylpropanoïdes, bien qu'elle soit fréquemment empruntée pour la biosynthèse des composés phénoliques, n'est pas la seule voie impliquée dans leur formation. D'autres voies métaboliques jouent également un rôle significatif

dans la production de composés phénoliques spécifiques, tels que les alcaloïdes et les coumarines (**Bruneton, 2009 ; Merlin, 2015**).

4.3. La voie de l'acide malonique est une voie métabolique qui utilise l'acétyl-CoA pour produire des acides maloniques. L'acétyl-CoA est un produit résultant de processus cataboliques comme la glycolyse et la β -oxydation des acides gras.

La première étape de cette voie métabolique consiste en la polymérisation de l'acétyl-CoA pour former du malonate. Le malonate est un composé qui contient deux groupes carboxyle (-COOH) et qui joue un rôle essentiel dans la synthèse des acides gras.

La voie de l'acide malonique est également impliquée dans la cyclisation des chaînes polycétoniques, qui se forment par la condensation répétée d'unités d'acétate. La carboxylation de l'acétyl-CoA est une étape clé de cette cyclisation. L'enzyme responsable de cette réaction est l'acétyl-CoA carboxylase.

Il convient de noter que la biosynthèse des acides phénoliques est limitée dans cette voie métabolique, et d'autres voies sont généralement impliquées dans leur formation (**Chaouch, 2014 ; Merlin, 2015**).

5. Propriétés biologiques des composés phénoliques

En plus de leur capacité antioxydante, les composés phénoliques sont dotés d'un grand nombre de propriétés biologiques qui sont exploitées dans de nombreux domaines.

5.1. Activité antioxydante

Au cours des dernières années, l'intérêt pour les antioxydants naturels a considérablement augmenté. Les avantages potentiels du remplacement des antioxydants synthétiques par des antioxydants naturels sont de plus en plus reconnus (**Abdou et al., 2023**) (**spiegel et al., 2020**) (**Olszowy et al., 2019**). Les recherches sur les antioxydants naturels se sont principalement concentrées sur les composés phénoliques, en particulier les flavonoïdes, qui sont considérés comme des sources prometteuses d'antioxydants naturels (**Dontha, 2016**).

Les polyphénols sont des substances largement utilisées en médecine traditionnelle et moderne en raison de leurs activités antioxydantes. En raison de leur forte propriété redox, ces composés agissent comme des agents réducteurs en donnant des électrons pour neutraliser les radicaux libres. De plus, ils sont capables de chélater les ions. Les polyphénols sont capables de piéger les radicaux libres et de prévenir les dommages causés par les espèces réactives de l'oxygène. Les résultats de différentes études ont montré que ces composés ont une activité antioxydante importante, ce qui leur confère des propriétés bénéfiques pour la santé (**Rice-Evans et al., 1996; Valko et al., 2006**).

5.1.1. Inhibition enzymatique :

Les polyphénols ont la capacité de former des complexes avec les protéines grâce à leurs groupes fonctionnels, ce qui leur permet d'inhiber l'activité de certaines enzymes. Les interactions entre les polyphénols et les protéines ont été largement étudiées *in vitro*, en particulier dans le cas des flavonoïdes. Ces études ont permis de mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre les polyphénols et les protéines, et de mettre en évidence leur potentiel en tant que régulateurs de l'activité enzymatique (Arts *et al.*, 2001).

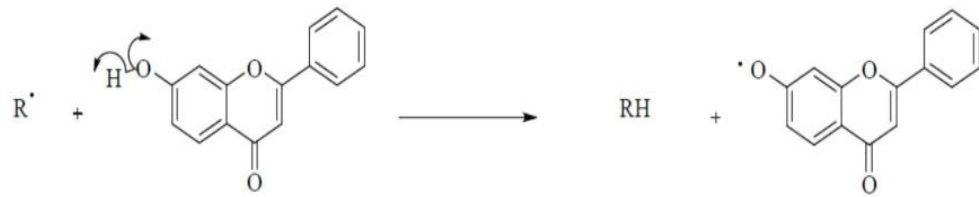
5.1.2. Chélation des ions métalliques :

Les composés phénoliques sont souvent considérés comme ayant un pouvoir antioxydant en raison de leur capacité à se lier aux métaux ioniques impliqués dans la production de radicaux libres. Cependant, il convient de noter que ces mêmes composés peuvent également agir comme des pro-oxydants. Cela signifie qu'ils peuvent avoir l'effet inverse de celui escompté et induire la production de radicaux libres plutôt que de les neutraliser. Il est donc important d'aborder avec prudence la question du pouvoir antioxydant des composés phénoliques et d'en tenir compte dans l'évaluation globale de leur rôle dans la santé et la nutrition (Tsao, 2010).

5.1.3. Piégeage des radicaux libres :

Les antioxydants phénoliques réagissent en transférant des électrons, suivis plus ou moins rapidement par un transfert de protons. Ce processus conduit à la formation d'un radical stabilisé grâce à ses structures mésomères conjuguées. En d'autres termes, les antioxydants phénoliques agissent en neutralisant les radicaux libres en leur donnant des électrons, ce qui permet de stabiliser leur structure chimique. Ce mécanisme de réaction est une étape importante dans la protection contre les dommages oxydatifs causés par les radicaux libres.

Transfert de proton (HAT)



Transfert d'électron (SET)

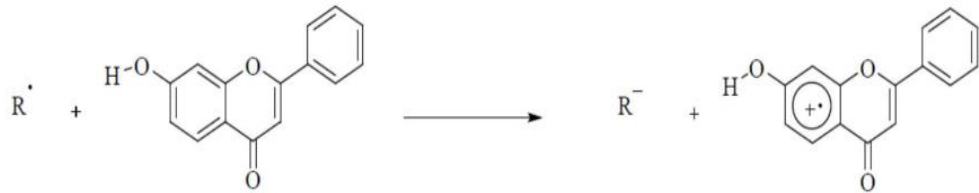


Figure 4: Mécanisme d'action antiradicalaire des polyphénols (Rezaire ,2014).

Les polyphénols possèdent des groupes hydroxyle qui sont capables de donner des atomes d'hydrogène, ce qui leur permet de réagir avec les espèces réactives de l'oxygène et de l'azote. Lorsque ces réactions ont lieu, le cycle de génération de nouveaux radicaux est interrompu, ce qui est bénéfique pour la santé. Plusieurs études ont montré que la structure chimique des polyphénols, en particulier des flavonoïdes, est liée à leur capacité à piéger les radicaux libres. Les flavonoïdes possèdent trois sites de coordination potentiels dans leur structure :

- entre le groupe 5-hydroxy et le groupe 4-carbonyle.
- entre le groupe 3-hydroxy et le groupe 4-carbonyle.
- entre le groupe 3', 4'-hydroxy dans l'anneau B.

Ces sites permettent aux flavonoïdes de se lier aux radicaux libres et de les neutraliser, ce qui contribue à leurs propriétés antioxydantes (Symonowicz et Kolanek, 2012).

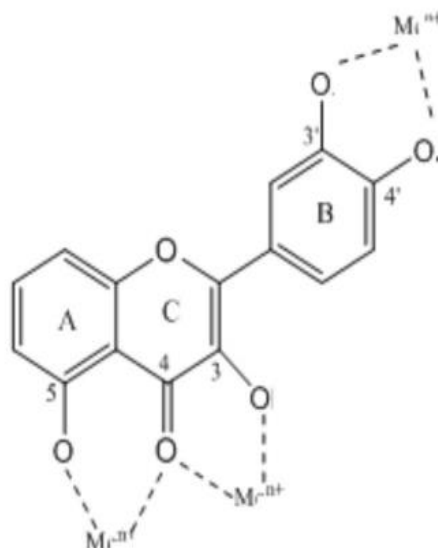


Figure 5: Sites de chélation des ions métalliques par les flavonoïdes (Van Acker *et al.*, 1996).

5.2. Autres activités biologiques des polyphénols:

Les plantes produisent des métabolites secondaires, tels que les phénols, les flavonoïdes et les tanins, qui possèdent des propriétés antimicrobiennes, antifongiques et antivirales (Xia *et al.*, 2011; Cheng *et al.*, 2008; Cushnie et Lamb, 2005; Khan *et al.*, 2005; Cowan, 1999). Ces composés inhibent les champignons pathogènes et le développement des spores, et certains ont montré une efficacité antivirale contre l'herpès simplex virus de type 2 (HSV-2) (Khan *et al.*, 2005; Xia *et al.*, 2011; Cushnie et Lamb, 2005).

Les polyphénols, tels que les anthocyanes et les flavonoïdes, présents dans les plantes ont des effets bénéfiques pour la santé. Ils ont des propriétés anti-inflammatoires, favorisent la réparation tissulaire et peuvent moduler les voies de signalisation intracellulaire pour induire l'apoptose des cellules cancéreuses (Lenoir, 2011; Scalbert *et al.*, 2005; Stagos *et al.*, 2012; Link *et al.*, 2010).

De plus, les polyphénols sont associés à une réduction du risque de maladies cardiovasculaires en prévenant l'oxydation des LDL et l'agrégation plaquettaire, ce qui contribue à réduire le risque d'athérosclérose (Visioli *et al.*, 2000; Arts et Hollman, 2005). Certains polyphénols purifiés, comme le resvératrol, la berbérine et la naringénine, ont démontré des effets bénéfiques sur les troubles lipidiques tels que la dyslipidémie et l'athérosclérose (Mulvihill et Huff, 2010).

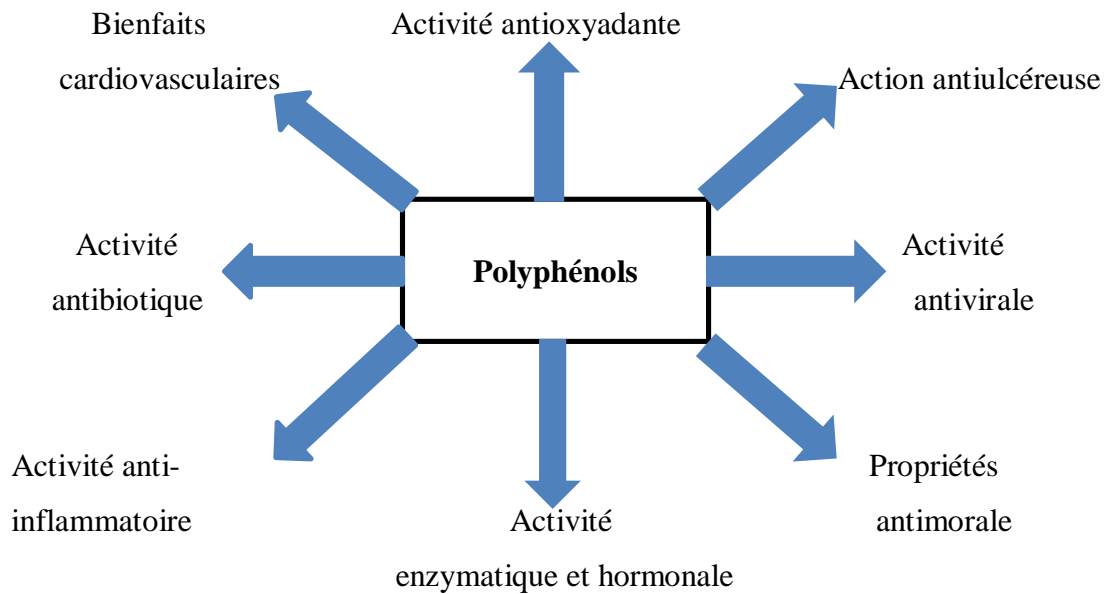


Figure 6: Effets biologiques des polyphénols (Bahorun ,1997).

6. Facteurs de variabilités des polyphénols

Le contenu des polyphénols dans les légumes varie en fonction de la variété. Cependant, la connaissance de la composition en polyphénols est souvent limitée à quelques variétés, et les données disponibles peuvent ne pas inclure les parties comestibles. D'autres facteurs tels que la maturité au moment de la récolte peuvent également influencer la teneur en polyphénols des plantes, Les facteurs environnementaux , la transformation et le stockage. (**Beckman, 2000; Malencic et al.,2012**), tels que le type de sol, l'exposition au soleil et la pluviométrie, ainsi que les facteurs agronomiques tels que le mode de culture et le rendement en fruits , ont un impact significatif sur la teneur en polyphénols des plantes. L'exposition à la lumière influence particulièrement les flavonoïdes (**Manach et al., 2004**).

Le degré de maturité des plantes joue également un rôle important, avec une diminution des acides phénoliques et une augmentation des anthocyanines pendant la maturation(**Macheix et al., 1990**).

Les polyphénols, en particulier les acides phénoliques, sont directement impliqués dans la réponse des plantes aux différents types de stress, favorisant la cicatrisation, possédant des propriétés antimicrobiennes et présentant des concentrations accrues après une infection (**Macheix et al., 1990 ; Shahidi et Naczk , 1995 ; Parr et Bolwell, 2000**).

Les légumes issus de l'agriculture biologique contiennent davantage de polyphénols que les autres légumes (**Asami et al., 2003**).

La teneur en polyphénols peut être altérée lors du stockage, en raison de réactions d'oxydation. Cela peut conduire à la formation de substances polymérisées, ce qui peut modifier la qualité des

Chapitre 02 :Composés phénoliques

aliments, y compris leurs caractéristiques organoleptiques. Certains changements peuvent être bénéfiques, comme dans le cas du thé noir, tandis que d'autres peuvent être préjudiciables à l'acceptabilité des aliments, tels que le brunissement des fruits et légumes (**Wang *et al.*,2016 ; Le Bourvellec *et al.*, 2018**).

Les méthodes de préparation culinaire ont un impact significatif sur la teneur en polyphénols des aliments. L'épluchage des fruits et légumes peut entraîner une perte importante de polyphénols, car ces composés sont souvent plus concentrés dans les parties externes. De plus, la cuisson a un effet majeur sur les polyphénols, entraînant une diminution de leur quantité (**Fabbri et Crosby, 2016**).

Le traitement industriel des aliments peut réduire la quantité de polyphénols présents. L'épluchage des fruits, le décorticage des légumineuses et des céréales entraînent une perte de polyphénols. Le broyage des tissus végétaux provoque une dégradation oxydative des polyphénols, tandis que la production de confitures et de jus de fruits peut les transformer en pigments bruns indésirables. Les étapes de clarification et de stabilisation des jus de fruits éliminent également certains polyphénols (**Manach *et al.*, 2004**).

En revanche, la macération facilite la diffusion des polyphénols, expliquant la concentration élevée dans les vins rouges par rapport aux vins blancs (**Vinson et Hontz, 1995**) et au jus de raisin (**Abu-Amscha, 1996**).

Chapitre 03

Encapsulation des composés phénoliques

Chapitre 03 :Encapsulation des composés phénoliques

1. Généralité

L'encapsulation est une méthode qui implique l'usage de matériaux appropriés pour capturer ou envelopper une substance ou un mélange de substances spécifique (**Madene et al., 2006**).

Les substances susceptibles d'être encapsulées comprennent des liquides, des solides ou des gaz (**Deladino et al.,2008; Anbinder et al.,2011**).

Les composés à encapsuler sont souvent des principes actifs sensibles ou instables en présence de facteurs environnementaux spécifiques, avec une fonction ciblée (vecteur), ou bien des substances dont l'état doit être modifié (par exemple, la transformation d'un liquide en solide) (**Gouin et al., 2004**).

Pour donner une idée sur la taille des particules (emprisonnées) que le mot (encapsulation) ne précise pas,on utilise:

Le terme "microencapsulation" est utilisé pour décrire des particules ayant une taille comprise entre 1 μm et 1 mm.

Le terme "nanoencapsulation" est utilisé pour désigner des particules dont la taille est inférieure à un micron.

La microencapsulation englobe un ensemble de technologies permettant d'obtenir des particules de taille micrométrique, présentant différentes forms et étant individualisées (**Benoît et al.,2013**).

Ces dernières années, la microencapsulation a ouvert la voie au développement de divers produits destinés à différents secteurs d'activité, tels que la pharmacie, l'électronique et l'industrie textile (**Dubey, 2009**). Des exemples de ces produits incluent des systèmes de libération d'agents médicamenteux et de composés alimentaires tels que les arômes, les édulcorants ou les colorants (**Paulo et Santos, 2017**).

2. Objectif de l'encapsulation

Les principaux objectifs de l'encapsulation se résument comme suit:

- L'encapsulation vise à préserver l'intégrité d'un principe actif ou d'une substance en les protégeant à la fois contre les altérations physiques telles que la précipitation ou la cristallisation, ainsi que les altérations chimiques telles que l'oxydation, qui peuvent résulter de l'exposition à des éléments tels que l'oxygène, la lumière, l'humidité ou la température.
- La conversion d'un liquide en solide se produit lors de l'encapsulation d'un produit liquide, où il est transformé en une poudre de différentes tailles de granulés. Cette encapsulation facilite la manipulation des réactifs liquides.
- L'encapsulation d'un liquide peut entraîner une modification de sa densité. Ainsi, un produit dense peut flotter et un produit léger peut couler.

Chapitre 03 : Encapsulation des composés phénoliques

- L'encapsulation permet de réduire la volatilité d'un produit ayant une forte pression de vapeur, ce qui est particulièrement utile pour les arômes utilisés dans les préparations culinaires.
- Elle permet également la libération contrôlée d'un produit actif, ce qui est particulièrement important dans les formes pharmaceutiques pour obtenir des médicaments à effet retardé
- L'encapsulation est utilisée pour séparer deux produits incompatibles qui doivent être présents dans un même mélange, afin d'éviter des réactions chimiques indésirables.
- L'encapsulation présente également un intérêt particulier pour le stockage de certaines substances. Par exemple, elle peut prolonger de manière significative la durée de conservation d'un composé volatil.
- Elle peut également être utilisée pour masquer le goût et l'odeur d'un produit (Celli *et al.*, 2015 ; Giraud, 2002).

3. Domaine d'application

L'encapsulation est un procédé largement employé dans des secteurs tels que l'industrie pharmaceutique, chimique, cosmétique, agroalimentaire, d'impression et de produits phytosanitaires (Augustin et Hemar, 2009).

Les composants encapsulés peuvent inclure des arômes, des vitamines, des colorants, des enzymes ou des antioxydants dans le secteur alimentaire (Dziezak, 1988 ; Shahidi et Han, 1993). Le tableau 2 suivant, regroupant les domaines industriels et quelques exemples d'application.

Tableau 2: Application de microencapsulation (D'après Finch et Bodmeier 2005 ; Madene *et al.*, 2006 ; Vandamme *et al.*, 2007).

| Domaine industriel | Exemples de composés encapsulés |
|----------------------|--|
| Pharmacie et medical | Antibiotique, contraceptifs, enzymes, vaccins, bactéries, vitamines, minéraux, antigènes, Anticorps... |
| Cosmétiques | Parfums, huiles essentielles, anti transparent, Agents bronzants, crèmes solaires, colorants capillaires, baumes démélants, mousses à raser... |
| Alimentaire | Huiles essentielles, graisses, épices, arômes, vitamines, minéraux, colorants, enzymes, levures, micro organismes... |
| Agriculture | Herbicides, insecticides, engrais, répulsifs, hormones végétales... |

Chapitre 03 : Encapsulation des composés phénoliques

| | |
|---------------------------------|--|
| Biotechnologie | Enzymes immobilisées, microorganisme, cellules vivantes, cellules artificielles, cellules tissulaires, composés nutritionnels... |
| Chimie | Catalyseurs, enzymes, additifs pour plastique, eau(plâtre et béton), inhibiteurs de corrosion, retardateurs d'incendies, colorants et pigments, agents UV protecteur, parfum, huiles essentielles, agents lubrifiants... |
| Détergents | Adoucissants, antistatiques, agents décolorants, agents moussants, silicones, cires, détachants... |
| Textile | Colorants, parfums, bactericides, répulsifs d'insectes, retardateurs d'incendies, composés bioactifs cosmétique |
| Graphismes et impression | Colorants, pigments, parfums, révélateurs, cristaux liquides, toners, composés photosensible... |
| Photographie | Halogénures d'argent, pigments colorants, composés photo polymérisables, révélateurs pour photographies couleurs, plastifiants... |
| Electronique | Cristaux liquides, adhésifs, agents de séchage antistatiques... |

4. Procédés d'encapsulation

Il est possible de classifier les divers procédés ou méthodes d'encapsulation en fonction de plusieurs critères, notamment:

- La taille requise des particules encapsulées.
- Les propriétés physico-chimiques du principe actif qui est encapsulé.
- La nature du procédé utilisé pour réaliser l'encapsulation.

En fonction de leur nature, ces procédés peuvent être regroupés en trois grandes catégories (**Finch et Bodmeier, 2005; Benoit et al., 2013**).

Chapitre 03 : Encapsulation des composés phénoliques

4.1. Procédés physico-chimiques:

Les techniques physico-chimiques cohérentes à contrôler les paramètres tels que la solubilité et la précipitation des agents d'enrobage en fonction de l'ajout de solvants non miscibles, du pH et de la température, ainsi que du changement d'état physique des polymers d'encapsulation.

Les méthodes utilisées:

- La coacervation (simple ou complexe) ou la séparation de phases.
- L'évaporation et l'extraction de solvant.
- La gélification thermique des émulsions (**Finch et Bodmerier, 2005., Benoit et al, 2013**).

4.2. Procédés chimiques:

Pendant ces procédés, la membrane (ou la matrice) est synthétisée simultanément à l'encapsulation de la matière active. La formation du matériau d'enrobage peut se faire in situ selon les méthodes suivantes:

- Polycondensation interfaciale.
- Polymérisation interfaciale.
- Polymérisation en milieu dispersé par voie radicalaire ou anionique (**Finch et Bodmeier, 2005 ; Benoit et al, 2013**).

4.3. Procédés mécaniques:

Les méthodes mécaniques impliquent les procédés suivants:

- Utilisation de la technique de séchage par pulvérisation (spray drying).
- Extrusion ou gélification de gouttes.
- Revêtement par pulvérisation dans un lit fluidisé (spray-coating) (**Finch et Bodmeier, 2005 ; Benoit et al, 2013**).

5. Encapsulation des levures

L'encapsulation des huiles essentielles et des arômes en utilisant des cellules de levure (*Saccharomyces cerevisiae*) comme matériau de paroi s'est avérée être un processus à faible coût et à haut volume (**Bishop et al., 1998**). L'encapsulation de levure dépend des cellules de levure, qui permettent aux actifs de passer librement à travers la paroi et la membrane cellulaire, tout en restant passivement dans les cellules. L'encapsulation par les cellules de levure peut contrôler la diffusion des actifs à travers la paroi et la membrane cellulaire, en utilisant une température et un temps définis, dans un mélange de solution prédéterminé, la paroi des cellules de levure assurant la protection des ingrédients actifs liquides contre l'évaporation, l'extrusion, l'oxydation et la lumière

Chapitre 03 : Encapsulation des composés phénoliques

(Micap Plc, 2004). Cette technologie est généralement utilisée pour l'encapsulation de petites molécules lipophiles telles que les huiles essentielles.

Les cellules de levure se sont révélées capables d'absorber et de retenir des composés aromatiques hydrosolubles lorsqu'elles sont prétraitées avec un plasmolyseur (Serozym Laboratories, 1973). Cette technique a été adoptée pour l'encapsulation de polyphénols hydrosolubles. Après un traitement avec 5 % de chlorure de sodium à 54 °C pendant 24 heures pour l'autolyse, les cellules de levure peuvent être utilisées pour encapsuler un polyphénol hydrosoluble, l'acide chlorogénique, avec une efficacité d'encapsulation de 12,6 % (Shi et al., 2007). L'acide chlorogénique encapsulé dans la levure s'est avéré être très stable sous des contraintes humides et thermiques, les profils de libération suggérant que les cellules de levure pourraient empêcher l'acide chlorogénique de changer, sans ralentir significativement la libération. Un autre avantage évident de cette technique est qu'aucun additif autre que l'eau, la levure et les matériaux de base n'est utilisé pendant le traitement, assurant ainsi sa sécurité dans les industries alimentaires (Blanquet et al., 2005).

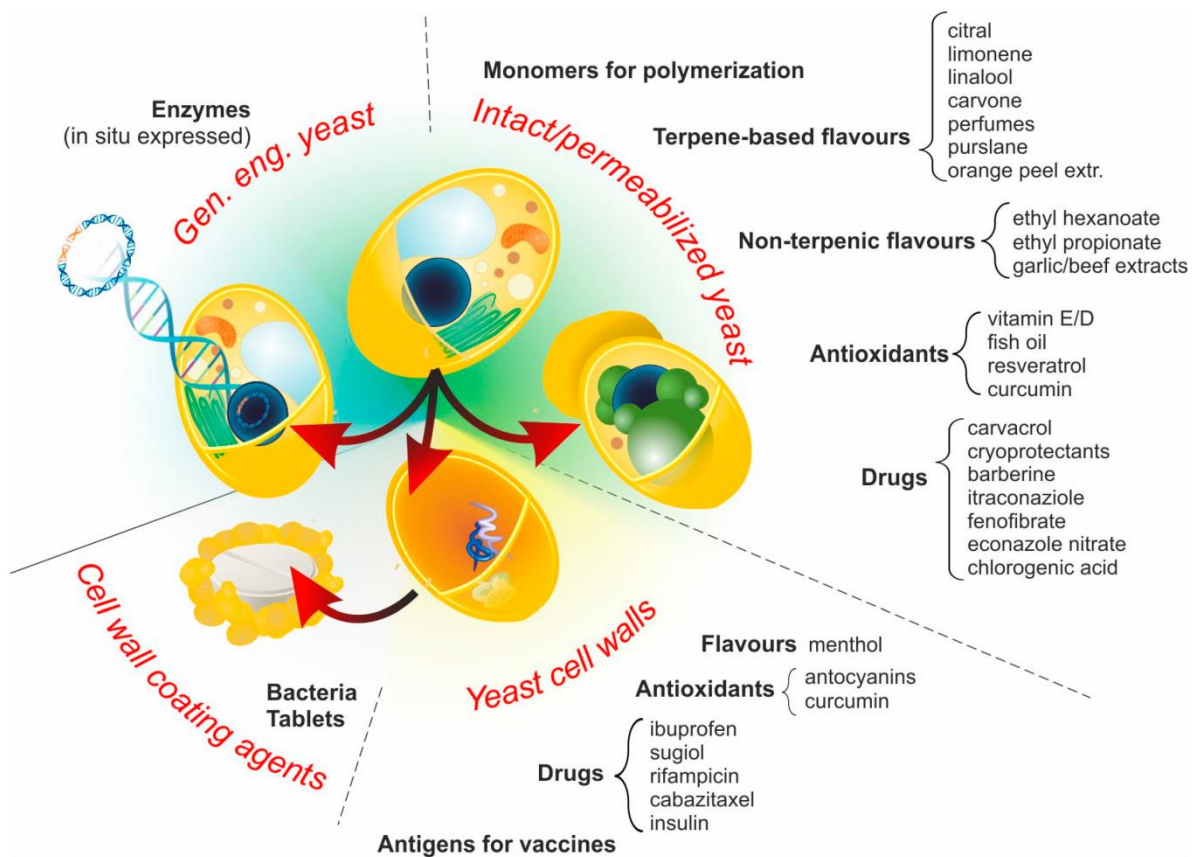


Figure 7: Techniques de l'encapsulation dans les cellules de levure *saccharomyces cerevisiae* (Coradello et Tirelli., 2021).

Matériel et méthodes

Matériel et méthodes

1. Lieu de travail

Notre étude a été menée au laboratoire de microbiologie du département des sciences de la nature et de la vie de l'Université de 20 Août 1955, Skikda. Cette recherche vise à examiner l'effet de l'encapsulation de composés phénoliques dans des cellules de levure sur la teneur en ces composés et l'activité antioxydante de *Cynara scolymus*.

2. Matériel végétal :

Le matériel végétal utilisé dans cette étude expérimentale est l'espèce *Cynara scolymus*, communément appelée artichaut. Toutes les informations taxonomiques et les données pertinentes concernant cette espèce ont été préalablement détaillées. Pour les besoins de cette étude, la partie aérienne de l'artichaut, comprenant la tige et les feuilles, a été sélectionnée. Les échantillons ont été récoltés en février 2023 dans la région de Tamalous, Skikda. Les plantes ont été placées dans des sacs en plastique et transportées immédiatement au laboratoire.



Figure 8: Artichaut (*Cynara scolymus* L.)

3. Méthodologie

3.1. Extraction

Les polyphénols sont extraits par macération selon la méthode décrite par **Xiang et Nasee (2018)**. avec quelque modification

Après la récolte de la plante, les parties aériennes de l'artichaut sont soigneusement rincées à l'eau du robinet afin d'éliminer tous les débris. Cette étape est essentielle pour assurer une conservation optimale de nos échantillons. Ensuite, nous procédons à la découpe minutieuse de

Matériel et méthodes

500g de l'artichaut en petits morceaux, que nous plaçons dans un mortier avec une quantité d'éthanol appropriée. Nous les broyons soigneusement jusqu'à obtenir une consistance homogène. Une fois les parties de l'artichaut broyées, nous les transférons dans un bécher et ajoutons environ 500 ml d'éthanol, de manière à ce que les morceaux soient entièrement recouverts. Le bécher est ensuite recouvert de papier aluminium et placé dans un endroit propre, à l'abri de la lumière, pour une durée de 24 heures. Enfin, nous procédons à une étape de filtration afin d'obtenir l'extrait souhaité. Le solvant a été éliminé par un évaporateur rotatif à 60° C. Les extraits sont ensuite séchés.

3.2. Microencapsulation des composés phénoliques

3.2.1. Préparation de la souche de levure

La levure *Saccharomyces cerevisiae* utilisée dans cette étude a été cultivée sur des boîtes de Pétri contenant un milieu sabouraud à une température de 27 °C pendant 48 heures. Après cette période de culture, les cellules ont été prélevées pour inoculer un milieu liquide de bouillon nutritif avec une densité optique de 0,2 à une longueur d'onde de 600 nm. Les cultures ont été maintenues à une température de 27 °C avec une agitation à 140 tours par minute. Les cellules ont été récoltées et elles ont été lavées trois fois avec de l'eau physiologique stérile (pH2O) par centrifugation à 4000 tours par minute pendant 10 minutes (Nguyen *et al.*, 2018).

3.2.2. Plasmolyse des souches de levures:

Un total de 40 grammes de levure a été dissous dans 500 mL d'une solution de NaCl à 10%. La solution a ensuite été placée sur un agitateur magnétique et soumise à la plasmolyse pendant 24 heures à une température de 55°C. Après cette étape, la levure a été centrifugée à 2000 g pendant 10 minutes. Le culot a été lavé avec de l'eau distillée et agité pendant une heure à température ambiante afin d'éliminer le NaCl. Ensuite, une nouvelle centrifugation a été réalisée et le processus de lavage a été répété deux fois supplémentaires. Enfin, les cellules de levure ont été soumises à la lyophilisation (Kurek *et al.*, 2023).

3.2.3. Microencapsulation des composés phénoliques

L'encapsulation des extraits phénoliques, que ce soit dans des cellules de levure intactes ou plasmolysées, a été réalisée dans un milieu aqueux en respectant un rapport de 5:1 en masse entre la levure (intacte ou plasmolysée) et l'extrait. Pour cela, un hydromodule de 1:100 a été utilisé. Le processus d'encapsulation a été effectué dans un agitateur thermostatiquement contrôlé à une vitesse de 200 tours par minute, maintenant une température constante de 37 °C pendant une durée de 24 heures. Par la suite, l'efficacité de l'encapsulation a été mesurée (Kalinina *et al.*, 2022).

3.2.4. Efficacité d'encapsulation

Le calcul de l'efficacité d'encapsulation est utilisé pour évaluer la capacité des levures intactes et plasmolysées à encapsuler les polyphénols, en mesurant le pourcentage de polyphénols encapsulés par rapport à leur concentration initiale avant l'encapsulation. Afin d'extraire les polyphénols totaux encapsulés, une quantité de 0,2 g de poudre a été mélangée avec 2 mL d'un solvant composé d'éthanol, d'acide acétique et d'eau (50:8:42, v/v/v). Ce mélange a été agité pendant 30 minutes pour permettre une extraction efficace. Après l'extraction, le mélange a été soumis à une centrifugation à une vitesse de 3000 tours par minute pendant 10 minutes afin de séparer les particules solides. Les concentrations de polyphénols totaux, de flavonoïdes et de tanins ont ensuite été déterminées à l'aide de méthodes spectrophotométriques (**Robert *et al.*, 2010**).

La formule suivante est utilisée pour calculer l'efficacité d'encapsulation des composés phénoliques :

$$EE(\%) = \frac{TPE}{TPT} \times 100$$

TPE : correspond à la concentration totale de polyphénols, flavonoïdes et tanins encapsulés ; TPT : désigne la concentration de composés phénoliques (polyphénols, flavonoïdes et tanins) de l'extrait non encapsulé (**Cegledi *et al.*, 2022**).

3.3. Dosage des composés phénoliques

3.3.1. Dosage des polyphénols totaux

La méthode couramment utilisée pour mesurer la quantité totale de polyphénols dans les extraits végétaux implique l'utilisation du réactif Folin-Ciocalteu, qui est composé d'acide phosphotungstique et d'acide phosphomolybdique. Ce réactif est réduit en un mélange d'oxydes bleus de tungstène et de molybdène lorsque les phénols sont oxydés, produisant une coloration dont l'absorption maximale se situe entre 725 et 750 nm. Cette coloration est proportionnelle à la quantité de polyphénols dans les extraits végétaux. Pour mesurer les polyphénols dans les extraits d'artichaut, une quantité de 2 ml d'extrait est mélangée avec 0,2 ml de réactif Folin-Ciocalteu et 1,4 ml de Na₂CO₃ à 7,5% (m/v). Le mélange est incubé dans l'obscurité à température ambiante pendant 2 heures, puis la lecture des absorbances est effectuée à 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-1800 (Shimadzu). Les résultats sont exprimés en mg équivalent acide gallique / g d'extrait sec, en se basant sur une courbe d'étalonnage de l'acide gallique réalisée avec 6 valeurs de concentrations allant de 0 à 1 mg/ml (**Waterhouse, 1999**).

3.3.2. Dosage des flavonoïdes

La méthode utilisée pour quantifier les flavonoïdes repose sur une approche similaire à celle décrite par **Chang et al. (2002)**, avec quelques modifications mineures. Elle repose sur la formation d'un complexe extrêmement stable entre le chlorure d'aluminium et les atomes d'oxygène situés sur les carbones 4 et 5 des flavonoïdes. Ce complexe présente une couleur jaune et absorbe la lumière dans la plage visible à une longueur d'onde de 415 nm. Afin de mesurer les flavonoïdes présents dans les extraits d'artichaut, une quantité de 0,2 ml de l'extrait est mélangée à 1,72 ml d'éthanol à 96%, 0,4 ml de chlorure d'aluminium (AlCl_3) à 10%, et 1 ml d'acétate de sodium 1M. Le mélange est ensuite agité et incubé à température ambiante dans l'obscurité pendant une période de 30 minutes, puis l'absorbance est mesurée à une longueur d'onde de 415 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-1800 (Shimadzu). Les résultats obtenus sont exprimés en milligrammes équivalents de quercétine par gramme d'extrait sec, en se basant sur une courbe d'étalonnage établie avec de la quercétine.

3.3.3. Dosage des tannins

Le dosage des tannins a été réalisé en utilisant la méthode de réaction à la vanilline. Un milieu réactionnel de 6 mL a été préparé, comprenant 1 mL d'échantillon, 2,5 mL de réactif A (solution de vanilline à 1% p/v dans l'éthanol) et 2,5 mL de réactif B (solution d'HCl ou d' H_2SO_4 à 9N dans l'éthanol), conformément aux travaux de **Price et al. (1978)**. La réaction a été effectuée à une température de 30°C pendant 15 minutes, puis l'absorbance a été mesurée à une longueur d'onde de 500 nm. Les résultats obtenus ont été exprimés en milligrammes équivalents d'acide tannique par gramme d'extrait sec, en se basant sur une courbe d'étalonnage de l'acide tannique.

3.4. Analyse FTIR

Pour l'analyse des extraits d'artichaut avant et après encapsulation, une spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) en réflexion totale atténuée (ATR) a été utilisée.

Pour cette étude, nous avons utilisé un spectromètre FTIR Cary-600 équipé d'un accessoire ATR (MIRacle™ ATR à une réflexion simple) avec un élément de réflexion interne en diamant (IRE) de PIKE Technologies. Nous avons analysé différents échantillons, y compris des extraits phénoliques non encapsulés, des levures, des extraits encapsulés dans des cellules de levures intacts et dans des cellules plasmolysées, en utilisant la spectroscopie FTIR en réflexion totale atténuée (ATR-FTIR). Les spectres ont été enregistrés en moyennant 32 scans dans la plage de 4000 à 400 cm^{-1} , avec une résolution de 4 cm^{-1} (**Sala et al. 2020**).

3.5. Effet de la microencapsulation sur l'activité antioxydante

Les activités antioxydantes des extraits d'artichaut avant et après encapsulation ont été évaluées par deux méthodes DPPH et ABTS.

3.5.1. Méthode DPPH

Le test de DPPH est un outil efficace pour mesurer l'activité antioxydante en milieu organique, tel que décrit par l'étude de **Blois (1958)**. Le test consiste à réduire le radical DPPH● en présence d'un antioxydant donneur d'hydrogène (AH), formant ainsi une forme non radicalaire, DPPH-H. Le radical DPPH● colore la solution en pourpre foncé et crée une forte absorption à 517 nm, mais l'ajout d'un antioxydant entraîne une décoloration de la solution au cours de la réaction, ce qui modifie la colorimétrie de la solution.

Pour réaliser le test de DPPH, il est nécessaire de préparer une solution de DPPH en dissolvant 3,94 mg de DPPH dans 100 mL d'éthanol pour obtenir une concentration de 0,01 mM. Les échantillons à tester sont dissous dans de l'éthanol et ajoutés à la solution de DPPH dans une série de tubes à essai contenant des concentrations croissantes d'échantillon (0-1 mg/mL). Les tubes sont ensuite incubés à l'abri de la lumière pendant 30 minutes à température ambiante. Après l'incubation, l'absorbance est mesurée à une longueur d'onde de 517 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible.

Le pourcentage d'inhibition de DPPH est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\% \text{ inhibition} = \frac{\text{absorbance du contrôle} - \text{absorbance de l'échantillon}}{\text{absorbance du contrôle}} \times 100$$

Par la suite, l'IC50, qui correspond à la concentration d'échantillon nécessaire pour réduire de moitié la quantité initiale de DPPH, a été déterminé à partir d'une courbe représentant le pourcentage d'inhibition de DPPH en fonction de la concentration de l'échantillon.

3.5.2. Méthode ABTS

Cette méthode repose sur la capacité des composés à piéger le radical-cation ABTS●+ pour produire une coloration bleu verdâtre. Le radical ABTS●+ est un sel d'ammonium dérivé de l'acide 2,2'-azinobis(3-éthylbenzothiazoline)-6-sulfonique et est formé par oxydation de l'ABTS, qui est initialement incolore. Cette réaction se produit en deux étapes : dans la première étape, le persulfate de potassium K₂S₂O₈ dans le milieu réactionnel arrache un électron à un atome d'azote de l'ABTS pour former le radical ABTS●+. Dans la deuxième étape, en présence d'un antioxydant donneur de H⁺, le radical d'azote piège un H⁺ pour former l'ABTSH+. Cela entraîne la décoloration de la solution (**Re et al, 1999**).

Pour préparer une solution mère d'ABTS, 5 ml d'eau sont mélangés avec 19,2 mg d'ABTS et 3,3 mg de K₂S₂O₈. Ce mélange réactionnel est ensuite placé en incubation, à l'obscurité, pendant 16

Matériel et méthodes

heures à température ambiante. Ensuite, pour obtenir une solution fille de travail d'ABTS+, la solution mère d'ABTS est diluée avec de l'eau jusqu'à ce qu'une absorbance d'environ 0,7 à 1 soit atteinte à une longueur d'onde de 734 nm (**Re et al., 1999**).

L'activité antioxydante a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$\% \text{ inhibition} = \frac{[(\text{absorbance du contrôle} - \text{absorbance de l'échantillon})]}{\text{absorbance du contrôle}} \times 100$$

Les pourcentages d'inhibition du radical ABTS ont été tracés en fonction des concentrations d'extrait pour déterminer l'index IC50.

3.6. Analyse statistique

Le calcul des moyennes plus ou moins l'écart type des trois répétitions ainsi que les représentations graphiques ont été effectués par Excel 2013 (Microsoft Excel Version 3. 2013, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA). Un test ANOVA à un seul facteur suivi par test Post hoc – Tukey a été réalisé à l'aide du logiciel Minitab® LLC (MinitabStatistical Software for windowsreleased 2019, version 19.1.1.0, Minitab, LLC sis 1829 Pine Hall Road, State College, PA, USA) pour comparer moyennes obtenues. Les lettres en exposant ; a, b, c, d indiquent une différence significative au seuil de signification 0,05. Les spectres de l'analyse FTIR ont été tracés par OriginLab 9.6(OriginLab Corporation. (2019). OriginPro 2019 SR1 (version 9.61.0000). Northampton, MA, USA).

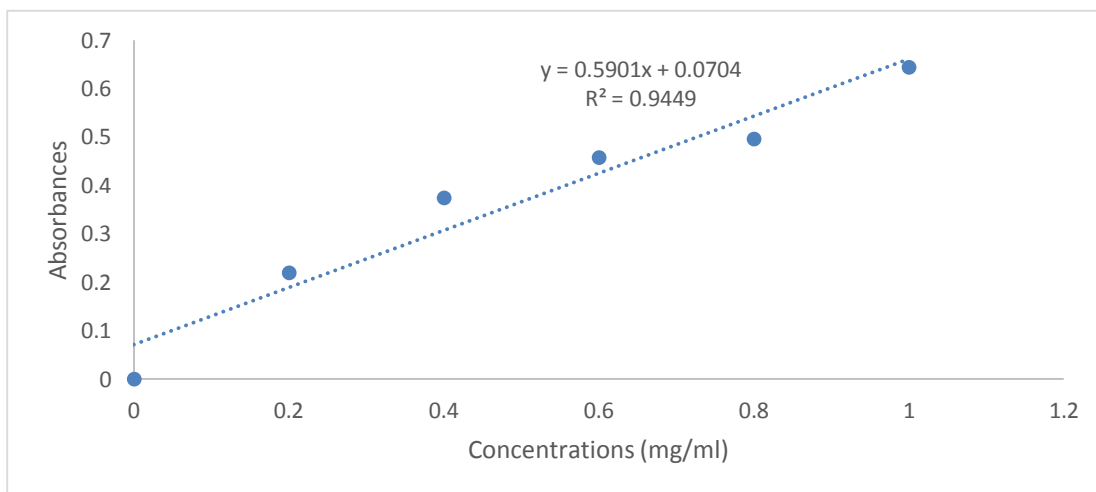
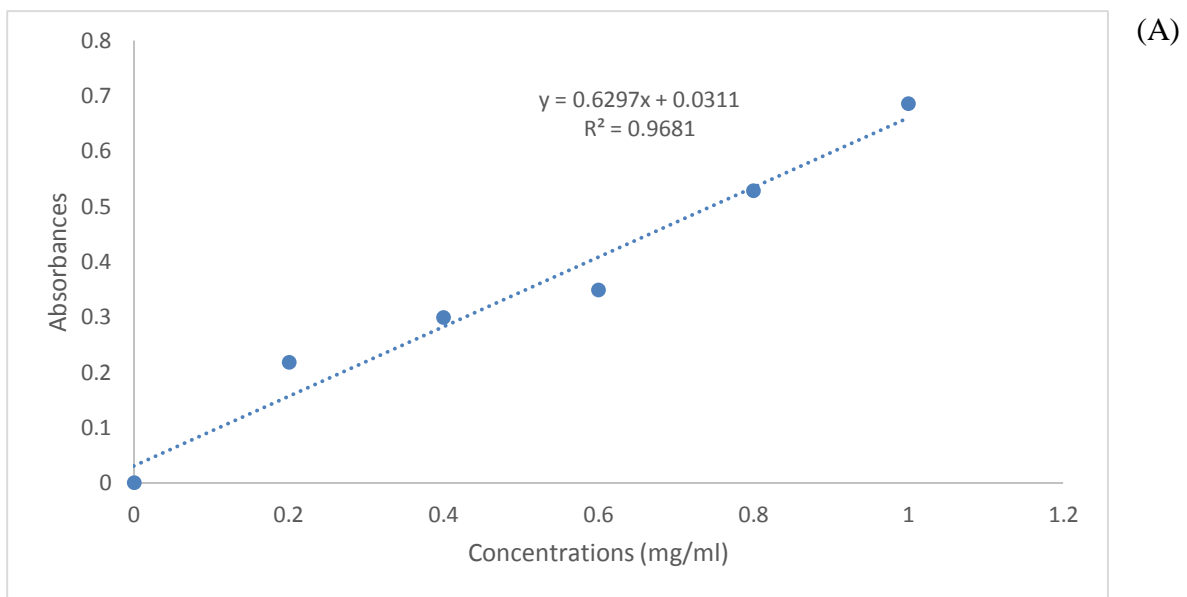
Résultats et discussion

Résultat et discussion :

1. Teneurs en composés phénolique d'artichaut.

1.1. Courbes d'étalonnage

Les teneurs en polyphénols totaux, flavonoïdes et tanins ont été quantifiées en utilisant des courbes d'étalonnage établies avec de l'acide gallique, de la quercétine et de l'acide tannique respectivement. Les résultats sont exprimés en microgrammes équivalents d'acide gallique par gramme de matière fraîche (mg EAG/g ES) pour les polyphénols totaux, en microgrammes équivalents de quercétine par gramme de matière fraîche (mg EQ/g ES) pour les flavonoïdes, et en microgrammes équivalents d'acide tannique par gramme de matière fraîche (mg EAT/g ES). (la figure 1.).



(B)

Résultats et discussion

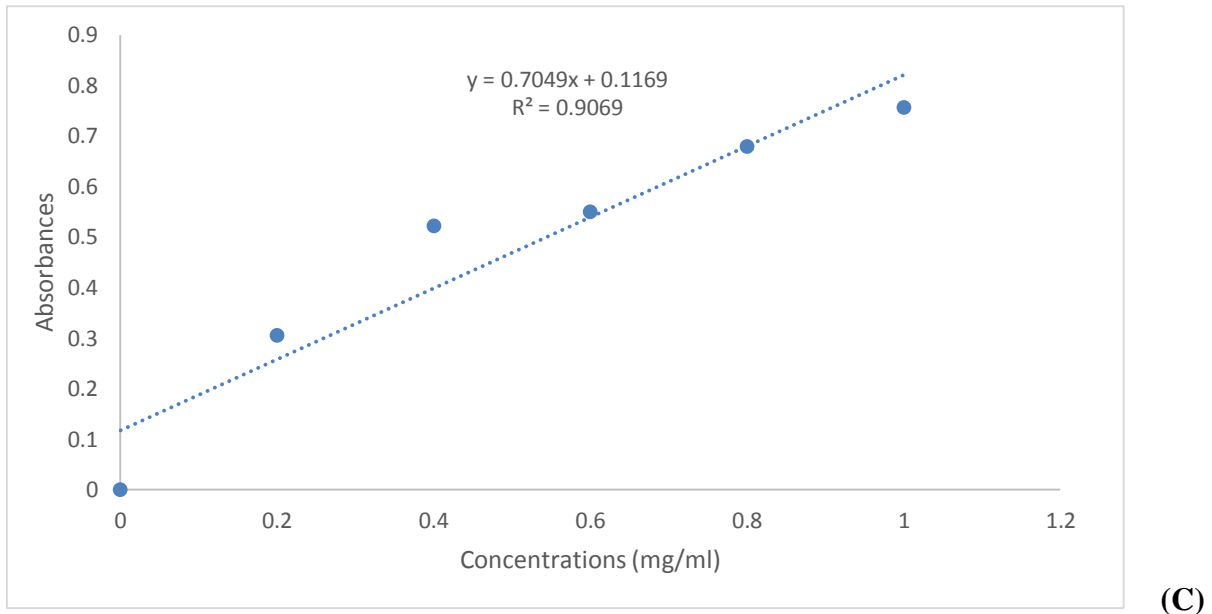
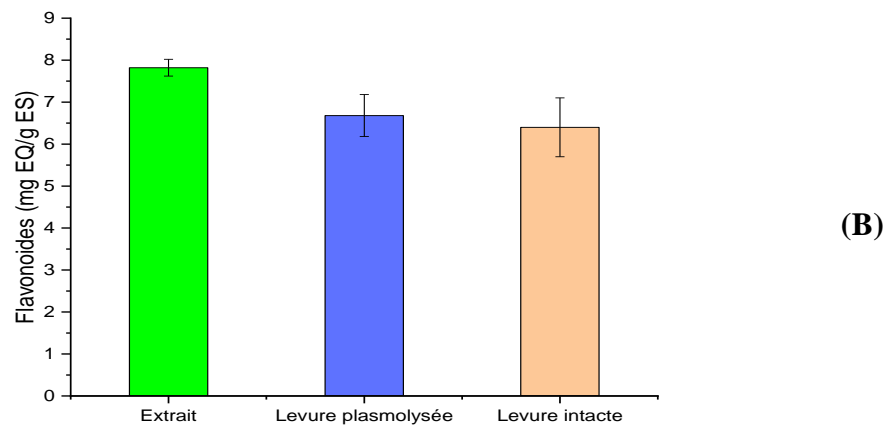
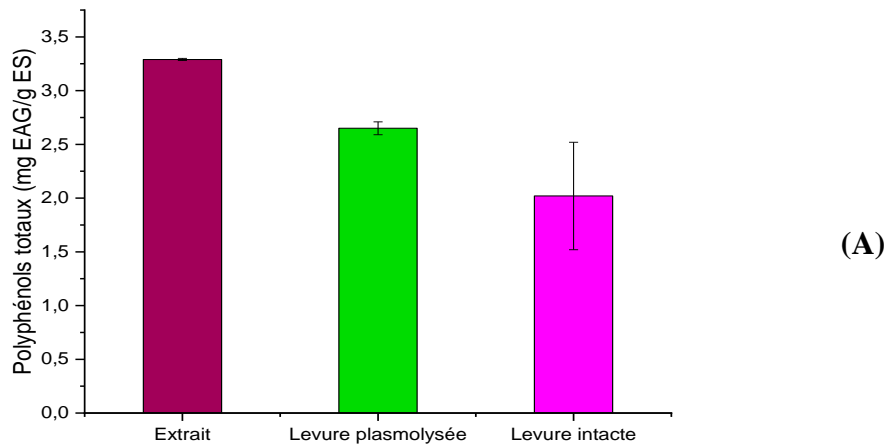


Figure 9 : Courbes d'étalonnage : A : Acide gallique, B : quercétine, C : Acide tannique

1.2. L'effet de l'encapsulation sur la teneur en composés phénoliques:

Les teneur en composés phénoliques (polyphénols totaux, flavonoïdes et tannins) obtenus avant et après l'encapsulation sont schématisés dans la figure suivante:



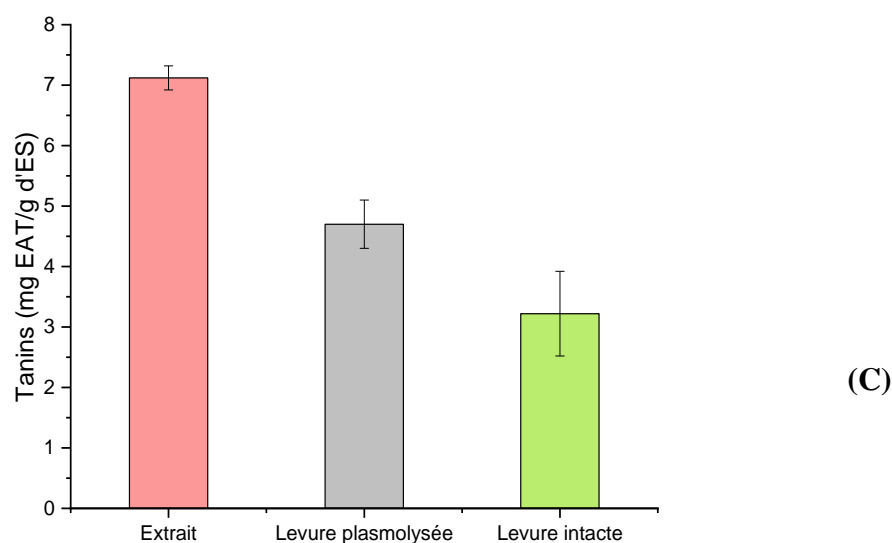


Figure 10: Effet d'encapsulation sur la teneur en composés phénoliques: A: Polyphénols totaux, B: flavonoïdes , C : tannins .

Les extraits d'artichaut ont révélé des concentrations de composés phénoliques de $3.29 \pm 0.01 \mu\text{g EAG/g d'ES}$, $7.82 \pm 0.06 \text{ mg EQ/g ES}$ et $7.12 \pm 0.003 \text{ mg EAT/g ES}$ pour les polyphénols totaux, les flavonoïdes et les tanins respectivement. Ces résultats diffèrent et sont inférieurs à ceux obtenus par **Mahmoudi et al. (2013)** qui ont observé des concentrations de composés phénoliques de $38.70 \pm 0.20 \text{ mg EAG/g ES}$ et $18.60 \pm 1.93 \text{ mg EQ/g}$ pour les polyphénols totaux et les flavonoïdes respectivement. Cependant, nos résultats ont montré des concentrations de tanins supérieures à celles rapportées par **Mahmoudi et al. (2013)**, évaluées à $3.47 \pm 0.03 \text{ mg EQ chat/g PS}$. De plus, nos résultats ont également démontré des concentrations de flavonoïdes et de tanins supérieures à celles rapportées par **Djenidi (2019)**, évaluées à $0.89 \pm 0.02 \mu\text{g EAT/mg}$ et $2.74 \pm 0.17 \mu\text{g EAT/mg}$ respectivement.

Une analyse ANOVA a révélé une différence significative ($p < 0.05$) entre les concentrations de composés phénoliques (polyphénols totaux, flavonoïdes et tanins) avant et après l'encapsulation. Les résultats obtenus ont indiqué une diminution des concentrations de polyphénols totaux, de flavonoïdes et de tanins. Cependant, il semble que les extraits encapsulés dans des cellules plasmolysées présentent des concentrations plus élevées de composés phénoliques (polyphénols totaux, flavonoïdes et tanins) que les extraits encapsulés dans des levures intactes. Les concentrations de polyphénols encapsulés dans des cellules plasmolysées sont d'environ $5.83 \pm 0.09 \text{ mg EAG/g d'ES}$, $6.68 \pm 0.02 \text{ mg EQ/g d'ES}$ et $4.70 \pm 0.001 \text{ mg EAT/g ES}$, tandis que les concentrations de polyphénols encapsulés dans des cellules intactes sont d'environ $4.16 \pm 0.07 \text{ mg EAG/g d'ES}$, $6.40 \pm 0.02 \text{ mg EQ/g ES}$ et $3.22 \pm 0.001 \text{ mg EAT/g ES}$. Afin de confirmer ces

Résultats et discussion

résultats, l'efficacité d'encapsulation a été calculée. Les résultats avant et après l'encapsulation sont enregistrés dans le tableau 03.

Tableau03 : L'efficacité d'encapsulation des composés phénoliques

| | EE(%) Polyphénols totaux | EE(%) Flavonoïdes | EE(%) Tanins |
|--------------------|--------------------------|-------------------|--------------|
| Levure plasmolysée | 80 ±0.58a | 85±0.78a | 66±0.58a |
| Levure intacte | 61±0.25b | 81±0.25b | 45±0.14b |

Les résultats présentés dans le tableau indiquent que l'efficacité des composés phénoliques (polyphénols totaux, flavonoïdes, tanins) est plus élevée dans les cellules plasmolysées par rapport aux cellules intactes. Les estimations sont de 80±0.58%, 85±0.78%, 66±58% pour les cellules plasmolysées, tandis qu'elles sont estimées à 61±0.25%, 81±0.25%, 45±0.14% pour les cellules intactes. Ce résultat est en accord avec les observations de **Shi et al. (2007)** qui ont observé un taux d'encapsulation (%EE) deux fois plus élevé pour l'acide chlorogénique polaire, tandis que **Paramera et al. (2011)** n'ont pas constaté d'amélioration de l'encapsulation de la curcumine, qui est plus hydrophobe, dans les cellules plasmolysées.

En plus de leur impact potentiel sur l'encapsulation des composés hydrophiles, les cellules plasmolysées présentent l'avantage d'éliminer les matériaux cellulaires qui pourraient interagir avec le matériau encapsulé ou avoir un effet lors de l'utilisation de la microcapsule (**Pham-Hoang et al., 2013**).

La plasmolyse des cellules de levure induite par l'exposition au NaCl provoque une contraction du cytoplasme et une séparation de la membrane cellulaire par rapport à la paroi cellulaire. Cela crée des espaces qui facilitent la pénétration des substances telles que les polyphénols (**Paramera et al., 2011**). Cette modification de l'état physiologique des cellules de levure plasmolysées crée une surface accrue qui favorise l'interaction avec les polyphénols, facilitant ainsi leur absorption et leur accumulation à l'intérieur de la cellule (**Kavosi et al., 2017**).

1.3 Analyse FTIR des extraits avant et après encapsulation

Les résultats de l'analyse FTIR sont présentés dans la figure

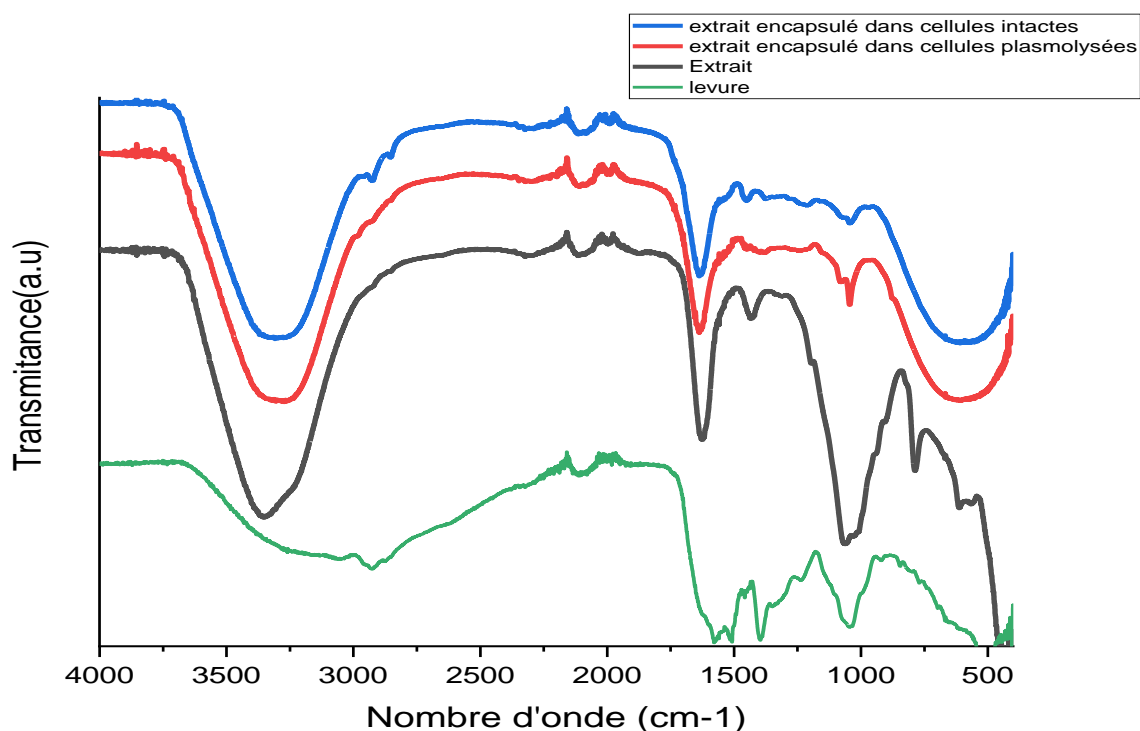


Figure 11 : Spectres FTIR des extraits avant et après encapsulation.

Comme on peut le constater, le spectre des cellules de levure présenté dans la figure est cohérent avec les résultats de **Ci *et al.* (2002)**. En se basant sur les résultats de notre étude précédente (**Shi *et al.*, 2007**), ainsi que sur ceux de **Larionova *et al.* (1999)** et **Ci *et al.* (2002)**, la large bande d'absorption à environ 3342 cm^{-1} peut être attribuée aux vibrations OH des polysaccharides présents dans les cellules de levure et les polyphénols. Les bandes d'absorption à environ 2854, 2925 et 2958 cm^{-1} des microcapsules peuvent être attribuées au chevauchement des vibrations d'étirement symétrique CH₂, d'étirement asymétrique CH₂ et d'étirement asymétrique CH₃ des acides nucléiques, des protéines et des lipides. Par ailleurs, la bande d'absorption à environ 1537 et 1657 cm^{-1} des microcapsules peut être attribuée aux bandes d'amide II et I des protéines présentes dans les cellules de levure, chevauchées par les vibrations d'étirement C-C conjuguées et les vibrations squelettiques de l'anneau aromatique du resvératrol. De plus, le groupe CH₃ des cellules de levure donne lieu au mode de flexion symétrique à environ 1397 cm^{-1} et au mode de flexion asymétrique à environ 1458 cm^{-1} dans les microcapsules, et l'absorbance à environ 1458 cm^{-1} peut également être chevauchée par les vibrations squelettiques de l'anneau aromatique du polyphénols.

En résumé, le spectre des microcapsules était presque un spectre superposé de l'extrait et de cellules de levure dans la plage de 4400 à 970 cm^{-1} . Cependant, les différences entre le spectre des microcapsules et le spectre des cellules de levure dans la région des empreintes digitales (1390–

Résultats et discussion

650 cm⁻¹) sont peut-être dû à la formation des interactions entre les polyphénols et les levures (Shi *et al.*, 2008).

2. Effet de l'encapsulation sur l'activité antioxydante d'artichaut

Les activités antioxydantes mesurées par IC₅₀ (mg/ml) sont présentées dans le tableau 04.

Tableau 04 : Activité antioxydante par la méthode DPPH et ABTS

| | IC ₅₀ (mg/ml) DPPH | IC ₅₀ (mg/ml) ABTS |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Extrait | 0.80±0.25a | 0.13±0.15a |
| Levure plasmolysée | 0.55±0.14b | 0.108±0.88b |
| Levure intacte | 0.3±0.46c | 0.104±0.25b |

L'analyse ANOVA a mis en évidence une différence significative ($p < 0,05$) entre l'extrait non encapsulé et l'extrait encapsulé dans le test DPPH. L'encapsulation a conduit à une augmentation de l'activité antioxydante. En particulier, l'encapsulation avec des cellules intactes a démontré une activité supérieure, avec une IC₅₀ de $0,3 \pm 0,46$ mg/ml, comparée à l'encapsulation avec des cellules plasmolysées, dont l'IC₅₀ était de $0,55 \pm 0,14$ mg/ml. Dans le test ABTS, l'encapsulation a également entraîné une augmentation significative de l'activité antioxydante. Aucune différence significative ($p > 0,05$) n'a été observée entre les deux modes d'encapsulation. Les valeurs d'IC₅₀ pour les cellules plasmolysées et les cellules intactes étaient similaires, soit respectivement $0,104 \pm 0,25$ mg/ml et $0,108 \pm 0,25$ mg/ml. En résumé, les résultats montrent que l'encapsulation a augmenté de manière significative l'activité antioxydante dans les deux tests, tant avec les cellules intactes qu'avec les cellules plasmolysées, sans différence significative entre les deux modes d'encapsulation dans le test ABTS.

L'encapsulation a provoqué une augmentation de l'activité antioxydante pour les deux méthodes DPPH et ABTS. Cette augmentation est dû à la synergie entre les composés phénoliques et la levure. Des expériences pertinentes ont prouvé que le β -glucane et le mannane des levures peuvent améliorer la capacité antioxydante des capsules (Guo *et al.*, 2019).

L'activité antioxydante du DPPH est plus élevée dans les cellules de levure intactes par rapport aux cellules de levure plasmolysées. Cette observation peut s'expliquer par le fait que la plasmolyse est une condition expérimentale qui peut perturber les processus cellulaires normaux. En conditions physiologiques normales, les cellules de levure intactes peuvent présenter une activité antioxydante plus élevée grâce à l'intégrité cellulaire (Radovanovi *et al.*, 2009 ; Brito *et al.*, 2014).

Résultats et discussion

Les cellules intactes préservent leur structure et leur intégrité membranaire, qui sont essentielles pour protéger contre le stress oxydatif. Les membranes cellulaires, composées de lipides et de protéines, jouent un rôle crucial dans cette protection en étant la cible privilégiée des radicaux libres, notamment des acides gras polyinsaturés. Maintenir l'intégrité de la membrane permet de prévenir l'intrusion des espèces réactives de l'oxygène (ERO) et de réduire ainsi le stress oxydatif (**Gonçalves *et al.*, 2017**).

Les cellules intactes abritent également des organites cellulaires tels que les mitochondries et les peroxysomes, qui jouent un rôle clé dans la production et la neutralisation des radicaux libres. Ces organites sont équipés de systèmes enzymatiques puissants tels que les superoxyde dismutases, les catalases et les peroxydases, qui participent activement à la détoxification des ERO. En revanche, lorsque les cellules sont plasmolysées, ces organites peuvent être altérés ou perdus, ce qui diminue leur capacité à neutraliser les radicaux libres (**Fu *et al.*, 2021**).

De plus, les cellules intactes sont capables de maintenir un équilibre redox optimal grâce à la régulation fine de leur potentiel redox et à la production d'antioxydants endogènes tels que le glutathion et la vitamine C. Ces antioxydants jouent un rôle majeur dans la neutralisation des radicaux libres et la protection des composants cellulaires contre les dommages oxydatifs. En revanche, lorsque les cellules sont plasmolysées, leur métabolisme peut être altéré et la production d'antioxydants endogènes peut être réduite, entraînant une diminution de l'activité antioxydante (**Rice-Evans *et al.*, 1995**).

En ce qui concerne le test ABTS, il a été observé que l'encapsulation avec des cellules intactes et plasmolysées présente une activité antioxydante supérieure par rapport à l'encapsulation avec des cellules intactes et plasmolysées pour le test DPPH. Cela peut être expliqué par le fait que la méthode ABTS est plus sensible aux composés solubles dans les milieux aqueux, et les cellules plasmolysées ont tendance à libérer davantage de composés antioxydants dans le milieu de test (**Akanni *et al.*, 2014; Sarr *et al.*, 2015**).

D'autre part, la méthode DPPH détecte principalement les composés solubles dans les solvants organiques. Par conséquent, lorsque l'on évalue l'activité antioxydante des cellules encapsulées avec la méthode DPPH, les cellules intactes peuvent présenter une meilleure activité antioxydante en raison de la présence de composés antioxydants liposolubles à l'intérieur des membranes cellulaires (**Dudonne *et al.*, 2009**).

Conclusion

Conclusion

Conclusion

L'objectif principal de notre étude est d'estimer la quantité de polyphénols totaux, de flavonoïdes et de tanins, ainsi que d'évaluer l'effet de l'encapsulation des composés actifs dans des cellules de levure sur la teneur en composés phénoliques et l'activité antioxydante de l'artichaut. Les résultats obtenus ont révélé une réduction dans les niveaux de polyphénols totaux, de flavonoïdes et de tanins. Néanmoins, il semble que les extraits, lorsqu'encapsulés dans des cellules plasmolysées, affichent des concentrations plus élevées de composés phénoliques tels que les polyphénols totaux, les flavonoïdes et les tanins par rapport aux extraits encapsulés dans des levures intactes. De plus, l'activité antioxydante des extraits encapsulés de l'artichaut était également significativement plus élevée que celle des échantillons non encapsulés. Les composés phénoliques sont connus pour leurs propriétés antioxydantes, et la préservation de leur activité antioxydante dans les extraits encapsulés renforce l'efficacité de l'artichaut en tant qu'agent protecteur contre les dommages oxydatifs.

Pour approfondir ce travail, il serait souhaitable de se concentrer sur les aspects suivants :

Étudier davantage les mécanismes de l'encapsulation des polyphénols par des levures intactes et plasmolysées afin de mieux comprendre les différences observées dans les concentrations de composés phénoliques.

Explorer les effets de différentes techniques d'encapsulation sur la libération contrôlée des polyphénols lors de l'utilisation de levures intactes et plasmolysées.

Évaluer les propriétés physico-chimiques des microcapsules contenant des levures intactes et plasmolysées pour déterminer leur stabilité et leur capacité à préserver les polyphénols.

Examiner les interactions des polyphénols encapsulés avec d'autres composés présents dans les levures intactes et plasmolysées, et évaluer leur impact sur la biodisponibilité des polyphénols.

Investiguer les applications potentielles des levures encapsulées contenant des polyphénols dans des domaines tels que l'alimentation, la médecine ou les cosmétiques, en étudiant leur activité biologique et leurs effets bénéfiques sur la santé.

Comparer les performances des levures intactes et plasmolysées en termes d'efficacité d'encapsulation, de stabilité et de libération des polyphénols, en prenant en compte différents paramètres expérimentaux tels que les conditions d'encapsulation, la concentration des polyphénols et le temps de stockage.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

Référence bibliographique

- Abdou, S. A. R. R., DIENG, S. I. M., DIATTA-BADJI, K., DIATTA, W., FALL, A. D. (2023). Etude de l'activité antioxydante de l'extrait éthanolique des feuilles de *Ficus platyphylla* Del. (Moraceae). *Pharmacopée et médecine traditionnelle africaine*, 21(2), 67-71.
- Abu-Amsa, R., Croft, K.D., Puddey, I.B., Proudfoot, J.M., Beilin, L.J. (1996). Phenolic content of various beverages determines the extent of inhibition of human serum and low-density lipoprotein oxidation in vitro: identification and mechanism of action of some cinnamic acid derivatives from red wine. *Clin Sci (Lond)*, 91(4),44–958.
- Achat, S. (2013). Polyphénols de l'alimentation : extraction, pouvoir antioxydant et interactions avec des ions métalliques (Thèse de doctorat). Université d'Avignon.
- Akanni, O.O., Owum,i S.E., Adaramoye, O.A.(2014). In vitro studies to assess theantioxidative, radical scavenging andarginase inhibitory potentials of extractsfrom *Artocarpus altilis*, *Ficusexasperata* and *Kigelia africana*. *AsianPac. J. Trop. Biomed.*, 4(1): S492-S499.DOI: 10.12980/APJTB.4.2014C581.
- Alkurd, A., Hamed, T. R., Al-Sayyed, H. (2008). Tannin Contents of Selected Plants Used in Jordan. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*. 4: pp 265-274.
- Anbinder, P.S., Deladino, L., Navarro, A.S., Amalvy, J.I., Martino, M.N. (2011).Yerba mate extract encapsulation with alginate and chitosan systems: interactions between active compound encapsulation polymers. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 1, 80-87.
- Arts, I. C., Hollman, P. C. (2005). Polyphenols and disease risk in epidemiologic studies. *Am. J. Clin. Nutr.* 81(suppl), 317S–325S.
- Arts, M.J.T.J., Haenen, G.R.M.M., Voss, H.P., Bast, A. (2001). Masking of antioxidant capacity bytheinteraction of flavonoids with protein. *Food and Chemical Toxicology*, 39(8), 787–791.
- Asami, D.K., Hong, Y.J., Barrett,D.M., Mitchell,A.E. (2003). Comparison of the total phenolic and ascorbic content of freeze-dried and air- dried marionberry, strawberry, and corn grown using conventional organic , and sustainable agricultural practices. *J Agric.Food Chem.*,51 ,1237–1241.

Références bibliographiques

- Augustin, M.A., Hemar, Y. (2009). Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients. *Chemical Society Reviews*, 38, 892 - 901.
- Bahorun, T. (1997). Substances Naturelles actives : La flore mauricienne une source d'approvisionnement potentielle. Université de Maurice. AMAS, Food. Agr. Res. Coun, Réduit. Mauritius, p 83.
- Beckman, C. H. (2000). Phenolic-storing cells: keys to programmed cell death and periderm formation in wilt disease resistance and in general defence responses in plants? *Physiol. Mol. Plant Pathol.*, 57, 101–110.
- Benoît ,J-P., Richard, J et Venier-Julienne ,M.-C .(2013), « Microencapsulation », *Techniques de l'Ingénieur. Trends in Food & Technology*, 15, 330-347.
- Biglari, F., Alkarkhi, A. F., Easa, A. M. (2008). Antioxidant activity and phenolic content of various date palm (*Phoenix dactylifera*) fruits from Iran. *Food chemistry*, 107(4), 1636-1641.
- Bishop, J. R. P., Nelson, G., & Lamb, J. (1998). Microencapsulation in yeast cells. *Journal of Microencapsulation*, 15, 761e773.
- Blanquet, S., Garrait, G., Beyssac, E., Perrier, C., Denis, S., He´brard, G., *et al.* (2005). Effects of cryoprotectants on the viability and activity of freeze dried recombinant yeasts as novel oral drug delivery systems assessed by an artificial digestive system. *Euro-pean Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 61, 32e39.
- Blois, M.S.(1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature*, 181, 1199–1200.
- Bravo, L. (1998). Polyphenols: Chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. *Nutrition Reviews*, 56 (11): pp 317-333. _Harborne JB. (1989). *Methods in plant biochemistry, I: plant phenolics*. London: Academic Press.
- Bravo, L. (1998). Polyphenols: Chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. *Nutrition Reviews*. 56 (11): pp 317-333.
- Brito, A., Areche, C., Sepúlveda, B., Kennelly, E.J., Simirgiotis, M.J. (2014). Anthocyanin Characterization, Total Phenolic Quantification and Antioxidant Features of Some Chilean Edible Berry Extracts. *Molecules*, 19, 10936–10955.

Références bibliographiques

- Bruneton, J. (1999). *Pharmacognosie : phytochimie, plantes médicinales* (3^eéd.). Paris, France : Tec et Doc.
- Bruneton, J. (2009). *Pharmacognosie, Phytochimie, Plantes médicinales* (4^e éd.). Paris, France : Lavoisier.
- Cegledi, Ena., Ivona Elez Garofulić., Zoran Zorić., Marin Roje., Verica Dragović-Uzelac.(2022).Effect of Spray Drying Encapsulation on Nettle Leaf Extract Powder Properties, Polyphenols and Their Bioavailability *Foods* 11, no. 18: 2852.
- Celli, G.B., Ghanem, A., Brooks, M.S.L. (2015). Bioactive Encapsulated Powders for Functional Foods – a Review of Methods and Current Limitations, *8*, 1825 - 1837.
- Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., Chern, J. C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178-182.
- Chaouch, T.M. (2014). Contribution à l'étude des activités anti oxydantes et antimicrobiennes desextraits de quelques plantes médicinales (Thèse de doctorat). Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- Cheng, S. S., J. Y. Liu, E. H. Chang et S. T. Chang. (2008).Antifungal activity of cinnamaldehyde and eugenol congeners against wood-rot fungi. *Bioresource Technology*,99(11): 5145-5149.
- Cheyrier, V .,Sarni-Manchado ,P. (2006). Structures phénoliques et goût. Les polyphénols en agroalimentaire. Lavoisier , 398.
- Ci, Y.X., Zang, K.S., Gao, T.Y.(2002). FTIR study of microbes. *Chem. J. Chin. Univ.* 6, 1047–1049.
- Collin, S et Crouzet, J. (2011). *Polyphénols et procédés : Transformation des polyphénols au travers desprocédés appliqués à l'agroalimentaire*. Paris, France : Lavoisier Tec & Doc .
- Coradello, G., Tirelli, N. (2021). Yeast cells in microencapsulation. General features and controlling factors of the encapsulation process. *Molecules*, 26(11), 3123.
- Cowan, M.M. (1999). Plant products as antimicrobial agents, *Clinical Microbiology Reviews*, 12(4), 564- 582.

Références bibliographiques

- Cushnie, T. P. T et A. J. Lamb. (2005). Antimicrobial activity of flavonoids. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 26(5): 343-356.
- D'Archivio, M., Filesi, C., Di Benedetto, R., Gargiulo, R., Giovannini, C., Masella, R. (2007). Polyphenols, dietary sources and bioavailability. *Ann. Ist. Super. Sanita*, 43, 348–361.
- Dadkhodazade, E., Khanniri, E., Khorshidian, N., Hosseini, S.M., Mortazavian, A.M., Moghaddas Kia, E.(2021).Yeast cells for encapsulation of bioactive compounds in food products: A review. *Biotechnol Progress*;e3138.
- Dai, J., Mumper, R. J. (2010). Plant Phenolics : Extraction, Analysis and Their Antioxydant and Anticancer Propreties. *Molecules* 15(10), 7313-52.
- Deladino, L., Anbinder, P.S., Navarro, A.S., Martino, M.N .(2008). Encapsulation of natural antioxidants extracted from *Ilex paraguariensis*. *Carbohydrate Polymers*, 71 , 126-134.
- Dewick, P.M. (1995). The biosynthesis of shikimate metabolites. *Natural Product Reports*, 12(6), 579-607.
- Djenidi, H. (2019).activité antioxydante et antiradicalaire des aliments d'origine végétale consommés dans les régions de biskra et sétif. thèse de Doctorat: Université Ferhat Abbas Sétif 1.
- Dontha, S. (2016). A review on antioxidant methods. *Asian Journal of Pharmaceutical and ClinicalResearch*, 9(2), 14-32.
- Dubey, R .(2009).« Microencapsulation Technology and Applications », *Def. Sci. J.*, vol. 59, no1, p.82-95.
- Dudonne, S., Vitrac, X., Coutiere, P., Woillez, M.,Merillon, J-M.(2009). Comparative studyof antioxidant properties and totalphenolic content of 30 plant extracts ofindustrial interest using DPPH, ABTS,FRAP, SOD, and ORAC assays. *J. Agric.Food Chem.*, 57(5), 1768-1774.
- Dziezak, J.D. (1988). Microencapsulation and encapsulation ingredients. *Food Technology*,42, 136 - 151.
- Fabbri, A.D., Crosby, G.A. (2016) .A review of the impact of preparation and cooking on the nutritional quality of vegetables and legumes. *Internat. J. Gastron. Food Sci.*, 3,2–11

Références bibliographiques

- Kalinina, E., Skrypnik, L., Nebreeva, S., Dzhobadze, G., Vatagina, A., Feduraev, P., Chupakhina, G. (2022). Variability of phenolic compound accumulation and antioxidant activity in wild plants of some Rumex species (Polygonaceae). *Antioxidants*, 11(2), 311.
- Finch, C.A., Bodmeier R. (2005). *Microencapsulation*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim, 10, 575.
- Focke, W. W., Van der Westhuizen, I., Grobler, A. L., Nshoane, K. T., Reddy, J. K., Luyt, A. S. (2012). The effect of synthetic antioxidants on the oxidative stability of biodiesel. *Fuel*, 94, 227-233.
- Fraga, C.G., Galleano, M., Verstraeten, S.V., Oteiza, P.I. (2010). Basic biochemical mechanisms behind the health benefits of polyphenols. *Mol. Aspects. Med.*, 31, 435–445.
- Fu, J., Song, L., Guan, J., Sun, C., Zhou, D., Zhu, B. (2021). Encapsulation of Antarctic krill oil in yeast cell microcarriers: Evaluation of oxidative stability and in vitro release. *Food Chem.*, 338, 128089.
- Giraud, S. (2002). *Microencapsulation d'un diisocyanate et d'un phosphate d'ammonium, application: élaboration d'un système polyuréthane monocomposant à propriété retardatrice de flamme pour l'enduction textile. Thèse de doctorat. Université des sciences et technologies de Lille.*
- Goetz, P., le Jeune, R. (2007). Artichaut, *Cynara scolymus*. *Phytothérapie*, (5) : 219-222.
- Gonçalves, Bruna., Moeenfarid, M., Rocha, Fernando, *et al.* (2017). Microencapsulation of a natural antioxidant from coffee chlorogenic acid (3-caffeoylquinic acid). *Food and Bioprocess Technology*, vol. 10. p. 1521-1530.
- Gouin, S. (2004). Micro-encapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. *Trends in Food Technology*, 15, 330-347.
- Guo, W.Y., Gu, X.L., Tong, Y.Q., Wang, X., Wu, J., Chang, C. (2019). Protective effects of mannan/β-glucans from yeast cell wall on the deoxyriyalenol-induced oxidative stress and autophagy in IPEC-J2 cells, *Int. J. Biol. Macromol.* 135, 619–629.
- Han, X., Shen, T., Lou, H. (2007). Dietary polyphenols and their biological significance. *Int. J. Mol. Sci.*, 8, 950–988.
- Harborne JB. (1989). *Methods in plant biochemistry, I: plant phenolics*. London: Academic Press.

Références bibliographiques

- Hu, L., Zhang, J., Hu, Q., Gao, N., Wang, S., Sun, Y., Yang, X. (2016). Microencapsulation of Brucea Javanica Oil: Characterization, Stability and Optimization of Spray Drying Conditions. *J. Drug Deliv. Sci. Technol*, 36, 46–54.
- Impellizzeri, D., Esposito, E., Mazzon, E., Paterniti, I., Di Paola, R., Bramanti, P., Cuzzocrea, S. (2012). The effects of a polyphenol present in olive oil, oleuropein aglycone, in an experimental model of spinal cord injury in mice. *Biochemical pharmacology*, 83(10), 1413-1426.
- Jacociunas, L. V., Andrade, H. H. R., Lehmann, M., Abreu, B. R. R., Ferraz, A. B. F Silva, J., *et al.* (2013). Artichoke induces genetic toxicity in the cytokinesis-block micronucleus (CBMN) cytome assay *Food and Chemical Toxicology*, 55, 56-59.
- Jasiński, M., Mazurkiewicz, E., Rodziewicz, P., Figlerowicz, M. (2009). Flavonoids' structure, properties and particular function for legume plants (in Polish). *Biotechnologia*, 2, 81–94.
- Karaman, K. (2020). Characterization of *Saccharomyces cerevisiae* based microcarriers for encapsulation of black cumin seed oil: stability of thymoquinone and bioactive properties. *Food Chem*, 313:126129.
- Kavosi, M., Mohammadi, A., Shojaee-Aliabadi, S., Khaksar, R., Hosseini Seyed, M. (2017). Characterization and oxidative stability of purslane seed oil microencapsulated in yeast cells biocapsules. *J Sci Food Agric*, 98(7), 2490-2497.
- Khan, M. T. H., Ather, K. D. Thompson., Gambari, R. (2005). Extracts and molecules from medicinal plants against herpes simplex viruses. *Antiviral Research* 67(2): 107-119.
- Kurek, M. A., Majek, M., Onopiuk, A., Szpicer, A., Napiórkowska, A., Samborska, K. (2023). Encapsulation of anthocyanins from chokeberry (*Aronia melanocarpa*) with plasmolyzed yeast cells of different species. *Food and Bioproducts Processing*, 137, 84-92.
- Landete, J.M. (2013). Dietary intake of natural antioxidants: vitamins and polyphenols. *Crit. Rev. Food. Sci. Nutr.*, 53, 706–721.
- Larionova, N.V., Kazanskaya, N.F., Larionova, N.I., Ponchel, G., Duchene, D. (1999). Preparation and characterization of microencapsulated proteinase inhibitor aprotinin. *Biochemistry (Moscow)* 64, 857–862.

Références bibliographiques

- Lattanzio, V., Kroon, P. A., Linsalata, V., Cardinali, A. (2009). Globe artichoke: A functional food and source of nutraceutical ingredients. *Journal of functional foods*, 1(2), 131-144.
- Lattanzio, V., Van Sumere, C.F. (1987) Changes in phenolic compounds during the development and cold storage of artichoke. *Food Chem*, 24(1),37–50.
- Lattanzio, V., Morone, I. (1979) Variations of the orthodiphenol content in *Cynara scolymus* L. during the plant growing season. *Experientia* , 35,993–994.
- Le Bourvellec, C., Gouble, B., Bureau S., Reling, P., Bott, R., Ribas-Agusti, A., Audergon, J.M., Renard, C.M.G.C. (2018). Impact of canning and storage on apricot carotenoids and polyphenols. *Food Chem.*, 240,615-625.
- Lenoir, L. (2011). Effet protecteur des polyphénols de la verveine odorante dans un modèle d'inflammation colique chez le rat (Thèse de Doctorat). Université D'Auvergne.
- Link, A., Balaguer, F., Goe, A. (2010). Cancer chemoprevention by dietary polyphenols: Promising role for epigenetics. *Biochemical Pharmacology*, 80(12), 1771-1792.
- Lombardo, S., Pandino, G, Mauromicale , G *et al.* (2010). Influence of genotype, harvest time and plant part on polyphenolic composition of globe artichoke [*Cynara cardunculus* L. var. *scolymus* (L.) Fiori]. *Food Chem* ,119,1175–1181.
- Macheix , J .J., Fleurie, A., Jay-Allemand C. (2005). Les composés phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Lausanne, Presses Polytechniques et Unuversitaires Romandes, 192.
- Macheix, J. J., Fleuriet, A., Billot, J. (1990). Fruit phenolics. Boca Raton, FL: CRC Press, USA: 101–126.
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., Desobry, S .(2006). Flavour encapsulation and controlled release – a review. *International Journal of Food Science and Technologie*, 41 , 1-21.
- Mahmoudi, S., Khali, M., Mahmoudi, N. (2013). Etude de Textraction des composés phénoliques de différentes parties de la fleur d'artichaut (*Cynara scolymus* L.). *Nature & Technology*, (9), 35.
- Majewska, M., Czeczot, H. (2009). Flavonoids in prevention and therapy of diseases (in Polish). *Ter. Lek.*, 65, 369–377.

Références bibliographiques

- Malenčić, D., Cvejić, J., Miladinović, J.(2012). Polyphenol content and antioxidant properties of colored soybean seeds from central Europe. *J Med Food.* , 15(1),89– 95.
- Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C & Jiméenez, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American journal of clinical nutrition*, 79(5), 727–747.
- Merlin, M. (2015). La consommation de polyphénols, en particulier de vin rouge, peut-elle avoir des effets sur la maladie d'Alzheimer : État de la question (Thèse de doctorat). Université de Bordeaux.
- Micap Plc. (2004). Micro-organism microcapsules, UK patent application, GB2396107A.
- Mulvihill, E. E., Huff, M. W. (2010). Antiatherogenic properties of flavonoids : Implications for cardiovascular health. *Can. J. Cardiol.* 26 (Suppl A), 17A-21A.
- Myburgh ,K.H. (2014). Polyphenol supplementation: benefits for exercise performance or oxidative stress. *Sports Med. Suppl.*, 1: 57–70.
- Nguyen, T. T., Phan-Thi, H., Pham-Hoang, B. N., Ho, P. T., Tran, T. T. T., Waché, Y. (2018). Encapsulation of Hibiscus sabdariffa L. anthocyanins as natural colours in yeast. *Food research international*, 107, 275-280.
- Olszowy , M. (2019). What is responsible for antioxidant properties of polyphenolic compound from plants?. *Plant Physiology and Biochemistry*, 144, 135-143.
- Ouedraogo, S., Yoda, J., Traore, T. K., Nitiema, M., Sombie, B. C., Diawara, H. Z., Semde, R. (2021). Production de matières premières et fabrication des médicaments à base de plantes médicinales. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(2), 750-772.
- Pandino, G., Lombardo, S., Mauromicale, G., Williamson, G. (2011). Profile of polyphenols and phenolic acids in bracts and receptacles of globe artichoke (*Cynara cardunculus* var. *scolymus*) germplasm *Journal of food composition and analysis*, 24(2), 148-153.
- Paramera, E.I., Konteles ,S.J., Karathanos ,V.T. (2011b). Microencapsulation of pharmaceutical preparations. *Arzneimittel Forschung*, (46). 1086-1089.
- Parr, A.J., Bolwell, G.P. (2000). Phenols in plant and in man. The potential for possible nutritional enhancement of the diet by modifying the phenols content or profile. *J. Sci. Food Agric.*, 80, 985–1012.

Références bibliographiques

- Paulo, F., Santos, L. (2017). «Design of experiments for microencapsulation applications: A review », *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 77, p. 1327- 1340.
- Phạm-Hoang, B. N., Romero-Guido, C., Phan-Thi, H., Waché Y. (2013). Encapsulation in a natural, preformed, multi- component and complex capsule: yeast cells. *Applied microbiology and biotechnology*, 97, 6635-6645.
- PLAGES, J. N. (2014). Artichaut et Cardon Quels sont ces chardons que l'on mange? *Histoire des plantes* (629) , 42-45.
- Price, M. L., Van Scoyoc, S., Butler, L. G. (1978). A critical evaluation of the vanillin reaction as an assay for tannin in sorghum grain. *Journal of agricultural and food chemistry*, 26(5), 1214-1218.
- Radovanovic, A., Radovanović, B., Jovančićević, B .(2009). Free radical scavenging and antibacterial activities of southern Serbian red wines. *Food Chem*, 117, 326–331.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic. Biol. Med*, 26, 1231.
- Rezaire, A. (2014). Activité anti-oxydante, et caractérisation phénolique du fruit de palmier amazonien *Oenocarpus bataua* (patawa) (Thèse de Doctorat). Université des Antilles et de la Guyane.
- Rice-evans, C. A., Miller, N. J., Bolwell, P. G., Bramley, P. M., Pridham, J. B. (1995). The relative antioxidant activities of plant- derived polyphenolic flavonoids. *Free radical research*, 22(4), 375-383.
- Rice-Evans, C.A., Miller, N.J., Paganga, G. (1996). Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. *Free Radical Biology and Medicine*, 20(7), 933-56.
- Robert, P., Gorena, T., Romero, N., Sepulveda, E., Chavez, J., Saenz, C. (2010). Encapsulation of Polyphenols and Anthocyanins from Pomegranate (*Punica granatum*) by Spray Drying. *Int. J. Food Sci. Technol*, 45, 1386–1394.
- Robert, P., Gorena, T., Romero, N., Sepulveda, E., Chavez, J., Saenz, C. (2020) Encapsulation of Polyphenols and Anthocyanins from Pomegranate (*Punica granatum*) by Spray Drying. *Int. J. Food Sci. Technol*, 45, 1386–1394.

Références bibliographiques

- Romani, A., Pinelli, P., Cantini, C., Cimato, A., Heimler, D. (2006). Characterization of Violetto di Toscana, a typical Italian variety of artichoke (*Cynara scolymus* L.). *Food Chemistry*, 95(2), 221-225.
- Rufino, M. S., Alves, R., Fernandes, E. F. A., Brito, E. S. (2011). Free radical scavenging behavior of ten exotic tropical fruits extracts. *Food Research International*, 44(7), 2072-2075.
- Sala, A., Spalding, K., Ashton, K., Board, R., Butler, H., Dawson, T., *et al.* (2020). Rapid analysis of disease state in liquid human serum combining infrared spectroscopy and “digital drying”. *J Biophotonics*, 13:e202000118.
- Salem, M. B., AFFES, H., DAOUD, A., DHOUBI, R., HAMMAMI, S., SAHNOUN, Z., KSOUDA, E. (2021). Antimicrobial Activities of Tunisian Artichoke (*Cynara Scolymus* L.) Leaves Extracts Activites Antimicrobiennes Des Extraits Tunisienne De Feuilles D’artichaut (*CYNARA SCOLYMUS* L.). *Journal de l’Information Médicale de Sfax*, 37, 17.
- Sarr, S.O., Fall, A.D., Gueye, R., Diop, A., Diatta, K., Diop, N., NDiaye, B., Diop, Y.M. (2015). Etude de l’activité antioxydante des extraits des feuilles de *Vitex doniana* (Verbenaceae). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 9(3): 1263-1269.
- Scalbert, A., Canach, C., Morand, C., Rémésy, C. (2005). Dietary polyphenols and the prevention of diseases. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(4), 287-306.
- Serozym Laboratories. (1973). French patent specification no. 2179528.
- Shahidi, F., Naczki, M. (1995). Alcohol-free red wine enhances plasma antioxidant capacity in humans. *Food Phenolics: Sources, Chemistry, Effects, Applications* Technomic Publishing Co. Inc Lancaster :75–107.
- Shahidi, F., Han, X.Q. (1993). Encapsulation of food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 33, 501 - 547.
- Shen, Q, Dai, Z, Lu, Y. (2010). Rapid determination of caffeoylquinic acid derivatives in *Cynara scolymus* L. by ultra-fast liquid chromatography/tandem mass spectrometry based on a fused core C18 column *Journal of separation science*, 33(20), 3152-3158.

Références bibliographiques

- Shi, G., Rao, L., Yu, H., Xiang, H., Yang, H., Ji, R. (2008). Stabilization and encapsulation of photosensitive resveratrol within yeast cell. *International Journal of Pharmaceutics*, 349(1-2), 83-93.
- Shi, G., Rao, L., Yu, H., Xiang, H., Pen, G., Long, S., Yang, C. (2007). Yeast-cell-based microencapsulation of chlorogenic acid as a water-soluble antioxidant. *J. Food Eng*, 80, 1060–1067.
- Spiegel, M., Kapusta, K., Kolodziejczyk, W., Saloni, J., Zbikowska, B., Gluke, A. (2020). Antioxidant Activity of Selected Phenolic molecules, 25, 3088.
- Stagos, D., Amoutzias, G.D., Matakos, A., Spyrou, A., Tsatsakis, A.M., Kouretas, D. (2012). Chemoprevention of liver cancer by plant polyphenols. *Food and Chemical Toxicology*, 50(6), 2155–2170.
- Surai, P.F. (2014). Polyphenol compounds in the chicken/animal diet: from the past to the future. *J. Anim. Physiol. An, N.*, 98, 19–31.
- Symonowicz, M. & Kolanek, M. (2012). Flavonoids and their properties to form chelate Complexes. *Biotechnology and Food Sciences*, 76(1), 35-41.
- Tomas-Barberan, F. A., Espin J C, (2001). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and agriculture*, 81: 853-876.
- Tsao, R. (2010). Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols. *Nutrients*, 2(12), 1231-1246.
- Valko, M., Rhodes, C.J., Moncol, J., Izakovic, M., Mazur, M. (2006). Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer. *Chemico-Biological Interactions*, 160(1), 1-40.
- Van Acker, S.A., Van den Berg, D.J., Tromp, M.N., Griffioen, D.H., Van Bennekom, W.P., Van der Vijgh, W.J., Bast, A. (1996). Structural aspects of antioxidant activity of flavonoids. *Free Radical Biology and Medicine*, 20(3), 331-342.
- Vandamme, T., Poncelet, D., Subra-Paternault. (2007), *Microencapsulation : des sciences aux technologies*, Tech et Doc, Paris.
- Vermerris, W., Nicholson, R. (2006). *Phenolic Compound Biochemistry*. New York, USA: Springer.

Références bibliographiques

- Vinson, A. J., Hontz, B.A. (1995). Phenol antioxidant index: comparative antioxidant effectiveness of red and white wines. *J. Agric. Food Chem.* 4, 401-403.
- Visioli, F., Borsani, L., Galli, C. (2000). Diet and prevention of coronary heart disease: the potential role of Phytochemicals. *Cardiovascular Research* 47, 419–425.
- Waksmundzka-Hajnos, M., Sherma, J. (2011). High Performance Liquid Chromatography in Phytochemical ience. *Chromatographic Science Series*, 477-478.
- Wang, Y., Zhao, L., Wang, D., Huo, Y., Ji, B. (2016). Anthocyanin-rich extracts from blackberry, wild blueberry, strawberry, and chokeberry: Antioxidant activity and inhibitory effect on oleic acid-induced hepatic steatosis in vitro. *J. Sci. Food Agric.*, 96 , 2494–2503.
- Waterhouse, A. (1999).Folin-Ciocalteu Micro Method for Total Phenol in Wine. *Food Anal. Chem*, 299, 152–178.
- Winkel, B. S. J. (2004). Metabolic channeling in plants. *Annual Review of Plant Biology* ,55, 85-107.
- Xia, E. Q., Deng, G. F., Guo, Y. J., Li, H. B. (2011). Biological activities of polyphenols from grapes. *International Journal of Molecular Sciences* ,11(2): 622-646.
- Xiang, N .G. Z., Na See, A. (2018). Effect of in vitro digestion on the total polyphenol and flavonoid, antioxidant activity and carbohydrate hydrolyzing enzymes inhibitory potential of selected functional plant- based foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1-13.
- Zalega, J., Szosta, k - Węgi ere, k. D. (2013). Nutrition in cancer prevention. Part I. Plant polyphenols, carotenoids, dietary fiber (in Polish). *Probl. Hig. Epidemiol.*, 94, 41–49.